

**PROPUESTA DE UNA CAMPAÑA DE MUESTREO PARA LA DETECCIÓN DE ¹³¹I
SOBRE PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL Y COBERTURA VEGETAL,
PRÓXIMA LA LADERA DE LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ**

**MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ SALAZAR
ONEIA OSSINIS GUARÍN SARMIENTO**

**Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO QUÍMICO**

Director

**JACKSON FERNANDO MOSOS PATIÑO
Ingeniero Químico**

Codirector

**JUAN CAMILO CELY GARZON
Ingeniero Químico**

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

2022

Nota de aceptación:

JURADO 1

JURADO 2

Bogotá D.C., mayo de 2022

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro.

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica y de investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decana de la Facultad de Ingenierías

Ing. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra Echeverría

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

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi mamá Saray, por siempre creer en mí, por su paciencia, amor, apoyo, templanza y entendimiento; porque siempre ha estado conmigo siendo un soporte incondicional, buscando la manera de ayudarme a salir adelante.

A mi papá Juan Guarín, por brindarme amor y apoyo constante. Por ser una fuente de inspiración para mí, por darme los mejores consejos y por tener siempre las palabras perfectas y la comunicación tan asertiva para los momentos indicados.

También quiero agradecer a mi hermana Andrea y a mi hermano Juan David, quienes siempre han estado acompañándome con todo el cariño, en todos los momentos.

A mis sobrinos Salim y Juanse, por ser quienes me brindan la calma y el contento necesario para seguir adelante. En especial a mi sobrino Salim, quien, con sus actitud, energía y malos chistes, siempre me saca una sonrisa.

A Santiago Vargas, quien con su cariño siempre me acompañó durante la mayor parte de mi proceso académico; tuvo la mejor disposición para ayudarme y levantarme cuando llegaba al límite.

A mi tito Eduardo, por escucharme, entenderme y ser una persona tan linda conmigo.

Al ingeniero Fernando Mosos Patiño, quien siempre tuvo la mejor disposición de compartir sus conocimientos. Gracias por haber confiado en nosotros, y por brindarnos la oportunidad de trabajar y ampliar nuestros conocimientos en este campo.

Asimismo, quiero agradecer al ingeniero Juan Camilo Cely, por asesorarnos durante todo el trabajo de grado, por su dedicación, por compartir sus amplios conocimientos, por tener siempre la mejor actitud y por ser una excelente guía académica.

Adicionalmente, agradezco a la ingeniera Evelin Tatiana Mora, quien nos acompañó durante todo el proceso; quien además tuvo siempre la mejor disposición para compartir sus conocimientos basados en su experiencia, y para ayudarnos a terminar este trabajo de grado de la mejor manera.

Quiero extender mis más sinceros agradecimientos a la familia Vargas López, quienes me hicieron sentir como en casa desde 4^{to} semestre. En especial a la señora Esmeralda López, quien, con su sabiduría, me ha brindado sugerencias y consejos fructíferos para mi vida.

Oneia Guarín Sarmiento

Primero agradezco a mi madre Liliana Salazar, pues este trabajo es fruto de su esfuerzo, pues fue ella quien no solo me dio la vida sino me acompañó con amor, paciencia y comprensión a lo largo de esta, son su esfuerzo, entrega y tenacidad en gran medida lo que hoy me trae hasta este punto del camino si bien con altibajos también con grandes satisfacciones, le agradezco desde lo más profundo de mi ser el hombre que hoy en día soy y en el que día a día me iré convirtiendo, pues espero se sienta orgullosa de la persona y profesional que ha formado con tanta devoción, le agradezco a mi padre Luis Martin López pues por su compañía a lo largo de mi vida , los valores que me inculco y el ejemplo que fue para mí durante todo este proceso, su brazo amigo cuando lo necesite, sus palabras de apoyo cuando sentí que quería desfallecer. A mi hermana Isabella quien ha sido el más grande motor de mi vida hasta el día de hoy, pues su vida ha sido para la mía un motivo de felicidad, alegría y amor desde el primer momento, le agradezco su compañía y su personalidad tan característica que con actos ha llenado mi vida de calidez. A mis abuelos Carmen Cecilia y Luis Martin Sr. quienes con su cariño han sabido ser guías dispuestos a ayudar y a corregir, igualmente quiero extender este agradecimiento a mis tíos, tías, primos, primas, amigos y seres queridos que me han acompañado a lo largo de este camino pues esto no sería posible sin cada uno de ustedes.

Le agradezco de igual manera al ingeniero Juan Camilo Cely, quien más que nuestro codirector fue nuestro compañero, preocupándose por ampliar tanto nuestros conocimientos como nuestros horizontes y orientándonos con la mejor de las disposiciones en el proceso, le extiendo mi agradecimiento al ingeniero Fernando Mosos, pues fue su apoyo y guía lo que nos permitió realizar este trabajo en conjunto con el Servicio Geológico Colombiano, y por ultimo pero no menos importante ingeniera Evelin Mora por su paciencia y disposición a lo largo de todo el proceso, pues sus conocimientos fueron de vital importancia para nosotros.

Miguel Ángel López Salazar.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de grado en primera instancia a los pilares de mi vida, mis papas, Saray y Juan, quienes, con amor, sacrificio y constancia me brindaron su apoyo incondicional durante este proceso formativo. A mis hermanos, Andrea Carolina y Juan David, y a mi sobrinito Salim, por escucharme, entenderme y brindarme su cariño siempre.

Oneia Guarín Sarmiento

Este trabajo se lo dedico principalmente a mi madre, quien pese a todas las dificultades que la vida trae consigo ha sido mi pilar y más grande apoyo, a mi padre pues ayudo a formarme no solo como profesional sino como persona y a mi hermana ya que ha sido mi compañera, parte de la inspiración y motivación que muchas veces he requerido para seguir.

Miguel Ángel López Salazar

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	21
OBJETIVOS	22
INTRODUCCIÓN	23
1. MARCO TEÓRICO	25
1.1 Yodo	25
1.1.1 Usos	26
1.1.2 Radioisótopos del Yodo	27
1.2 Radiactividad	28
1.2.1 Tipos de radiaciones	28
1.2.2 Tipos de rayos emitidos	30
1.3 Radioisótopos	32
1.3.1 Producción de isótopos radiactivos en Latinoamérica	32
1.3.2 Reactor IAN-RI	33
1.3.3 Impacto ambiental debido a radioisótopos	34
1.4 Aplicaciones de los radioisótopos	39
1.5 Radioisótopo de ^{131}I	40
1.5.1 Formas de obtención	41
1.5.2 Vida útil	42
1.5.3 Aplicación en medicina	43
1.5.4 Impacto ambiental del ^{131}I	46
1.6 Radioisótopo de ^{40}K	47
1.6.1 Tiempo de vida media del ^{40}K	48
1.6.2 Isótopos del Potasio	49
1.6.3 ^{40}K en el medio ambiente	49

1.7	Técnicas de muestreo a utilizar en matrices vegetales	50
1.7.1	<i>Muestreo no probabilístico</i>	50
1.7.2	<i>Muestreo probabilístico</i>	51
1.7.3	<i>Muestreo aleatorio simple</i>	51
1.7.4	<i>Muestreo estratificado</i>	52
1.7.5	<i>Muestreo aleatorio sistemático</i>	52
1.8	Técnicas de muestreo a utilizar en matrices de productos animales	53
1.8.1	<i>Muestreo individual</i>	53
1.8.2	<i>Muestreo compuesto.</i>	54
1.8.3	<i>Muestreo integrado.</i>	54
1.9	Normas para el manejo y análisis	54
1.9.1	<i>ISO 18400 del 2017.</i>	54
1.9.2	<i>ISO 18589 del 2007</i>	55
1.9.3	<i>Resolución 41178 del 2 de diciembre de 2016</i>	55
1.9.4	<i>NTC 399</i>	55
1.9.5	<i>NTC 666</i>	55
1.9.6	<i>Manual de buenas prácticas en el manejo de la leche</i>	55
2.	REVISIÓN DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ¹³¹ I EN AGUAS CON VERTIENTES A LA P.T.A.R EL SALITRE Y A LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ	56
2.1	Generalidades del río Bogotá: extensión, área, sistemas de redes, características principales, contaminación y descontaminación	56
2.1.1	<i>Sistema de redes asociados al río Bogotá</i>	57
2.1.2	<i>Características principales de la Cuenca Media del río Bogotá</i>	58
2.1.3	<i>Causas de la contaminación en el río Bogotá</i>	59
2.1.4	<i>Descontaminación del río Bogotá</i>	60
2.2	Estudio y aporte del proyecto de grado “Propuesta de un plan de muestro y detección de radioisótopos para el establecimiento en zonas con actividad e ¹³¹ I en la red de sistema de alcantarillado de aguas sanitarias con descargas a la cuenca el salitre en Bogotá”	61

2.3	Estudio y aporte del proyecto de grado “Propuesta para la remoción de ¹³¹ I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R del salitre”	62
2.4	Estudio y aporte del proyecto de grado “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”	63
2.5	Antecedentes bibliográficos relacionados con muestreos, cuantificación y determinación de ¹³¹ I en otros lugares del mundo	65
3.	ZONA DE INFLUENCIA PARA LA DETECCIÓN DEL RADIOSOTOPO DE ¹³¹ I	72
3.1	Área de influencia en el contexto de la evaluación de impacto ambiental	72
3.2	Zona de estudio	73
	3.2.1 Descripción general de la zona de estudio	73
	3.2.2 Hidrología	73
	3.2.3 Agua para uso agropecuario	74
	3.2.4 Geología y geomorfología	75
	3.2.5 Situación ambiental de la cuenca	77
3.3	Factores determinantes	78
3.4	Principales resultados en términos de la contaminación del río Bogotá por presencia de radioisótopos y su radio de incidencia	78
3.5	Manejo de aguas contaminadas por radioisótopos en la P.T.A.R. El Salitre	80
3.6	Determinación de la zona de estudio	81
4.	TÉCNICAS DE ADECUACIÓN DE MUESTRAS EN MATRICES ANIMALES Y VEGETALES	83
4.1	Método empleado para la adecuación de muestra ¹³¹ I	83
	4.1.1 Adecuación de muestras en matrices vegetales	85
	4.1.2 Adecuación de muestras en matrices de productos de origen animal	85

4.2	Equipo de detección para cuantificar ^{131}I en matrices vegetales y productos de origen animal	86
4.3	Funcionamiento y partes del espectrómetro gamma con detector de Ge-HP.	89
4.4	Calibración del espectrómetro gamma con detector semiconductor de Ge-HP	91
5.	PLAN DE MUESTREO PARA LA DETECCIÓN DE ^{131}I EN PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL Y COBERTURA VEGETAL	97
5.1	Características de muestreo	97
5.1.1	<i>Tipo de muestras a analizar para cuantificar ^{131}I</i>	97
5.1.2	<i>Muestreo recomendado para el proyecto</i>	98
5.2	Equipos, reactivos, materiales e insumos requeridos	100
5.2.1	<i>Elementos de protección e identificación personal</i>	100
5.2.2	<i>Reactivos y conservantes</i>	100
5.2.3	<i>Insumos y materiales</i>	100
5.2.4	<i>Equipos</i>	100
5.3	Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis para cada matriz	101
5.3.1	<i>Procedimiento para analizar muestras de pasto</i>	101
5.3.2	<i>Procedimiento para analizar muestras de lechuga</i>	103
5.3.3	<i>Procedimiento para analizar muestras de huevos</i>	104
5.3.4	<i>Procedimiento para analizar muestras de leche</i>	106
6.	REPORTE DE RADIOACTIVIDAD EN MATRIZ LECHE	118
6.1	Cuantificación de actividad de ^{131}I presente en matriz leche	120
6.2	Cuantificación de actividad de ^{40}K presente en matriz leche	121
7.	CONCLUSIONES	127
	BIBLIOGRAFIA	129
	GLOSARIO	138
	ANEXOS	140

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Identificación de propiedades químicas del Yodo	26
Figura 2. Tipos de rayos emitidos	30
Figura 3. Formas de propagación de la contaminación por ^{131}I	37
Figura 4. Gráfico de reducción de la radiactividad de ^{131}I	41
Figura 5. Proceso de producción de ^{131}I mediante la activación del isótopo ^{130}Te	42
Figura 6. Esquema de decaimiento del ^{131}I	43
Figura 7. Absorción del ^{131}I en el cuerpo humano	44
Figura 8. Impacto de las radiaciones en el cuerpo humano	46
Figura 9. Decaimiento del ^{40}K en el elemento estable Argón 40 y Calcio 40	48
Figura 10. Esquema de decaimiento del ^{40}K	49
Figura 11. Gráfica del enfoque del muestreo aleatorio simple	51
Figura 12. Gráfica del enfoque del muestreo estratificado	52
Figura 13. Gráfica del enfoque del muestreo aleatorio sistemático	53
Figura 14. Localización del Río Bogotá	57
Figura 15. Actividad de ^{131}I en los puntos muestreados	64
Figura 16. Gráfico de resultados de la evolución de ^{131}I en el día	81
Figura 17. Zona de estudio para la detección del radioisótopo ^{131}I	82
Figura 18. Métodos empleados de adecuación de muestras de lechuga, pasto, leche y huevos para la determinación de ^{131}I	84
Figura 19. Espectrómetro gamma con detector de Ge-HP, DET F	86
Figura 20. Representación esquemática de la interacción de la radiación gamma de energía en el detector	89
Figura 21. Esquema de la cadena electrónica del sistema de espectrometría gamma con detector de Ge-HP	90
Figura 22. Disposición espacial de un espectrómetro de rayos gamma con detector semiconductor de Ge-HP	91
Figura 23. Esquema para la calibración del espectrómetro GL0515	93
Figura 24. Verificación de distancia entre la fuente y el detector	93
Figura 25. Verificación de altura	94
Figura 26. Verificación de linealidad	95
Figura 27. Reportes de estabilidad del espectrómetro GL0515	96

Figura 28. Ubicación de los puntos de muestreo a lo largo de la cuenca media del Río Bogotá	99
Figura 29. Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz pasto, para la cuantificación de ^{131}I	102
Figura 30. Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz lechuga, para la cuantificación de ^{131}I	104
Figura 31. Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz huevo, para la cuantificación de ^{131}I	105
Figura 32. Ilustración de ordeño al bovino	106
Figura 33. Ilustración del transvasado de la leche a cantimplora de acero inoxidable	107
Figura 34. Proceso de filtrado de la muestra	108
Figura 35. Sticker rotulador de muestras	108
Figura 36. Proceso de refrigeración	109
Figura 37. Agitación de la muestra	110
Figura 38. Medición de pH a la muestra	111
Figura 39. Pesaje de recipiente vacío de polietileno	111
Figura 40. Marca de agua en recipientes de polietileno	112
Figura 41. Pesaje de muestra contenida en recipiente de polietileno	113
Figura 42. Desmontaje de recubrimiento de protección del blindaje en plomo	114
Figura 43. Montaje de la muestra en el espectrómetro gamma DET F	115
Figura 44. Configuración del equipo para la lectura de las muestras	116
Figura 45. Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz leche, para la cuantificación de ^{131}I	117
Figura 46. Ejemplo de espectro arrojado por el software Maestro	120
Figura 47. Actividad de ^{40}K Vs Muestras tomadas para análisis de leche	122
Figura 48. Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 06/10/2021	123
Figura 49. Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 11/10/2021	124
Figura 50. Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 19/10/2021	125
Figura 51. Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 26/10/2021	126

Figura 52. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 01	141
Figura 53. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 02	142
Figura 54. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 03	143
Figura 55. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 04	144
Figura 56. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 05	145
Figura 57. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 06	146
Figura 58. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 07	147
Figura 59. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 08	148
Figura 60. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 09	149
Figura 61. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 10	150
Figura 62. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 11	151
Figura 63. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 12	152
Figura 64. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 13	153
Figura 65. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 14	154
Figura 66. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 15	155
Figura 67. Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 16	156

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Isótopos asociados al Yodo	27
Tabla 2. Reactores para producción de radionúclidos en Latinoamérica	32
Tabla 3. Características del reactor nuclear IAN-R1	34
Tabla 4. Radionúclidos con mayor índice de presencia en matrices evaluadas	36
Tabla 5. Dosis de ^{131}I administrada a pacientes	45
Tabla 6. Generalidades del radionúclido ^{40}K	48
Tabla 7. Dosis media que afecta a la población en cada pozo	61
Tabla 8. Resumen histórico de las liberaciones de ^{131}I en el mundo	65
Tabla 9. Resumen de estudios importantes de ^{131}I	67
Tabla 10. Uso del agua en la cuenca media del río Bogotá	74
Tabla 11. Descripción de suelos por subcuenca	76
Tabla 12. Situación ambiental de la zona	78
Tabla 13. Especificaciones del equipo de espectrometría gamma, DET F.	87
Tabla 14. Energías de radionúclidos empleados calibrar el espectrómetro GL0515	92
Tabla 15. Resultados obtenidos de los espectros en la última calibración del equipo GL0515	95
Tabla 16. Pesos de los recipientes de polietileno antes de la muestra (vacío), con la muestra (lleno), y peso neto en gramos y kilogramos	118
Tabla 17. Tiempos de muestreo: fecha y hora de la toma y análisis de muestras	119
Tabla 18. Actividad de ^{131}I y resultados generales obtenidos del análisis de 16 muestras de leche	121
Tabla 19. Actividad de ^{40}K y resultados generales obtenidos del análisis de 16 muestras de leche	121
Tabla 20. Características de tiempos de muestra Leches 01	141
Tabla 21. Características de tiempos de muestra Leches 02	142
Tabla 22. Características de tiempos de muestra Leches 03	143
Tabla 23. Características de tiempos de muestra Leches 04	144
Tabla 24. Características de tiempos de muestra Leches 05	145
Tabla 25. Características de tiempos de muestra Leches 06	146
Tabla 26. Características de tiempos de muestra Leches 07	147
Tabla 27. Características de tiempos de muestra Leches 08	148

Tabla 28. Características de tiempos de muestra Leches 09	149
Tabla 29. Características de tiempos de muestra Leches 10	150
Tabla 30. Características de tiempos de muestra Leches 11	151
Tabla 31. Características de tiempos de muestra Leches 12	152
Tabla 32. Características de tiempos de muestra Leches 13	153
Tabla 33. Características de tiempos de muestra Leches 14	154
Tabla 34. Características de tiempos de muestra Leches 15	155
Tabla 35. Características de tiempos de muestra Leches 16	156

LISTA DE SIGLAS

a: años.

AI: Área de Influencia.

A.I.E.A: Organismo Internacional de Energía Atómica (por sus siglas en inglés International Atomic Energy Agency).

α : radiación alfa.

²⁴¹Am: isótopo radiactivo Americio-241.

⁴⁰Ar: isótopo radiactivo Argón-40.

¹³³Ba: radioisótopo Bario-133.

Be: elemento químico Berilio.

Bq: unidad radiactiva Bequerelio o Becquerel.

β : desintegración beta, emisión beta o decaimiento beta.

¹⁴C: isótopo radiactivo Carbono-14 o radiocarbono.

⁴⁰Ca: isótopo radiactivo Calcio-40.

CAR: Corporación Autónoma Regional.

CE: captura de electrones.

Ci: unidad radiactiva Curie o Curio.

cm: centímetro.

²⁴²Cm: isótopo radiactivo Curio-242.

⁶⁰Co: isótopo radiactivo Cobalto-60.

¹³⁴Cs: isótopo radiactivo Cesio-134.

¹³⁷Cs: isótopo radiactivo Cesio-137.

E.P.A: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (por sus siglas en inglés Environmental Protection Agency).

¹⁶²Eu: isótopo radiactivo de Europio-162

F.A.O: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization).

⁵⁹Fe: isótopo radiactivo Hierro-59.

g: gramo

GeHp: Germanio Hiperpuro.

I.C.R.P: Comisión Internacional de Protección Radiológica (por sus siglas en inglés International Commission on Radiological Protection).

I.C.R.U.: Comisión Internacional de Unidades Radiológicas (por sus siglas en inglés International Commission on Radiation Units and Measurements).

h: hora.

³H: isótopo natural Hidrógeno-3.

¹³¹I: isótopo radiactivo Yodo-131.

I.D.E.A.M.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

ISO: Organización Internacional de Normalización (por sus siglas en inglés International Organization for Standardization).

ISSN: Número de Serie Estándar Internacional (por sus siglas en inglés International Standard Serial Number).

⁴⁰K: isótopo radiactivo Potasio-40.

KeV: kiloelectrónvoltio.

Kg: kilogramo.

KI: Yoduro de Potasio.

kV: kilovatio.

kW: kilovatio (kilowatt).

L: litro.

m: metro

m²: metro cuadrado.

m³: metro cúbico.

mCi: milicuries o milicurios.

Min: minuto.

mL: mililitro.

mm: milímetro.

mm²: milímetro cuadrado.

⁵⁴Mn: isótopo radiactivo Manganeso-54.

⁹⁹Mo: isótopo radiactivo Molibdeno-99.

ms: milisegundos.

msnm: metros sobre el nivel del mar.

MV: megavatio.

MW: megavatio o megawatt.

MWt: megavatio o megawatt.

²²Na: isótopo radiactivo Sodio-22.

NaOH: Hidróxido de Sodio.

⁹⁵Nb: isótopo radiactivo Niobio-95.

N.K.A: Comité De Enlace Nórdico Para La Energía Atómica (por sus siglas en inglés Nordic Liaison Committee for Atomic Energy).

ns: nanosegundo.

NTC: Norma Técnica Colombiana.

O.I.E.A: Organismo Internacional de Energía Atómica (por sus siglas en inglés International Atomic Energy Agency).

O.M.S: Organización Mundial de la Salud.

P.T.A.R: Planta de Tratamiento de Aguas Residuales.

²³⁸Pu: isótopo radiactivo Plutonio-238.

²³⁹⁺²⁴⁰Pu: isótopo radiactivo Plutonio-239+240.

R.C.A: Resolución de Calificaciones Ambientales.

rpm: revoluciones por minuto.

ROI: área o región de interés.

¹⁰³Ru: isótopo radiactivo Rutenio-103.

¹⁰⁶Ru: isótopo radiactivo Rutenio-106.

s: segundo.

s²: segundo cuadrado.

S.E.I.A: Asociación de Industrias de Energía Solar (por sus siglas en inglés Solar Energy Industries Association).

S.G.C: Servicio Geológico Colombiano.

⁸⁹Sr: isótopo radiactivo Estroncio-89.

⁹⁰Sr: isótopo radiactivo Estroncio-90.

t_{1/2}: tiempo de vida media.

T3: hormona triyodotironina.

T4: hormona tiroxina.

U: elemento químico Uranio.

²³⁵U: isótopo natural Uranio-235.

²³⁸U: isótopo natural Uranio-238.

μs: microsegundo.

Xe: elemento químico Xenón.

¹²⁹Xe: isótopo radiactivo Xenón-129.

γ: radiación gamma.

Z: Número Atómico.

⁶⁵Zn: isótopo radiactivo natural Zinc-65.

⁹⁵Zr: isótopo radiactivo natural Zinc-95.

RESUMEN

Este proyecto de grado se focalizó en plantear estrategias de muestreo en diferentes tipos de matrices vegetales y productos de origen animal como los huevos de gallina, y leche, con el fin de determinar la actividad de ^{131}I contenido en ellas. Para ello, se llevó a cabo una revisión bibliográfica extensa de la cual, se extrajeron los datos de valor para posteriormente, crear métodos de adecuación y detección.

Debido a la actividad de ^{131}I presente en el agua de la cuenca media del río Bogotá, y, al empleo de las aguas procedentes de este afluente, en actividades agrícolas, nació el interrogante de una posible alteración de la cadena alimentaria como consecuencia de la presencia de este radionúclido en productos comestibles por el ser humano. Por lo anterior, se procedió a realizar un desarrollo experimental del análisis de muestras de leche producidas en la ladera de la cuenca media del Río Bogotá, en un espectrómetro gamma con detector de Germanio Hiperpuro. Para ello, se delimitó el radio de influencia en el cual se tomaron las muestras, y posterior a esto, se realizó la toma de 16 muestras de leche producidas en 4 fincas en diferentes ubicaciones, 2 de ellas localizadas antes de la P.T.A.R del Salitre, y 2 después de la P.T.A.R del Salitre, con el fin de conocer en qué medida el procedimiento de tratamiento de aguas afectaba las concentraciones de ^{131}I .

Como resultado del desarrollo experimental, se evidenció la ausencia de ^{131}I en las muestras analizadas, por lo que se descarta la contaminación por ^{131}I en leches producidas en la ladera de la cuenca media del río Bogotá. Adicionalmente, se analizó la actividad de ^{40}K en las mismas muestras tomadas para estudiar la actividad de ^{131}I .

Palabras Clave: Actividad radiactiva, Espectrometría gamma, detector de Ge-HP, Radioisótopo, Muestreo, Zona de Influencia, Matrices Vegetales, Matrices de Productos Animales

OBJETIVOS

Objetivo General

Establecer una campaña de muestreo y técnicas necesarias para la detección del radioisótopo de ^{131}I sobre productos de origen animal y cobertura vegetal próxima a la ladera de la cuenca media del río Bogotá.

Objetivos específicos

- Revisar la información existente referente a los niveles de concentración del radioisótopo ^{131}I en aguas con vertientes de la P.T.A.R. El Salitre y la cuenca media del río Bogotá.
- Determinar una zona de influencia próxima a la ladera de la cuenca media del río Bogotá, para la detección del radioisótopo ^{131}I .
- Seleccionar las técnicas de adecuación de muestras y detección del radioisótopo ^{131}I sobre productos de origen animal y cobertura vegetal
- Plantear una estrategia de muestreo y detección de ^{131}I en productos de origen animal y cobertura vegetal, en la cuenca media del río Bogotá.

INTRODUCCIÓN

La medicina nuclear es un tipo de tratamiento usado actualmente por la medicina tradicional, para tratar diversas anomalías. Como ejemplo de esto podemos observar la toma de radiografías utilizando rayos X y los diferentes tipos de tratamientos realizados con radioisótopos. A lo largo de los años, el ^{131}I ha tenido un mayor auge en la industria médica debido a que es un isótopo radiactivo que se emplea para el diagnóstico y tratamiento de enfermedades relacionadas con la glándula tiroides, presentando resultados con altos índices de eficiencia, motivo por el cual, es la primera línea terapéutica en el control del hipertiroidismo y cáncer de tiroides [1].

Actualmente en Bogotá se realizan tratamientos médicos usando el ^{131}I , siendo en total 28 los hospitales que cuentan con autorización para el manejo del material radiactivo en medicina nuclear [4]. Sin embargo, este Yodo radiactivo al ser suministrado por vía oral o intravenosa, y al haber pacientes a los cuales se les realiza un seguimiento durante el tiempo del tratamiento, así como otros tratados de forma ambulatoria, hacen que los contenidos del mismo sean tratados de forma poco eficaz, ya que los desechos de orina y de heces de los pacientes tratados, son vertidos directamente al alcantarillado de la ciudad sin haber cumplido con el periodo de tiempo de desintegración del radioisótopo, contaminando el agua del río en el que desembocan e incumpliendo con la resolución colombiana número 41178 del Ministerio de Minas y Energía del 2 de diciembre de 2016 la cual establece la tasa de emisión mensual de ^{131}I en aguas, en concentración de actividad de 19 Bq/L y el límite de emisión anual de 1000000 Bq/año [2].

Gracias al desarrollo de estudios previos a este trabajo, como lo fueron los trabajos de grado “Propuesta Para La Remoción De ^{131}I A Nivel Generadores Debido A Su Concentración En Los Flujos De La P.T.A.R Del Salitre”, y “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” en los cuales determinaron actividades de ^{131}I muy superiores a lo permitido en la red de alcantarillado de la ciudad de Bogotá, cuyas aguas son vertidas en la cuenca media del río Bogotá.

El río Bogotá al ser un afluente hídrico empleado principalmente para realizar actividades agroindustriales, dentro de las cuales se destacan el sistema de riego de cultivos y alimentación

de bovinos, debe ser un afluyente con alto monitoreo de sustancias radiactivas. Por tal razón, surgió la preocupación de una posible contaminación y alteración de la cadena alimenticia de los seres humanos (principalmente aquellos que no requieren ser tratados con dicho radioisótopo). Es por esto que se generó la necesidad de realizar un estudio en el cual se pudiera establecer una campaña de muestreo para la determinación de la presencia de ^{131}I en matrices vegetales y de productos de origen animal.

Para el desarrollo de trabajo de investigación, se consultaron primeramente diferentes fuentes bibliográficas, con el fin de establecer diversos parámetros como la determinación de la zona de influencia, adecuaciones de muestras, procedimientos de análisis, entre otros. Permitiendo realizar la toma de 16 muestras en 4 fincas con diferente ubicación a lo largo de la cuenca media del río. Estas 16 muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Radiactividad Natural de las instalaciones del Servicio Geológico Colombiano, obteniendo como resultados la ausencia del radioisótopo en las muestras analizadas.

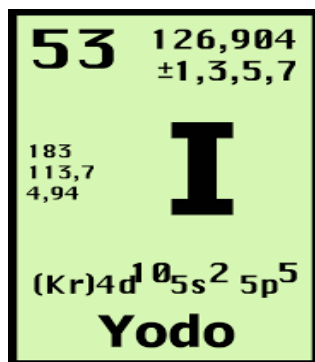
1. MARCO TEÓRICO

Para llevar a cabo el correcto análisis para la detección de ^{131}I en matrices vegetales y de productos animales, es necesario aterrizar conceptos relacionados con el estudio del ^{131}I para que el lector tenga un conocimiento previo sobre qué son los radionúclidos, los tipos de rayos emitidos, los isótopos asociados al Yodo, así como la problemática que se genera a partir de los altos niveles de concentración de éste radionúclido en un afluyente acuático utilizado para diversas actividades agroindustriales.

1.1 Yodo

Es un elemento no metálico de símbolo I, el cual es considerado como 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 [3]. Este elemento es considerado como un mineral esencial para la vida, por lo que se asegura que poseemos unos 50 miligramos en todo el cuerpo, y 10 de ellos se encuentran en la glándula tiroides, riñones, suprarrenales y órganos sexuales y dentro del organismo se une a un aminoácido llamado tirosina y forma la hormona Tiroxina, imprescindible en más de 100 procesos químicos, como son: Producción de energía, crecimiento, reproducción, funcionamiento del sistema nervioso, entre otros [4].

Figura 1.
*Identificación de
propiedades químicas
del Yodo*



Nota. Esta figura muestra las propiedades químicas del Yodo de acuerdo a la tabla periódica de los elementos químicos. Tomado de: E. Morino, Los Halógenos, presentación. [En línea]. Disponible en: <https://slideplayer.es/slide/3410451/>. [Acceso: mar.27,2021]

El yoduro absorbido en el organismo es rápidamente captado por la glándula tiroides en las cantidades requeridas para una adecuada síntesis hormonal y el Yodo restante es excretado en la orina, por lo que su principal función es la síntesis de las hormonas tiroideas, tiroxina (T4) y triyodotironina (T3), esenciales para el desarrollo del sistema nervioso central, crecimiento, termogénesis y diversas funciones del metabolismo orgánico. En su ausencia, el ser humano no puede crecer, ni completar su ciclo vital de forma saludable [4].

1.1.1 Usos

El Yodo tiene amplias aplicaciones industriales, su uso más importante es como desinfectante para limpiar superficies y envases. De igual forma, se usa en jabones, vendajes para la piel, para purificar agua y en medicamentos. Adicional a lo anterior, el Yodo se añade a los alimentos para humanos y animales con el fin de asegurar que tanto los humanos como los

animales tengan suficiente Yodo en el cuerpo para producir las hormonas tiroideas. Asimismo, el Yodo se emplea en la industria química para fabricar tinturas, colorantes, sustancias químicas usadas en fotografía, así como en la fabricación de baterías, combustibles y lubricantes [5].

Adicionalmente, es empleado como biocida -los cuales se utilizan en aplicaciones industriales tales como pinturas, adhesivos, tratamiento de madera y fluidos para metalurgia- mientras que, en la industria farmacéutica es ampliamente utilizado como materia prima para los medios de contraste en exámenes de rayos X y en antisépticos, así como catalizador o reactivo en la síntesis de numerosos ingredientes farmacéuticos activos tales como antibióticos, corticoides y fármacos cardiovasculares [6].

1.1.2 Radioisótopos del 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 [7], 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 [7]. A continuación, se presenta la Tabla 1, en la cual se presentan la totalidad de isótopos radiactivos asociados al Yodo.

Tabla 1.

Isótopos asociados al 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	1.57x10 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

Nota. Esta tabla muestra los diferentes radioisótopos del Yodo y su vida media. Entre ellos se destaca el ¹²⁷I al ser el único estable. Tomado de: E.T. Mora C., C. D. Tello R: 2020, Propuesta para la remoción de ¹³¹I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R Salitre [En Línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: abr.01,2021]

1.2 Radiactividad

La radiactividad se define como la reacción nuclear de “descomposición espontánea”, es decir, un radionúclido estable se descompone en otro más estable que él, a la vez que emite una “radiación”. El núclido hijo (el cual resulta de la desintegración), puede no ser estable, por lo cual, se desintegra en un tercero, el cual puede continuar el proceso, hasta que finalmente se llegue a un núclido estable. Se dice que los núclidos sucesivos de un conjunto de desintegraciones forman una serie radiactiva o familia radiactiva[8].

1.2.1 Tipos de radiaciones

Hay varias clases de radiaciones, de las cuales a continuación, se mencionan las más relevantes en la actualidad, y las más útiles para mejorar la comprensión de este documento.

1.2.1.a Radiación artificial. Es un proceso no espontáneo en el que los elementos ligeros se hacen radiactivos por un método artificial o inducido. Aquí, los nuevos elementos radiactivos son producidos por un proceso de transmutación. Las emisiones en este proceso son positrones o electrones, es decir, β^+ o β^- [9]. Su origen proviene de centrales nucleares, pruebas médicas,

otras radiaciones procedentes de otra fuente como lo pueden ser de televisión, ordenador, etc., siendo éstas fuentes el 12%, y de éste el 0,1% es de las centrales nucleares[10].

1.2.1.b Radiación natural. Este tipo de radiación procede de la transformación de los materiales radiactivos que componen la corteza terrestre y de las radiaciones procedentes del espacio exterior, las cuales constituyen la radiación cósmica. Esto significa que existe un fondo radiactivo natural desde que se creó el Planeta Tierra y al que estamos perfectamente adaptados; en este orden de ideas, ciertos autores aseguran que incluso en nuestro propio cuerpo poseemos ciertos compuestos radiactivos como el ^{40}K y el ^{14}C , y por término medio la radiactividad de nuestro cuerpo se cifra en unos 12.000 Bq [10].

Por lo anterior, en este proyecto se incluye la revisión de la actividad de ^{40}K en la matriz leche evaluada, ya que, a pesar de que la producción de este radionúclido se puede atribuir a la formación natural, su elevada presencia en alimentos consumidos por humanos puede llevar a una intoxicación severa, o incluso la muerte. Cabe mencionar que si bien el ^{14}C también es un elemento abundante en la corteza terrestre, lo cual hace que como humanos estemos expuestos a la radiactividad relacionada con éste, en este trabajo no se tuvo en cuenta dado que el ^{14}C presenta una mayor dificultad para ser medido ya que para realizar el proceso se requiere de un espectrómetro para centelleo líquido que determine la actividad de las partículas beta o de un espectrómetro de aceleración de masas el cual realice un conteo directamente de los átomos de ^{14}C que existan dentro de una muestra sin tener en cuenta los decaimientos [11].

1.2.1.c Radiación ionizante. Se llama radiación ionizante a los rayos que, debido a su alta energía cinética, a su paso por los materiales provocan ionización o excitación de las moléculas o de los cristales, o que, en su defecto, producen separación de cargas eléctricas dentro del material. La primera radiación ionizante que se conoció fueron los rayos X, descubiertos en 1895 por Wilhelm Conrad Roentgen. Este tipo de rayos se producen cuando en un tubo al vacío (llamado tubo de rayos catódicos), se polarizan sus dos electrodos con una diferencia de potencial muy alta (Kilovoltios), del orden de la energía del potencial de ionización de los electrones más internos del material del ánodo (Kilo electrón Voltios). Otro tipo de radiación ionizante es la radiactividad [12]. Por otro lado, dentro del espectro electromagnético, la parte de energías más altas corresponde a las radiaciones ionizantes, que son aquellas que modifican la estructura de la materia con la que inciden, arrancando electrones de la corteza de los átomos (fenómeno conocido como ionización) [10].

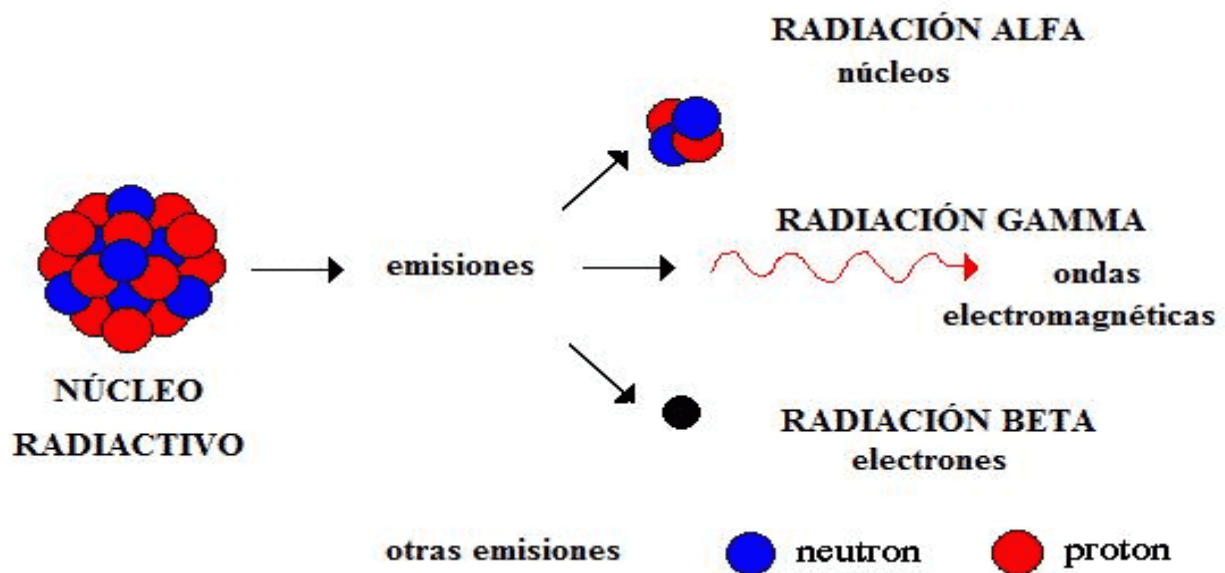
1.2.2 Tipos de rayos emitidos

Como se mencionó anteriormente, el tipo de radiación más abundante en la Tierra es la radiación ionizante, de la cual se conocen varios tipos como lo son: la radiación alfa (α), la radiación beta (β), la radiación gamma (γ) y los Rayos X.

Las radiaciones alfa, beta y gamma provienen de la desintegración de los núcleos y se pueden originar de manera espontánea en la naturaleza, o ser provocadas artificialmente. Mientras que los Rayos X provienen de las transformaciones que tienen lugar en la corteza de los átomos y son de origen artificial [13]. Esta información es relevante para el estudio de la actividad del radionúclido de ^{131}I , ya que el proyecto en desarrollo se lleva a cabo sobre la emisión de los rayos gamma emitidos por el mismo, de esta manera, en la Figura 2 se presenta gráficamente el tipo de radiación anteriormente mencionada, acompañada de la radiación alfa y beta, las cuales complementan el trío de radiaciones más comunes en el mundo.

Figura 2.

Tipos de rayos emitidos



Nota. Esta figura ilustra los rayos alfa, gamma y beta. Tomado de: Cumbre Pueblos, Radiactividad, Qué es y tipo de partículas, publicación. Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018. 2019. [en línea]. Disponible en: <https://cumbrepuebloscop20.org/energias/nuclear/radioactividad/>. [Acceso: abr.14,2021]

1.2.2.a Radiación alfa. La radiación alfa se compone de partículas cargadas positivamente, las cuales comprenden dos protones y dos neutrones. Esta radiación generalmente es emitida por

los radionúclidos de elementos pesados como el Uranio, el Radio, el Radón y el Plutonio. La radiación alfa sólo se propaga en el aire unos centímetros y se puede bloquear con una hoja de papel. A diferencia de los rayos X, esta radiación no puede atravesar la piel, por lo que, si una sustancia que emite radiación alfa penetra en el cuerpo humano, liberará toda su energía en las células vecinas. Cabe mencionar que si un material emisor alfa es inhalado o ingerido, éste podrá absorberse por heridas y llegar a tener efectos dañinos para el ser humano [14][15].

1.2.2.b Radiación de rayos X. Es similar a la radiación gamma con la diferencia de que suelen producirse de manera artificial mediante el bombardeo con electrones a un blanco metálico en un vacío, para detener la radiación de los rayos X se ha demostrado que materiales como el plomo resultan formar una barrera protectora de amplia eficiencia [15]. Este tipo de radiación cuenta con una capacidad energética lo suficientemente grande como para pasar a través del cuerpo humano y a medida que va desplazándose por este puede para por los huesos, tejidos y órganos de diferentes formas [1].

1.2.2.c Radiación gamma. Es una radiación electromagnética del mismo tipo que la luz, pero de menor longitud de onda. A diferencia de la radiación alfa o beta, no se desvía en un campo magnético indicando que sus partículas no poseen carga eléctrica y, además, no hay variación del número másico A, ni del número atómico Z del núcleo que emite esta radiación gamma. Ésta acompaña a algunos procesos de desintegración radiactiva en la que el núcleo queda en un estado excitado [16], como corresponde al caso del ^{131}I . Este tipo de radiación cuenta con un gran alcance tanto en el aire y así mismo una capacidad de penetración considerable, para detener su alcance materiales como el plomo o el hormigón suele ser eficaces [15].

1.2.2.d Radiación beta. La radiación beta se encuentra compuesta por electrones, los cuales tienen un tamaño mucho más pequeño que el de las partículas alfa y así mismo su grado de penetración es mayor. Elementos como láminas de metal o vidrio y la misma ropa son capaces de detenerla. Este tipo de radiación es capaz de atravesar la piel humana hasta la ‘capa germinal’, donde se producen nuevas células de la piel. Así mismo, sostener un contacto prolongado entre los emisores de radiación beta y la piel puede causar lesiones en ésta [15].

Puede ser de tipo negativo o positivo. Las partículas beta negativas (β^-) son electrones que se generan en el núcleo y poseen mayor velocidad que los electrones orbitales. La generación de estos electrones siguen el mismo mecanismo de transformación de un neutrón en un protón (p

+) más una partícula beta y una partícula sin carga, de masa despreciable, llamada antineutrino [16].

1.3 Radioisótopos

Los radioisótopos son isótopos radiactivos que tienen un núcleo atómico inestable (por el balance entre neutrones y protones), y emiten energía y partículas cuando cambia de esta forma a una más estable [8]. En otras palabras, los radioisótopos son la forma inestable de un elemento que emite radiación para transformarse en una forma más estable. La radiación se puede rastrear fácilmente y causar cambios en la sustancia que la recibe. Estos atributos especiales hacen que los radioisótopos sean útiles en la medicina y en la industria [17].

1.3.1 Producción de isótopos radiactivos en Latinoamérica

Actualmente existen siete reactores nucleares ubicados en distintos lugares de Latinoamérica como México, Argentina, Perú, Chile y Brasil, los cuales cubren un amplio espectro de aplicaciones, principalmente médicas e industriales [18]. Adicional a ello, otros dos reactores multipropósito iniciaron en el 2017 su etapa de planeación, el RA-10 de Argentina y el RMB de Brasil, ambos de 30 MWt tipo piscina. A pesar de la presencia de estos reactores nucleares en Latinoamérica, la producción de radionúclidos a gran escala en los reactores mencionados no cubre la totalidad de la demanda local, lo cual hace que un porcentaje significativo se importe, principalmente el ^{99}Mo , y el ^{131}I de Canadá, debido a que actualmente tan solo cinco de los veintiún países de Latinoamérica cuentan con reactores para ello [2]. La Tabla 2, presenta un resumen de las características de los reactores nucleares ubicados en Latinoamérica.

Tabla 2.

Reactores para producción de radionúclidos en Latinoamérica

País	Reactor	Lugar	Tipo	Potencia (kW)	Primera fecha criticidad
Argentina	RA-3	Buenos Aires	Piscina/Investigación	10.000	17/05/1967
Argentina	RA-6	Bariloche	Piscina/Investigación	1.000	23/09/1982
Brasil	IEA-R1	Saou Paulo	Piscina/Investigación	5.000	16/09/1957

Brasil	IPR-R1	Belo Horizonte	TRIGA Mark 1	100	06/11/1960
Chile	RECH-1	Santiago	Piscina/Investigación	5.000	13/10/1974
México	TRIGA-Mark III	Ocoyoacac	TRIGA Mark III	1.000	08/11/1968
Perú	RP-10	Huarangal	Piscina/Investigación	10.000	30/11/1988
Colombia	IAN-R1	S.G.C	Piscina/Investigación	10	20/01/1965

Nota. Esta tabla muestra el listado de reactores nucleares ubicados actualmente en Latinoamérica. Tomado de: D. Alonso, V. Pabón, G. Parrado y J. Parada, *Revisión sobre la producción de radionúclidos en reactores nucleares y sus aplicaciones como radiotrazadores*, Revista Investigaciones y Aplicaciones Nucleares, Dirección de Asuntos Nucleares, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia, 2017. [en línea]. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/17/4>. [Acceso: abr.05,2021]

1.3.2 Reactor IAN-R1

El IAN-R1 es el reactor de investigación empleado en la actualidad en Colombia. Éste fue adquirido a partir de la firma de un tratado bilateral de cooperación técnico-científica nuclear con Estados Unidos en el año 1955. Lo anterior, permitió la adquisición de un reactor diseñado y construido por la compañía Lockheed Western Export Company y operado por la IAN. Este reactor nuclear tipo piscina de 10kW de potencia, el cual, en aquel entonces, funcionaba con 2kg de ^{235}U al 90% de enriquecimiento, fue destinado desde el momento de su elaboración para llevar a cabo investigación heterogénea [19].

Como se mencionó anteriormente este tipo de reactor está diseñado para la generación de energía de con fines investigativos y no tiene la capacidad de producir radioisótopos a partir del mismo.

A lo largo de los años, se le ha realizado múltiples mejoras al reactor en cuanto a la instrumentación y control del reactor. La Tabla No. 3, presenta las características iniciales del IAN-R1.

Tabla 3.*Características del reactor nuclear IAN-R1*

Nombre del reactor	IAN-R1
Potencia térmica nominal	10 Kw
Tipo	Piscina/Investigación
Diámetro del tanque	1.98 m
Profundidad del tanque	5.28 m
Material de la cubierta del tanque	Acero al carbón
Espesor de la cubierta del tanque	0.0063 m
Material de la superficie interna	Capa poliésterica de color blanco
Material del blindaje biológico	Concreto convencional
Espesor del blindaje biológico	1.98 m
Composición del flujo interior	Agua liviana desmineralizada

Nota. Esta tabla describe las características iniciales del reactor IAN-R1. Tomado de: J. Sandoval, E. M. López: 2017, Desarrollo de capacidades para la operación del reactor nuclear IAN-R1. [en línea]. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/23>. [Acceso: sep.02,2021]

Como se mencionó anteriormente, al IAN-R1 se le han hecho dos modernizaciones relacionadas con la instrumentación y control. El motivo principal de estas modificaciones fue el diseño con tecnología electrónica, con la cual había sido construido el reactor, la cual impedía el mantenimiento y la calibración del mismo. Sumado a esto, el problema de accesibilidad a los repuestos llevaron a que la General Atomics modernizara tanto la consola de comando de operaciones, como todo el sistema de instrumentación y control [19].

Por medio de este reactor, es posible generar radionúclidos con aplicaciones médicas e industriales, datación de muestras para la exploración de hidrocarburos, análisis para caracterización de materiales, docencia e investigación [19].

1.3.3 Impacto ambiental debido a radioisótopos

Los radionúclidos pueden emitirse al medio ambiente en diversos escenarios, por ejemplo, cuando se emplean técnicas nucleares en la medicina y la ciencia, durante la explotación de las instalaciones nucleares y/o, cuando se extraen o se procesan Uranio, minerales metálicos,

combustibles fósiles o fosfatos. Lo anterior, hace que sea de suma importancia limitar las emisiones de radiactividad al medio ambiente y asegurar el cumplimiento de las normas de protección radiológica establecidas [20]. Cabe resaltar que el presente proyecto tiene como objetivo principal, medir la actividad de ^{131}I en diversas matrices ambientales, y establecer el impacto de éste en el medio ambiente, y, de esta manera, poder establecer estrategias para limitar las emisiones de radiactividad al medio ambiente, en el caso de que estas sean superiores a los valores permisibles.

Por otro lado, se sabe que los riesgos de la contaminación radiactiva para las personas y el medio ambiente dependen de diferentes factores, tales como: la naturaleza del contaminante radiactivo, del nivel de contaminación y de la extensión de la contaminación.

Gracias a que todas las radiaciones existentes son de carácter genotóxico, la probabilidad de alteraciones genéticas y producción de mutaciones va a depender del grado de exposición de las células de un organismo [21], por ejemplo, se ha evidenciado que el suelo es uno de los principales receptores terminales de la contaminación por radionúclidos, por lo que se pone de manifiesto la profunda alteración de los componentes del suelo (generalmente su biocenosis), los cuales modifican la estructura ecológica y, en consecuencia, el funcionamiento global del sistema edáfico [22], ocasionando mutaciones en la diversidad de flora y cultivos en donde estén llevando a cabo su desarrollo. De acuerdo a lo anterior, en los últimos años se ha tomado mayor conciencia de la vulnerabilidad del medio ambiente y la necesidad de protegerlo contra los efectos de los contaminantes industriales, con inclusión de los compuestos radiactivos [20].

En general, los radionúclidos de mayor importancia en la contaminación de muestras alimentarias y ambientales [23], se presentan a continuación.

Tabla 4.*Radionúclidos con mayor índice de presencia en matrices evaluadas*

Matriz	Radionúclido
Suelo	^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{238}Pu , $^{239+240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{242}Cm , ^{40}K
Vegetación	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{103}Ru , ^{106}Ru , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{141}Ce , ^{144}Ce
Animales	^{90}Sr , ^{137}Cs , ^3H , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{22}Na , ^{65}Zn , ^{131}I , U
Humanos	$^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{131}I , ^{40}K , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{89}Sr , ^{90}Sr
Leche	^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{131}I

Nota. Esta tabla muestra los radioisótopos con mayor presencia en las matrices especificadas en los recuadros de la izquierda. Tomado de: Organismo Internacional de Energía Atómica (A.I.E.A): 1989, Medición De Radionuclidos En La Alimentación Y El Medio Ambiente. [En Línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/041/20041399.pdf. [Acceso: mar.17,2021]

1.3.3.a Impacto de radionúclidos sobre el suelo. El suelo contaminado sirve como fuente directa de radionúclidos que provocan la contaminación de todos los productos agrícolas [23]. El suelo contaminado utilizado en los invernaderos podría contribuir significativamente a la contaminación de las verduras, tubérculos, y demás legumbres, ya que la calidad de la comida depende directamente del suelo y los recursos hídricos del entorno humano finito.

Por otro lado, se sabe que todos los suelos del mundo son radiactivos, como producto de los radionúclidos primordiales presentes de forma natural en la Tierra, los cuales incluyen trazas de Carbono radiactivo como en el caso del ^{14}C e Hidrógeno radiactivo, formados por la acción de los rayos cósmicos en la atmósfera y que llegan al suelo a través de la fotosíntesis del suelo y la absorción de agua; y los elementos naturalmente radiactivos de Potasio como el ^{40}K , Uranio y Torio. Éstos últimos, presentes en los precursores geológicos de muchos suelos [24].

1.3.3.b Impacto de radionúclidos sobre organismos humanos y animales. Las fuentes naturales de radionúclidos representan alrededor del 80 % de la dosis media anual mundial a la que están expuestas las personas. La mayor fuente artificial de exposición para los humanos es la

radiación con fines médicos, cuya contribución a la dosis media anual total ronda entre el 20 %, es decir, aproximadamente la mitad de la contribución del mayor componente natural a la dosis media anual [14].

Para el caso específico del Yodo, los isótopos asociados a él se pueden incorporar al metabolismo biológico juntamente con el isótopo estable, los cuales se concentran en la tiroides, y al ser absorbido directamente, pueden ser absorbido a través de la piel y de las mucosas [25]. Cabe considerar que no todo el Yodo radiactivo absorbido por los humanos se adquiere de forma médica, sino también por contaminación natural o artificial de los alimentos consumidos, tal y como se ilustra en la siguiente figura, en la cual se presentan las rutas de contaminación de seres humanos por ^{131}I .

Figura 3.

Formas de propagación de la contaminación por ^{131}I



Nota. En la figura anterior se indican las posibles formas y cadenas de contaminación del radioisótopo ^{131}I . Tomado de:

https://www.atsdr.cdc.gov/sites/oakridge/docs/orr_iodine_tech-factsheet_508.pdf.

[Acceso: nov.05,2021]

Como se señala en la Figura 3, el ^{131}I se puede transportar con facilidad a través del aire debido a su alta volatilidad. Sin embargo, para que se pueda movilizar de esta forma, debe llegar al medio mediante accidentes nucleares tales como el de Chernobyl en 1986, o el de Fukushima

en 2011, donde los reactores por distintos motivos expidieron al ambiente cantidades alarmantes de radioisótopos. Adicionalmente, se conocen accidentes de menor magnitud en plantas de producción de radionúclidos que igualmente han tenido efectos daños sobre en ambiente, generando de esta manera contaminación por radionúclidos en el aire. Cabe mencionar que otra manera de contaminación por radionúclidos en el aire es por medio de la deposición húmeda del elemento en cuestión.

Algunos de los efectos agudos que se ha relacionado con la exposición a la radiactividad a partir de accidentes aseguran que la constante exposición, o una exposición de alta concentración, aún en corto tiempo, puede generar problemas crónicos tales como mutaciones genéticas, cánceres de diferente origen, malformaciones congénitas como hipocefalia, problemas de cataratas, efectos de tipo cardiovascular como infartos y accidentes cardiovasculares, entre otros [26].

En el caso de niños, se ha presentado retardo en el crecimiento, dificultades para concentrarse y/o problemas de aprendizaje. Mientras que, las afectaciones en animales, de acuerdo a un estudio realizado por el Instituto de Investigación del Uso de la Tierra (Instituto MaCaulay), se puede asegurar que el principal factor que afecta el metabolismo de los radionúclidos dentro de un animal es el estado fisiológico [27], el cual puede comprender factores como la edad, la tasa de crecimiento, la gordura, el embarazo y la lactancia, los cuales pueden influir en el metabolismo de forma más limitada. De igual manera, este estudio afirma que el metabolismo también está sujeto a control neuronal y puede verse afectado por las concentraciones de varios metabolitos. Por último, se asegura que la mayor acumulación de radionúclidos en el cuerpo de diferentes animales como las vacas, los toros, los cerdos, entre otros., se absorbe en el hígado y el riñón, seguido por la sangre y la piel [28].

1.3.3.c Impacto de radionúclidos sobre cobertura vegetal. La fijación de los radionúclidos en matrices vegetales se facilita por medio de su incorporación al metabolismo humano, ya sea a través de los animales herbívoros, o a través del consumo directo de vegetales.

En el caso específico del Yodo radiactivo, la acumulación en las plantas puede variar entre el 6 y el 100% del valor del radionúclido depositado en campo abierto, medido por metro cuadrado de superficie ocupada por la vegetación, mientras que la absorción del Yodo radiactivo depositado sobre las hojas de las plantas varía entre 10% y el 40% [25]. Por lo

anterior, y al conocer que una de las matrices más eficaces para determinar la absorción del ^{131}I es el pasto, se ha concluido que la concentración de ^{131}I en la leche es usualmente de alrededor de la décima parte de la del pasto que la vaca consume.

1.4 Aplicaciones de los radioisótopos

En el ámbito industrial, las aplicaciones de las radiaciones tanto gamma, como beta, son muchas y muy variadas, ya que la industria aprovecha la capacidad que tienen la mayoría de radiaciones para atravesar los objetos y materiales, y debido a las cantidades insignificantes de radionúclidos que 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, por ejemplo, la esterilización de materiales, la medición de espesores y densidades, la medición de niveles de llenado de depósitos o envases, la medida del grado de humedad en materiales a granel (arena, cemento, etc.). Por su parte, la gammagrafía o radiografía industrial es empleada en la producción de vidrio y hormigón para verificar las uniones de soldadura en tuberías. Los rayos X son empleados en los detectores de seguridad y vigilancia en aeropuertos y edificios oficiales, entre otros [29].

La medicina nuclear por su parte, aprovecha el hecho de que ciertos radionúclidos emiten radiación (gamma, electrones o positrones) con la energía suficiente para ser detectados fuera del cuerpo. Al unir tales radionúclidos a compuestos biológicamente activos, la actividad se localiza bien sea dentro de los tejidos corporales particulares, o tienen la libertad de seguir una ruta bioquímica específica. Dichos radiotrazadores que se emplean con propósitos de diagnóstico y/o con fines terapéuticos se conocen comúnmente como radiofármacos [18].

Por otro lado, la aplicación de radiotrazadores permite estudiar la velocidad y trayectoria de un elemento dado en una planta, lo cual resulta de gran utilidad para investigar la nutrición vegetal, fertilidad de los suelos y relaciones suelo-agua-planta [18], entre otras aplicaciones relacionadas con aspectos ambientales, industria petrolera, de manufactura, e incluso, investigación científica.

1.5 Radioisótopo de ^{131}I

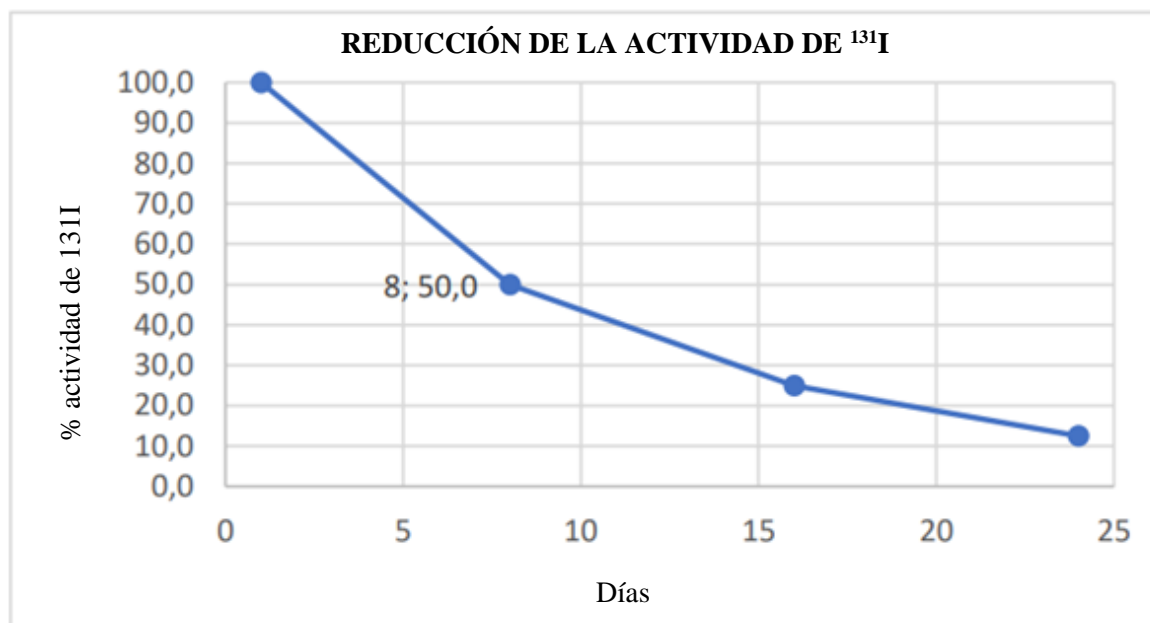
El ^{131}I es un radioisótopo el cual, en su estado puro es un sólido cristalino de aspecto negro violáceo no metálico, que cuenta con 78 neutrones y 53 protones, descubierto por Glenn Seaborg y John Livingood en el año 1938 en la Universidad de California, en Berkeley, E.E.U.U [7]. Este isótopo es difícil de encontrar en su estado puro ya que se une fácilmente a otros elementos, es por esto que generalmente se encuentra como compuesto.

Es bien conocido por causar la muerte de las células, debido a que puede penetrar en otras células hasta varios milímetros de distancia. Por esta razón, el ^{131}I se usa para el tratamiento de la tirotoxicosis (hipertiroidismo) y algunos tipos de cáncer de tiroides que absorben Yodo, así como marcador radiactivo para ciertas terapias radio farmacéuticas.

En conclusión, este radionúclido que se produce comercialmente mediante fisión nuclear es empleado generalmente en usos industriales y médicos para realizar el diagnóstico y tratamiento asociados a la tiroides. También, es un subproducto de los procesos de fisión nuclear en reactores nucleares y pruebas de armas [30]; el ^{131}I tiene una corta vida media (ver Figura 4), debido a que ésta es de 8.02 días, por lo que su desintegración es relativamente rápida en comparación con otros radionúclidos.

Figura 4.

Gráfico de reducción de la radiactividad de ^{131}I



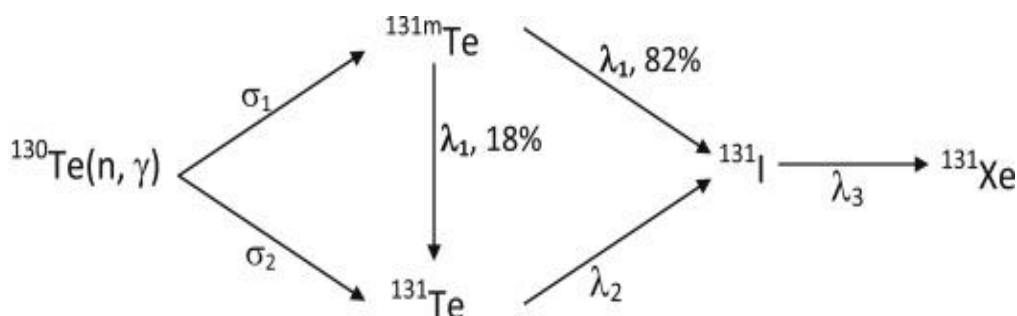
Nota. Diagrama de reducción de radiactividad y vida media del ^{131}I . Tomado de: E. T. Mora Carrillo y C. D. Tello Reino, Propuesta Para La Remoción De ^{131}I A Nivel Generadores Debido A Su Concentración En Los Flujos De La P.T.A.R Del Salitre, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: mar.25,2021]

1.5.1 Formas de obtención

Existen múltiples formas de obtención de ^{131}I las cuales se emplean, principalmente, de acuerdo a la cantidad que se quiera producir, por ejemplo, en algunos países como Estados Unidos, la producción de grandes cantidades de ^{131}I se realiza por fisión de Uranio, esto debido a que este elemento o sus óxidos pueden someterse a elevados flujos instantáneos o integrales sin sufrir alguna transformación química [7], mientras que, para producir pequeñas cantidades, el método más empleado es por utilización de un material de posibilidades limitadas, el cual en la mayoría de los casos hace alusión al uso de Telurio (Ver Figura 5). Lo anterior se debe a que este método permite obtener directamente ^{131}I libre de impurezas isotópicas activas e inactivas, y, por lo tanto, de utilización inmediata [31].

Figura 5.

Proceso de producción de ^{131}I mediante la activación del isótopo ^{130}Te



Nota. La figura ilustra la producción de ^{131}I por activación del isótopo ^{130}Te . Tomado de: A, Fllaoui et al: 2015, Validación de un nuevo diseño de Telurio Blanco irradiado con dióxido [En Línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1738573316300602>. [Acceso: abr.27,2021]

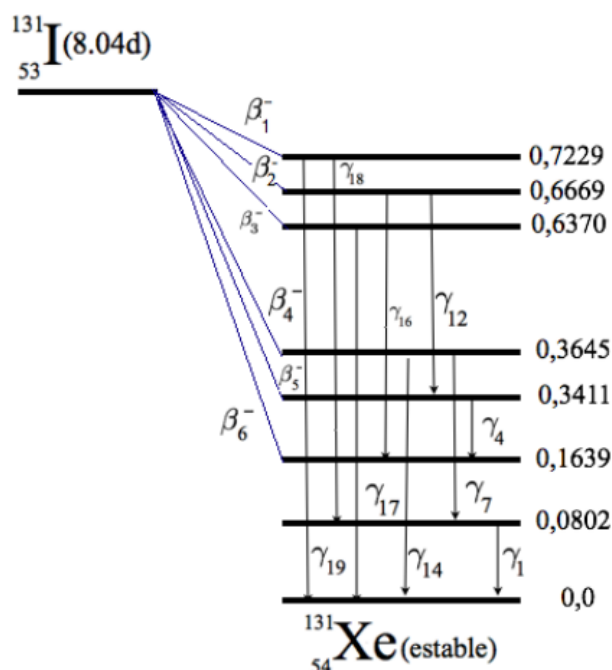
1.5.2 Vida útil

Tomando en cuenta que la vida media efectiva (Te) es el tiempo que le toma a la cantidad de radionúclido depositado en un organismo vivo reducirse en un 50% como resultado de la acción combinada del decaimiento radiactivo y la eliminación biológica [32], y partiendo de que la vida media biológica (Tb) es el tiempo que le toma a un sistema biológico tal como un tejido o a todo cuerpo, eliminar por procesos naturales diferentes del decaimiento radiactivo, el 50% de la cantidad de radionúclido que ha entrado en él, es posible afirmar que específicamente, el ^{131}I tiene un periodo de semidesintegración de 8.04 días [32].

Tomando en cuenta que la radiación principal que emite es gamma con 364 keV (81 %) y beta con 606 keV (energía máxima), y que es un producto de fisión nuclear que presenta alta volatilidad en temperatura ambiente, se considera que la forma química del Yodo que es suministrado en centros de medicina nuclear es en $^{131}\text{I}^-\text{Na}^+$, el cual contiene agentes reductores tales como tiosulfatos y agentes alcalinizantes como carbonato o bicarbonato, que se distribuye bajo la presentación de cápsulas y/o solución. Para evidenciar lo anteriormente mencionado, en la Figura 6 se ilustra el esquema de decaimiento del ^{131}I y las energías asociadas a este esquema [32].

Figura 6.

Esquema de decaimiento del ^{131}I



Nota. Esta figura ilustra el decaimiento de ^{131}I medido en el tiempo. Tomado de: E. Rodríguez Carrascal, *Análisis de la influencia de parámetros radiológicos relacionados con la exposición interna de los trabajadores de medicina nuclear con ^{131}I* , tesis de maestría. Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina, 2009. [en línea]. Disponible en: http://ricabib.cab.cnea.gov.ar/142/1/1Rodriguez_Carrasca1.pdf. [Acceso: abr.30,2021]

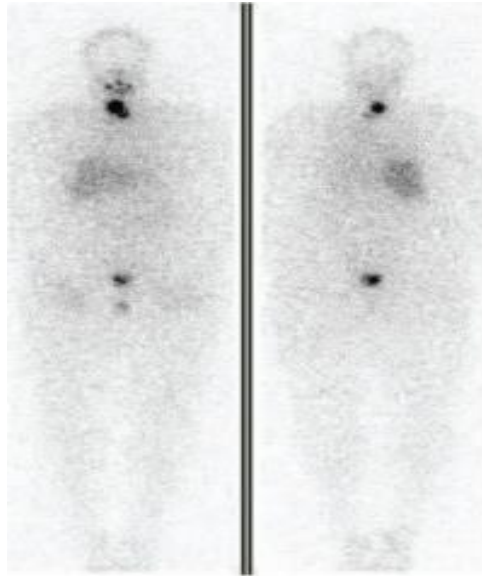
1.5.3 Aplicación en medicina

Los tratamientos aplicados a pacientes con patologías relacionadas con la glándula tiroides se basan generalmente en que el paciente tome una cápsula que contenga una dosis específica de ^{131}I , esta cápsula entra en su corriente sanguínea muy rápidamente luego de ser ingerida, posteriormente, el ^{131}I va a su tiroides y a cualquier sitio del cáncer tiroideo, donde será absorbido. La mayoría de lo que su tejido tiroideo no absorba se eliminará del cuerpo por medio de la orina y/o excretas durante las próximas 24 h a 48 h. El Yodo absorbido por la tiroides o el cáncer tiroideo permanecerá en su cuerpo durante un largo tiempo. El ^{131}I en el tejido tiroideo emitirá partículas betas, las cuales irán a su tejido tiroideo – más específicamente a los sitios donde se acentúe el cáncer. Estas partículas dañan el tejido y este daño causará que su tiroides

y cualquier cáncer tiroideo mueran con el tiempo, por lo que toma algunos meses hasta que este tratamiento tenga su efecto completo [16]. En la Figura 7 es posible observar las áreas oscuras donde el ^{131}I es mayormente absorbido por el cuerpo humano.

Figura 7.

Absorción de ^{131}I en el cuerpo humano



Nota. Esta imagen muestra las áreas oscuras en las que ocurre la absorción del ^{131}I en el cuerpo humano. Tomado de: L. C. Alba Martínez, *Medición De Límites De Descarga Para Vertimientos Generados En Medicina Nuclear*, tesis pre. Facultad de Ciencias, Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia (UPTC), Tunja, Colombia, 2015. [en línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/1502/1/TGT-247.pdf>. [Acceso: abr.24,2021]

Por otro lado, la dosis de radiactividad impartida por el ^{131}I en el tejido tiroideo depende directamente de la emisión de rayos beta, de la captación que exista en el tejido o tumor, y de su período efectivo en el mismo. Mientras que, la irradiación a otros tejidos está relacionada directamente con los rayos gamma y beta emitidos por este radionúclido, y concentrados localmente en zonas como la vejiga, estómago, glándulas salivales y colón , es decir, la dosis

de radiación en los distintos órganos depende directamente de: el radio Yodo circulante no concentrado en la tiroides o tumor, de la concentración local, 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 [7]. La dosis de ^{131}I suministrada a pacientes con diferentes patologías relacionadas con la tiroides, se presenta a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5.

Dosis de ^{131}I administrada a pacientes

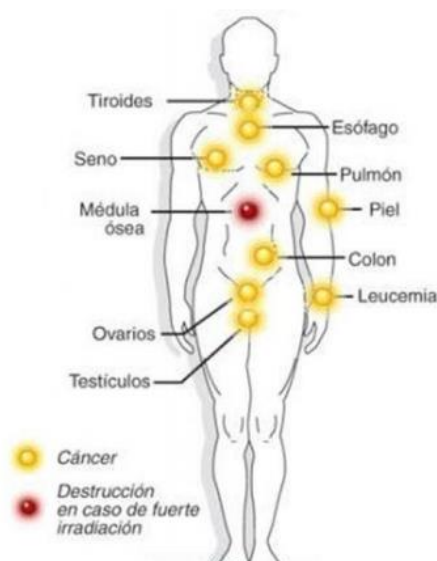
Tratamiento	Dosis en mCi	Dosis en Bq
Hipertiroidismo	15 a 30	555.000.000 a 1.110.000.000
Cáncer de tiroides	100 a 300	3.700.000.000 a 11.100.000.000

Nota. Esta tabla muestra las diferentes dosis de administración de ^{131}I a pacientes. Tomado de: E. T. Mora Carrillo y C.D. Tello Reino, Propuesta Para La Remoción De ^{131}I A Nivel Generadores Debido A Su Concentración En Los Flujos De La P.T.A.R Del Salitre, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: may.02,2021]

Estudios han estimado la dosis de radiación de ^{131}I recibida en varios órganos del cuerpo humano, como, por ejemplo, en la médula ósea, en las mamas y en las gónadas, permitiendo comprobar cómo esta radiación incrementa a medida que aumenta la captación del tumor. Esto se debe a que la principal fuente de radiación de estos órganos es la liberación de compuestos orgánicos del ^{131}I ; mientras que, la radiación recibida en vejiga, estómago y glándulas salivales es generalmente 10 veces más elevada que en otros órganos [33][7], como se muestra a continuación.

Figura 8.

Impacto de las radiaciones en el cuerpo humano



Nota. Esta figura ilustra el impacto de las radiaciones en las partes del cuerpo humano Tomado de: E.T. Mora C., C. D. Tello R: 2020, Propuesta para la remoción de ^{131}I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R Salitre [En Línea]. Disponible en:

<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: may.03,2021]

En los adultos las dosis terapéuticas estas pueden ser tanto adaptada individualmente según un estudio previo realizada para definir la traza del ^{131}I , esta actividad será administrada por vía intravenosa y con unos intervalos que serán determinados principalmente por la radiotoxicidad hematológica y la tipología del tumor a tratar, por su parte la dosis terapéutica “fija” podrá variar desde los 3,7 hasta los 7,4 GBq mediante perfusión intravenosa [34].

1.5.4 Impacto ambiental del ^{131}I

El ^{131}I , al ser el radionúclido que más se vierte al medio ambiente, causa generalmente ciertos daños relacionados con la contaminación ambiental. Sin embargo, éste al tener un período de

semidesintegración de 8 días, se puede detectar en pequeñas cantidades en matrices vegetales y de producto de origen animal, después de su uso médico. En contraste, debido al alto número de pacientes tratados con éste, se hace cada vez más complejo controlar el tiempo de vida media del isótopo en tanques de decaimiento, lo que tiene como consecuencia la acumulación del isótopo en las aguas contenidas -en este caso- en el río Bogotá. En algunos países es obligatorio almacenar a corto plazo los residuos hospitalarios -generalmente solo orina, sino también las excretas- que contengan radionúclidos de los pacientes terapéuticos hospitalizados, hasta que la actividad haya decaído hasta un determinado nivel. No obstante, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (I.C.R.P), no pide específicamente que se adopte esta medida [29].

1.6 Radioisótopo de ^{40}K

El ^{40}K es un isótopo radiactivo natural de Potasio, con número atómico 19 y peso atómico 39. Comprende una fracción muy pequeña (aproximadamente 0,012%) de Potasio natural [35]. Los rastros de éste se encuentran en todo el Potasio, lo cual lo hace ser una de las fuentes más importantes de irradiación, ya que está presente en la mayoría de alimentos y en el agua, de modo que, es uno de los radionúclidos con mayor presencia en la Tierra, y con mayor acumulación en el cuerpo humano. A su vez, este radioisótopo natural es considerado uno de los isótopos radiactivos con vida media más larga [36] (Ver Tabla 6).

Este radionúclido es el radioisótopo secundario de estudio en el presente proyecto, luego del ^{131}I . Esta importancia se le atribuye al ser el isótopo radiactivo más abundante en la Tierra con mayor tiempo de decaimiento y de mayor necesidad para el desarrollo óptimo del ser humano y de la Tierra, esta última se le apropia debido a que ayuda a sustentar los procesos biológicos en los humanos [35], mientras contribuye al calor de la Tierra gracias a su desempeño en la producción de la radiactividad natural de las rocas [37]. Adicional a lo anterior, su concentración en muestras ambientales puede ser un indicador de la radiación a largo plazo de este elemento debido a su alta solubilidad y facilidad de transferencia [35].

Tabla 6.*Generalidades del radionúclido ^{40}K*

Isótopo	Vida Media (años)	Abundancia Natural (%)	Actividad Específica (Ci/g)	Modo de decaimiento	Energía de radiación (MeV)		
					Alfa (α)	Beta (β)	Gamma (γ)
^{40}K	1.3 billones	0.012	0.0000071	β , EC	-	0.52	0.16

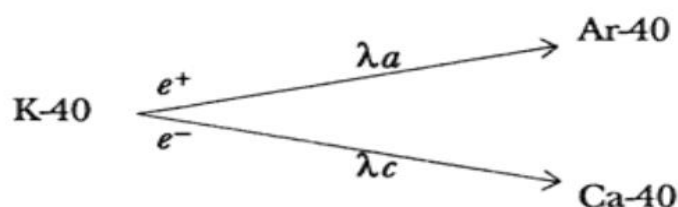
Nota. Esta tabla ilustra las propiedades del radioisótopo ^{40}K . Tomado de: Human Health Fact Sheet (ANL): 2001, ^{40}K [En Línea]. Disponible en: <http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/potassium.pdf>. [Acceso: nov.09,2021].

1.6.1 Tiempo de vida media del ^{40}K

Para explicar el tiempo de decaimiento del ^{40}K , se ha implementado el llamado “reloj de Potasio-Argón”, el cual se basa en el decaimiento del ^{40}K en el elemento estable ^{40}Ar . De manera que puede observarse que el ^{40}K no sólo decae hacia este último elemento sino también hacia el ^{40}Ca [38], tal y como se ilustra a continuación.

Figura 9.

Decaimiento del ^{40}K en el elemento estable Argón 40 y Calcio 40

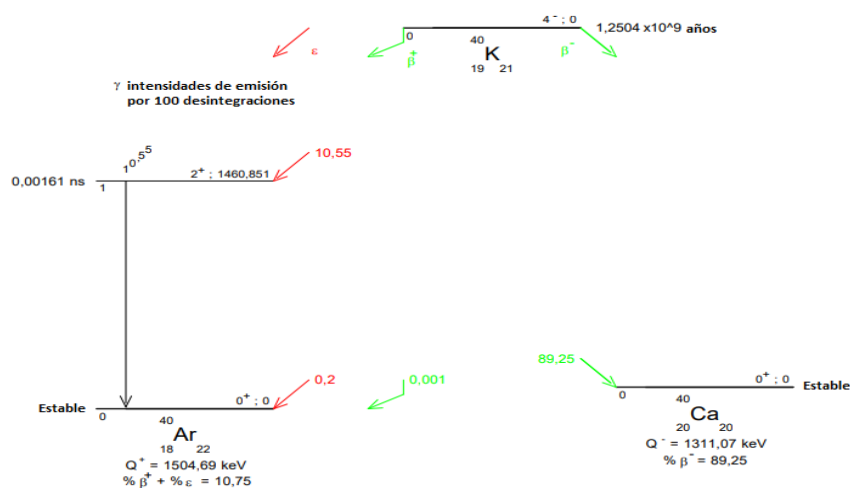


Nota. Esta figura ilustra el reloj de Potasio-Argón en el cual se observan las formas de descomposición del ^{40}K . Tomado de: J. M. Espíndola: 1989, Los Relojes Geológicos Radiactivos [En Línea]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/074/html/eltercer.html>. [Acceso: nov.09,2021]

Como se mencionó anteriormente, el ^{40}K tiene la característica inusual de descomponerse en dos núcleos diferentes, se desintegra por emisión β^- al nivel fundamental de ^{40}Ca para un porcentaje del 89.25% de los casos, mientras que, por captura de electrones continuada por emisión gamma, se descompone en ^{40}Ar , al nivel de 1460 keV para un porcentaje del 10.55% de los casos. Al nivel de estado fundamental del ^{40}Ar para 0.2%. Mientras que por β^+ , para 0.00100%, como se ilustra en la Figura 10.

Figura 10.

Esquema de decaimiento del ^{40}K



Nota. Esta figura ilustra el esquema de descomposición del ^{40}K . Tomado de: X. Mougeot, G. Helmer: 1998, 40K- Comments on evaluation of decay data [En Línea]. Disponible en: http://www.nucleide.org/DDEP_WG/Nuclides/K-40_com.pdf. [Acceso: nov.05,2021]

1.6.2 Isótopos del Potasio

El Potasio presenta 24 isótopos, todos radiactivos excepto el ^{39}K y el ^{41}K , los cuales son los únicos estables. Entre el más importante y abundante se destaca el ^{40}K . Si bien de este último no existen usos comerciales o médicos específicos, es actualmente el isótopo más abundante en toda la corteza [39].

1.6.3 ^{40}K en el medio ambiente

Debido a que el ^{40}K representa 0.012% del Potasio natural, su concentración en la corteza terrestre es de aproximadamente 1.8 mg / kg, o 13 pCi/g. El Potasio es un importante fertilizante del suelo, por lo que los niveles de ^{40}K en el suelo están influenciados por el uso de fertilizantes,

de esta manera se estima que anualmente se agregan alrededor de 3000 Ci de ^{40}K a los suelos de los Estados Unidos [35].

El ^{40}K se comporta en el medio ambiente al igual que otros isótopos de Potasio, siendo asimilado en los tejidos de todas las plantas y animales a través de procesos biológicos normales [36], lo cual lo hace ser el componente radiactivo predominante en los tejidos humanos y en la mayoría de los alimentos.

1.7 Técnicas de muestreo a utilizar en matrices vegetales

Los métodos de muestreo generalmente utilizados para la toma de muestras de matrices vegetales son dos, *el muestreo probabilístico* y *el muestreo no probabilístico*, o también llamado "*muestreo por juicio o intencional*". El principio del primero se basa en la toma de muestras de manera subjetiva, mientras que el segundo se fundamenta en que cada muestra debe tener una probabilidad conocida. En este último, las muestras son seleccionadas de manera aleatoria para asegurar representatividad [40]. Éste último es utilizado para identificar fuentes y amenazas de contaminantes, para establecer monitoreos y realizar pruebas de campo en general.

1.7.1 Muestreo no probabilístico

Éste se basa en la toma de muestras de manera subjetiva, es decir, basándose en información histórica, inspecciones visuales, objetivos de muestreo y juicio profesional del equipo de muestreo [41].

Este tipo de muestreo se utiliza para analizar zonas con estudios preliminares para determinar áreas contaminadas relacionadas con salidas de tuberías correspondientes a alcantarillado, o descargas, generalmente, de plantas de tratamiento de aguas, y así, establecer el riesgo que genera dicha presencia del contaminante sobre humanos y medio ambiente. De igual manera, se puede realizar partiendo de inspecciones visuales efectuadas por el equipo profesional de muestreo, quienes deberán tener en cuenta parámetros importantes para establecer la zona como lo son las distancias entre el sitio de muestreo y el sitio generador del residuo contaminante, tipo de cultivos, proximidad entre el cultivo y la matriz transportadora del contaminante, entre otros [41].

1.7.2 Muestreo probabilístico

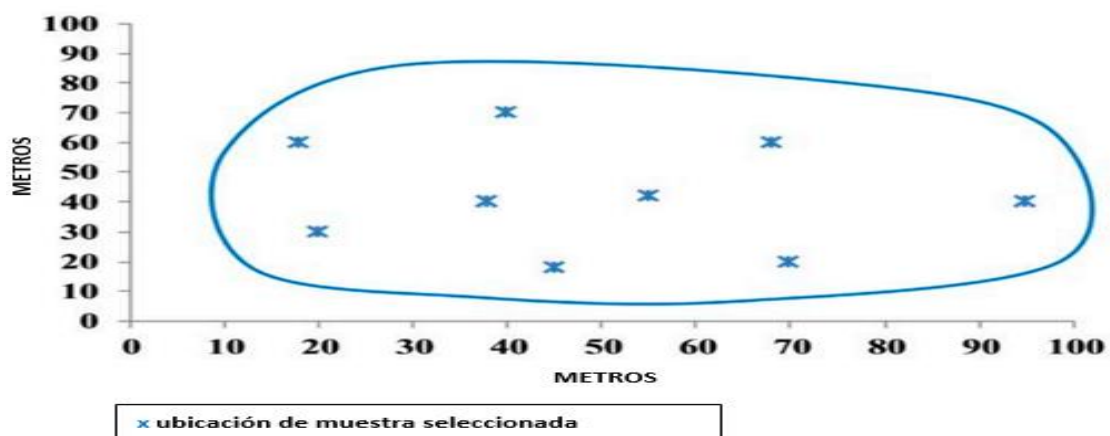
Como se explicó anteriormente, el muestreo probabilístico permite establecer un criterio aleatorio de las muestras el cual representa confiabilidad y representatividad estadísticas de las mismas. De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, E.P.A, un plan de muestreo representativo puede combinar dos o más de estas estrategias probabilísticas de muestreo según el tipo y la distribución del contaminante [40].

1.7.3 Muestreo aleatorio simple

Es la recolección arbitraria de muestras dentro de límites definidos del área de interés [41]. Este tipo de muestreo aleatorio es adecuado para áreas donde se espera una distribución homogénea de los parámetros a monitorear [40]. Para llevarlo a cabo, se debe elegir la ubicación de muestreo dentro del área de estudio, por medio de un proceso de selección aleatoria, la cual garantiza una selección independiente de los puntos de muestreo, de modo que todas las ubicaciones dentro del área de interés tendrán las mismas posibilidades de ser muestreadas. Esta aleatorización, es necesaria para hacer declaraciones de probabilidad o confianza sobre los resultados obtenidos. A continuación, se ilustra gráficamente el enfoque del muestreo aleatorio simple.

Figura 11.

Gráfica del enfoque del muestreo aleatorio simple



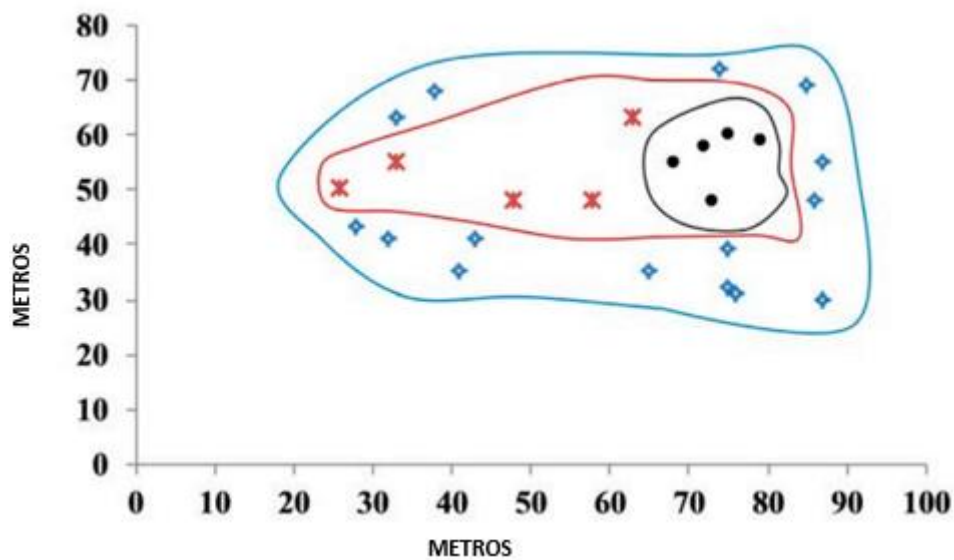
Nota. Esta figura muestra los límites definidos del área a investigar haciendo uso del muestreo aleatorio simple. Tomado de: Organismo Internacional de Energía Atómica (A.I.E.A): 2019, directrices sobre muestreo de suelo y vegetación para el monitoreo radiológico [En Línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/12219/guidelines-on-soil-and-vegetation-sampling-for-radiological-monitoring>. [Acceso: mar.17,2021]

1.7.4 Muestreo estratificado

Este muestreo requiere subdividir la población en grupos o estratos en los cuales se espera que sea más homogéneo que la población total. Si las proporciones de estrato se especifican incorrectamente, esto puede conducir a resultados sesgados en las estimaciones de las cantidades de población [40]. A continuación, se ilustra gráficamente el enfoque del muestreo estratificado.

Figura 12.

Gráfica del enfoque del muestreo estratificado



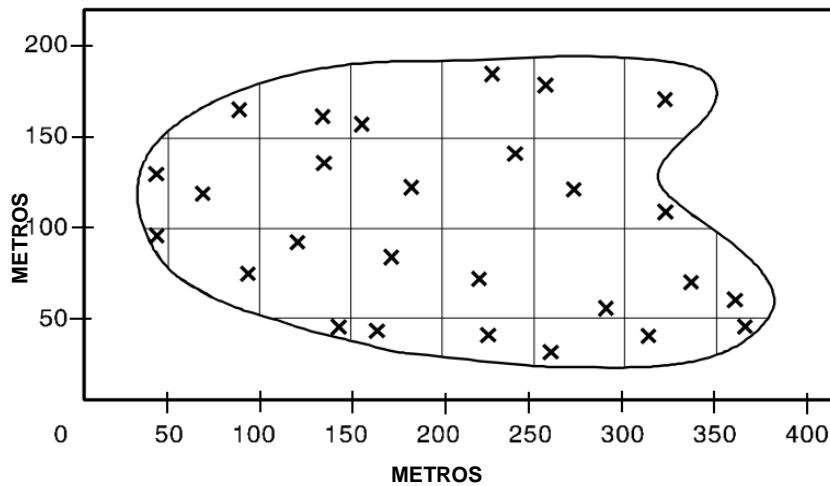
Nota. Esta figura muestra límites definidos de los estratos del área a investigar haciendo uso del muestreo estratificado. Tomado de: Organismo Internacional de Energía Atómica (A.I.E.A): 2019, directrices sobre muestreo de suelo y vegetación para el monitoreo radiológico [En Línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/publications/12219/guidelines-on-soil-and-vegetation-sampling-for-radiological-monitoring>. [Acceso: mar.17,2021]

1.7.5 Muestreo aleatorio sistemático

Este diseño es eficaz para estimar la concentración promedio del contaminante estudiado, dentro de las celdas de la cuadrícula. Para ello, se debe dividir el área usando una cuadrícula cuadrada o triangular, y luego las muestras se recolectan en ubicaciones aleatorias dentro de cada celda usando los mismos procedimientos que el muestreo aleatorio simple [41]. A continuación, se ilustra gráficamente el enfoque del muestreo aleatorio sistemático.

Figura 13.

Gráfica del enfoque del muestreo aleatorio sistemático



Nota. Esta figura ilustra un enfoque de muestreo aleatorio sistemático. Tomado de: Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (E.P.A): 1995, Orientación De Muestreo Del Representante Del Programa Superfondo [En Línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/superfund-samp.pdf>. [Acceso: mar.18,2021]

1.8 Técnicas de muestreo a utilizar en matrices de productos animales

El muestreo de productos animales, es utilizado como indicador de actividad de radioisótopos sobre zonas de contaminación, adicional a ello, aporta al estudio de la afectación de la cadena alimentaria humana. En esta sección, se especifican las técnicas y procedimientos de muestreo de las matrices de producto animal evaluada con el fin de identificar la presencia o ausencia de ^{131}I en las mismas. Por lo anterior, se afirma que el cuidado que se tenga en la toma de muestras, determinará considerablemente la validez de los resultados.

1.8.1 Muestreo individual

Se recomienda usar cuando el caudal del agua por el que se transporta el radionúclido para ser consumido por el animal, no es uniforme, cuando los valores de los parámetros de radiactivos de interés no son constantes [42]. De igual manera, su objetivo principal es buscar una posible contaminación en la matriz estudiada [41].

1.8.2 Muestreo compuesto

Son útiles para medir la composición media de la nueva muestra combinando alícuotas de muestras individuales para su formación. Generalmente se utiliza cuando existen parámetros de interés que no varían durante el tiempo de muestreo [2].

1.8.3 Muestreo integrado

Es empleado en corrientes acuáticas en las cuales se espera que la composición no varíe a lo ancho y profundo del cauce. Para ello, se requiere usar una mezcla de muestras las cuales deben representar varios puntos de la sección transversal en relación con los flujos relativos [2]. Otra forma de emplear este tipo de muestreo es en un tratamiento combinado para varios efluentes residuales separados, cuya interacción puede tener un efecto significativo en la composición [18].

1.9 Normas para el manejo y análisis

1.9.1 ISO 18400 del 2017

1.9.1.a Parte 101: Marco para la preparación y aplicación de un plan de muestreo. Especifica los elementos de procedimiento que deben tenerse en cuenta en la preparación y aplicación de un plan de muestreo. El plan de muestreo describe, entre otras cosas, qué muestras se tomarán para ser analizadas en el laboratorio, cómo se tomarán y de dónde se tomarán, a fin de que se puedan lograr los objetivos del programa de investigación. Los principios o reglas básicas descritos en esta norma proporcionan, además, un marco que se puede utilizar para incorporar los requisitos específicos de la legislación nacional, y diseñar y desarrollar un plan de muestreo. Adicionalmente, esta norma abarca el ámbito del proyecto ya que es aplicable al muestreo de suelo y material del suelo, más específicamente, para suelos agrícolas [43].

1.9.1.b Parte 103: Seguridad. Establece los peligros que se pueden encontrar durante la investigación del sitio y al recolectar muestras de suelo y otros materiales del suelo, incluidos los peligros que son intrínsecos en la operación de muestreo (por ejemplo, peligros físicos) además de los peligros que pueden surgir, por ejemplo, de la contaminación con productos químicos o agentes biológicos [44].

1.9.2 ISO 18589 del 2007

1.9.2.a Parte 2: Orientación para la selección de la estrategia de muestreo, muestreo y pretratamiento de muestras. Establece la planificación (estudio teórico y reconocimiento del área), del muestreo y la preparación de muestras para las pruebas. Incluyendo la selección de la estrategia de muestreo, el esquema del plan de muestreo, la presentación de métodos y equipos generales de muestreo, así como la metodología del pretratamiento de muestras adaptada a las mediciones de la actividad de radionúclidos en suelo [45].

1.9.3 Resolución 41178 del 2 de diciembre de 2016

Esta resolución 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), haciendo referencia a los niveles de dispensa para los vertidos en forma líquida a alcantarillas, ríos y otras grandes masas de agua [46].

1.9.4 NTC 399

Esta Norma Técnica Colombiana establece los criterios para el muestreo de leche cruda, así como los requisitos que debe cumplir la muestra sin ser sometida a ningún tipo de calentamiento para que sea admitida como una muestra libre de contaminación. En ella, se encuentran las características fisicoquímicas que deben tener las muestras, las técnicas para desarrollar el muestreo y los criterios de aceptación o rechazo de la muestra, así como los ensayos de laboratorio para analizar las mismas [47].

1.9.5 NTC 666

Esta Norma Técnica Colombiana establece los métodos de muestreo de leche y productos lácteos para análisis microbiológicos, químicos, físicos y sensoriales. Ésta especifica los equipos de muestreo que se deben emplear durante la recolección de las mismas, los recipientes más viables para almacenar y/o transportar las muestras, especifica los métodos más viables para la preservación de las muestras, así como las técnicas de muestreo, y, formas de almacenamiento y transporte [48].

1.9.6 Manual de buenas prácticas en el manejo de la leche

En este documento publicado por la F.A.O se indica el procedimiento adecuado para llevar a cabo el ordeño de los bovinos sin generar afectaciones a los mimos y obtener el fluido de forma limpia, segura y sin contraindicaciones [49].

2. REVISIÓN DE INFORMACIÓN RELACIONADA CON LOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN DE ^{131}I EN AGUAS CON VERTIENTES A LA P.T.A.R EL SALITRE Y A LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ

Teniendo en cuenta que todo proyecto debe encontrarse sustentado en estudios o investigaciones previas sobre las cuales se va a basar y va a sustentar la importancia de lo que se pretende hacer, con el fin de darle no solo validez sino también una orientación a su planteamiento, se deben encontrar antecedentes de peso que aporten valor e información relevante a la investigación y lleguen a proporcionar un norte sobre lo que se podría llegar a encontrar dentro de la misma. Por lo anterior, y en cumplimiento al objetivo 1 de este trabajo, en este capítulo se procede a dar a conocer al lector los estudios previos relacionados con las generalidades del río Bogotá como lo son sus características, las afectaciones que se pueden presentar dentro de este por la presencia de elementos radiactivos como el ^{131}I , y, se habla a groso modo, de la importancia que aportan proyectos de tesis previos al presente, los cuales han sido desarrollados de la mano por las mismas instituciones que respaldan al presente.

2.1 Generalidades del río Bogotá: extensión, área, sistemas de redes, características principales, contaminación y descontaminación

El río Bogotá se encuentra ubicado en el altiplano Cundiboyacense, de noreste a sureste del departamento de Cundinamarca. Éste nace en el municipio de Villapinzón a una altura de 3.300 msnm, en cercanías al Páramo de Guacheneque, con desembocadura en el municipio de Girardot a una altura de 280 msnm en el Río Magdalena. De esta manera, este afluente hídrico consta aproximadamente de 589.143 hectáreas de área de influencia [50].

En la actualidad, a pesar de no contar con un caudal apto para navegación, esta fuente hídrica es de suma importancia para el país ya que con su producto se llevan a cabo actividades de orden económico equivalentes al 26% del total nacional. Dentro de estas actividades se encuentra principalmente la producción agrícola, pecuaria e industrial [50].

En cuanto a su configuración, éste está compuesto por tres tramos: Alta, media y baja, las cuales atraviesan un total de 47 municipios del departamento de Cundinamarca (Ver Figura 14). Por su parte, la cuenca alta inicia desde su punto de origen, hasta el norte de la zona urbana del distrito de la capital, y cuenta con una longitud de 165 Km aproximadamente. En cuanto a la

zona de interés para este estudio, es decir, la cuenca media del Río Bogotá, se sabe que posee una longitud de 90 Km aproximadamente, y que tiene su origen desde el inicio de la zona urbana de Bogotá, hasta el Salto del Tequendama. Finalmente, la cuenca baja parte desde el Salto del Tequendama hasta su desembocadura en el Río Magdalena, cubriendo una longitud aproximada de 55 Km [50].

Figura 14.

Localización del Río Bogotá



Nota. La figura anterior señala cómo se encuentra ubicada la cuenca del río Bogotá en el departamento y en el país. Tomado de: C.A.R. de Cundinamarca, P.E. LTDA., and E. LTDA.: 2006, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá (POMCA). [en línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>. [Acceso: oct.15,2021]

2.1.1 Sistema de redes asociados al Río Bogotá

El sistema de redes asociado al río Bogotá se encuentra compuesto principalmente por una red natural conformada por quebradas, lagunas, ríos y humedales, de los cuales, en la mayoría de los casos, proporcionan de manera directa agua a la cuenca, ya sea en su parte alta, media o

baja. Adicionalmente, este sistema cuenta con nueve embalses y un distrito de riego ubicado en “La Ramada”, sin contar con las obras construidas con el fin de satisfacer las necesidades del servicio de agua potable. Cabe resaltar que a lo largo de su longitud, el río atraviesa no solo diversos paisajes, sino también diversas condiciones topográficas y climatológicas propias de la zona tropical andina [51].

2.1.2 Características principales de la Cuenca del Río Bogotá

Como características principales de la Cuenca del Río Bogotá deben señalarse, que en ella, habitan cerca del 20% de la población del país, teniendo en cuenta al Distrito Capital; además, genera el 28% de la actividad económica nacional [51]. Esta alta ocupación y actividad hacen que cerca de $\frac{3}{4}$ (tres cuartas) partes de la extensión de la Cuenca del Río Bogotá presente conflictos en los usos del suelo y el agua, los cuales pueden estar relacionados con la incompatibilidad entre la aptitud natural de los suelos, el uso actual y la disponibilidad del agua en carácter de calidad [51].

Por otra parte, el aumento de población en la Sabana de Bogotá durante los últimos 50 años ha generado un crecimiento en la demanda del recurso hídrico para el consumo humano, actividades de riego y generación eléctrica e industrial. Para satisfacer esta creciente demanda se han construido sistemas de regulación de caudales y trasvase de agua proveniente de la Cuenca del Río Guatiquía (hoya hidrográfica del Río Orinoco), mediante el proyecto Chingaza, el cual busca dar soluciones frente a la insuficiencia de los recursos de la Sabana de Bogotá para suplir la demanda [51].

Por su parte, el Embalse del Chuza regula las aguas del páramo de Chingaza, con destino al acueducto de Bogotá, y lo complementa el Embalse de San Rafael, el cual fue construido en la cuenca del Río Teusacá, con el fin de cubrir posibles contingencias que presente el sistema de túneles. Este también transporta el agua de Chuza a la planta de Wiesner [51].

En cuanto a los Embalses del Sisga, Neusa y Tominé, ubicados al norte de la Sabana de Bogotá, se les atribuye la importancia de que tienen por objeto regular las aguas de la parte Alta de la Cuenca del Río Bogotá, con el objetivo principal de garantizar el suministro de agua al acueducto de Bogotá, y con el objetivo secundario de generar energía eléctrica [52]. Al suroriente de la misma cuenca se localizan los Embalses La Regadera, Chisacá y Los Tunjos, los cuales son los encargados de regular la parte alta del Río Tunjuelo, y, utilizados básicamente

para satisfacer el consumo doméstico del suroriente de la ciudad [52]. Adicionalmente, en la Cuenca Baja del Río Bogotá como un uso complementario del recurso hídrico y aprovechando la caída del Salto del Tequendama, de cerca de 2.100 m de altura, la Empresa de Energía de Bogotá construyó dos cadenas hidroeléctricas, hoy en día operadas por la empresa EMGESA S.A. E.SP [52]. La cadena 1 está compuesta por cinco centrales en serie con una capacidad de 550 Megavatios. Ésta toma las aguas directamente del Río Bogotá y genera energía eléctrica por las plantas Canoas, Salto I, Salto II, Laguneta y Darío Valencia. En cuanto a la cadena 2, está compuesta por dos centrales con capacidad de 600 Megavatios. Esta se inicia con el bombeo de agua del Río Bogotá al Embalse del Muña en Alicachín y de allí se descarga por tubería hasta las plantas de El Paraíso y La Guaca, localizados en el municipio del El Colegio. La descarga de estas cadenas hidroeléctricas se realiza sobre el Río Bogotá en el sector de Puente La Guaca donde se encuentran localizados puntos de monitoreo de calidad del agua [52].

En la actualidad, las principales problemáticas que aquejan al Río Bogotá son la tala de árboles, la captación de agua de manera ilegal, el depósito de residuos domésticos e industriales tanto en la ronda del río como en las zonas cercanas a esta. Adicional a lo anterior, esta fuente hídrica es susceptible a situaciones adversas como lo son la disposición de los residuos industriales contaminados con metales pesados y la falta de manejo eficiente y responsable de las aguas del mismo. Lo anterior que hace que se convierta en un referente de contaminación no solo a nivel nacional sino mundial [52].

2.1.3 Causas de la contaminación en el río Bogotá

La contaminación del río se debe principalmente a los vertimientos industriales de las curtiembres producidas en el sector de Villapinzón, las cuales se localizan a aproximadamente 5 km del nacimiento del río. Además, no cuenta con plantas de tratamiento que realicen los debidos procesos al agua doméstica, lo que genera alrededor del 80% de la contaminación en el afluente hídrico, dejándole el 20% de la contaminación a actividades industriales, de minería y a los escombros [53].

A su vez, éste cuenta con tres vertimientos asociados, los cuales son el Salitre, Fucha y Tunjuelo, manejando un nivel de contaminación 4 al entrar a Bogotá, y al recibir la primera descarga en el Salitre sobre la calle 80, este valor del nivel de contaminación aumenta preocupantemente a 8 y se mantiene constante durante todo el recorrido [53]. Cabe resaltar

que a tan solo unos pocos kilómetros del nacimiento se da abastecimiento a 26 acueductos comunitarios, de los cuales solo 1 requiere de procesos de purificación para contar con una calidad óptima del agua [53].

Debido a todo lo anterior, en la actualidad, se trabaja en diversas obras para mejorar la calidad del agua que circula por el río Bogotá. Dentro de estas mejoras se encuentra la adecuación hidráulica del río en tres tramos, la ampliación de la P.T.A.R del Salitre y la adquisición de 60 predios con el fin de devolverle al río las zonas de amortiguación y descanso para poder llegar a una inundación controlada que facilite una mayor seguridad en las obras de adecuación hidráulica. Lo anterior consiste en mejorar la capacidad de transporte hidráulico, lo cual se logra ampliando el cauce [54]. A la fecha, se ha logrado duplicar la capacidad del cauce del afluente, pasando de 100 m³ a 200 m³ por segundo, lo cual reduce el riesgo de inundaciones. A su vez, se han implementado jarillones, los cuales se encuentran sobre la ronda del río y permiten duplicar la capacidad hidráulica del afluente, pasando de 30 m a 60 m de ancho en su cauce [54].

2.1.4 Descontaminación del río Bogotá

El Río Bogotá al ser un cuerpo de agua tan importante para el país, su cuidado debe ser una tarea de corresponsabilidad entre las instituciones, organizaciones y la ciudadanía. Por lo anterior, es fundamental generar conciencia colectiva para la recuperación del mismo, abordando experiencias y procesos que se lleven a cabo con el fin de recuperar la calidad del afluente hídrico no solo desde la ciudad, sino también desde los distintos territorios por los que atraviesa [54].

Estos cambios abarcan desde los hábitos diarios, hasta la separación de basuras, el ahorro de agua y el cambio en el tipo de detergentes que usa la comunidad. Esto es porque todo lo anterior afecta al recurso hídrico de forma negativa. Cabe resaltar que, parte importante de esta restauración también ha sido la siembra de al redor de 260.000 árboles y la realización de procesos comunitarios y educativos en torno al cuidado [54].

De igual manera, se instauró un plan de desarrollo distrital el cual se tiene previsto que se desarrolle desde el año 2020 al 2024, y tiene como finalidad además cuidar el río, mejorar la calidad en la prestación de servicios públicos y el sistema hídrico de la ciudad. Para ello, se creó un plan de trabajo conjunto con diversas entidades, con el fin de desarrollar el Plan de

Saneamiento y Manejo Básico de Vertimientos, en el cual se trata la continuidad del proceso de monitoreo, control, eliminación de las conexiones erradas, evaluación y seguimiento ambiental del recurso hídrico [55].

2.2 Estudio y aporte del proyecto de grado “Propuesta de un plan de muestro y detección de radioisótopos para el establecimiento en zonas con actividad de ^{131}I en la red de sistema de alcantarillado de aguas sanitarias con descargas a la cuenca el salitre en Bogotá”

De la revisión bibliográfica realizada al proyecto de grado desarrollado en el año 2021, por la Ingeniera Daniela Rodríguez y el Ingeniero Sebastián Mateus, se encontró que los investigadores desarrollaron una campaña de muestreo de aguas contenidas en el alcantarillado por el cual estaría transitando el agua contaminada por ^{131}I proveniente de centros hospitalarios con autorización para realizar tratamientos con radioyodo. Esta campaña constó de 13 puntos, de los cuales, los investigadores tomaron un total de 39 muestras, las cuales analizaron en los laboratorios de las instalaciones del S.G.C., lo cual les permitió determinar que en 11 de estos puntos existía presencia de ^{131}I (Ver Tabla 7), con valores que superaban los permitidos por la Norma de Vertimientos Colombiana para Alcantarillados.

Tabla 7.

Dosis media que afecta a la población en cada pozo

Ubicación del Pozo	Dosis Media [Bq/L]
DG 40A # 7 – 01	841,36
DG 115A # 70B – 86	264,24
CL 5 # 21 – 88	48,11
CL 49A # 28 BIS – 11	11,58
CL 114 # 21 – 01	8,08
CL 165 # 14D – 03	4,17
CL 78B # 119 – 02	3,50
CL 90 # 64 – 08	3,03
CL 108 # 48 – 65	2,74
CL 139 BIS # 126C – 03	2,03
DG 61D 28 – 99	1.10

Nota. La tabla que se presentó anteriormente corresponde a los valores medios encontrados de ^{131}I ordenados de forma descendiente según su afectación a la población. Tomado de: S. Mateus C. y D. F. Rodríguez V.: 2021, Propuesta de un plan de muestreo y detección de radioisótopos para el establecimiento en zonas con actividad de ^{131}I en la red de sistemas de alcantarillado de aguas sanitarias con descargas a la cuenca el salitre en Bogotá. [en línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8659/1/6161880-2021-2-IQ.pdf>. [Acceso: ago. 25, 2021]

2.3 Estudio y aporte del proyecto de grado “Propuesta para la remoción de ^{131}I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R del salitre”

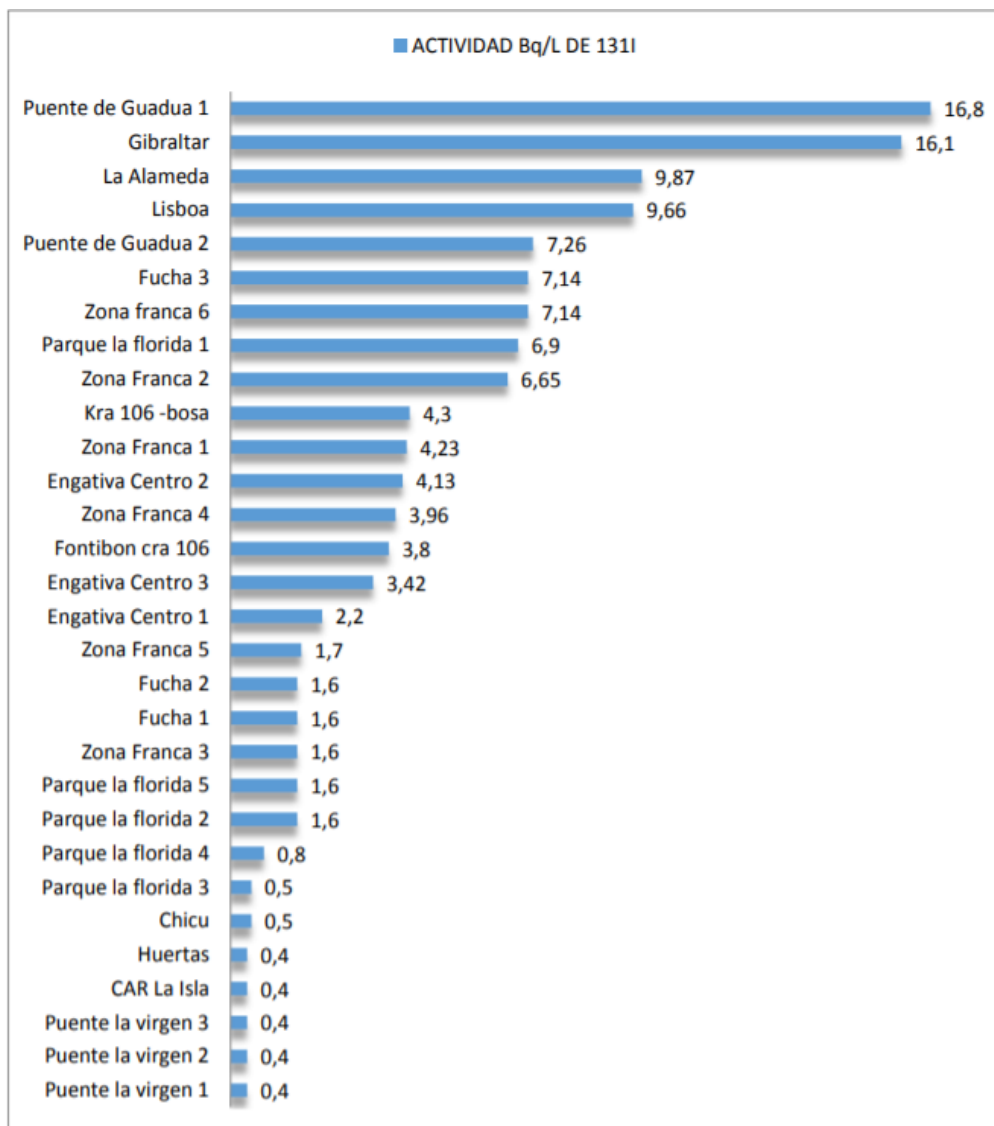
De la revisión bibliográfica realizada al proyecto de grado desarrollado en el año 2020, por la Ingeniera y Científica del Servicio Geológico Colombiano, Evelin Mora, y el Ingeniero Daniel Tello, se encontró que los investigadores desarrollaron muestreos de aguas del río Bogotá antes y después de la P.T.A.R del Salitre, y con base a los resultados, presentaron una opción para la remoción, tratamiento y vertimiento de ^{131}I , modificando el área superficial de un adsorbente, con el fin de que generar una mayor afinidad con el radionúclido de investigación, evaluando los tiempos en función de la adsorción mediante el uso de concentraciones variadas de KI, favoreciendo procesos de adsorción de ^{127}I por medio de la modificación de carbón activado impregnado con NaOH, y finalmente, diseñando tanques de decaimiento sin adsorción para tratar el radionúclido. Del proceso de análisis experimental desempeñado por los investigadores, les permitió determinar que el porcentaje de adsorción fue demasiado bajo, debido a la baja cantidad en masa de ^{131}I . De igual manera, encontraron que, el ^{131}I encuentra su pico de concentración en las muestras analizadas, en horas de la mañana y en el transcurso del día presenta un comportamiento decreciente significativo. En cuanto a La P.T.A.R del Salitre, observaron que presenta concentraciones del elemento inferiores a las sugeridas por la O.M.S ciertos días de la semana, mientras que otros días, estas actividades sobrepasan los niveles sugeridos por la O.M.S, presentando incrementos considerables a medida que transcurre la semana.

2.4 Estudio y aporte del proyecto de grado “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”

De la revisión bibliográfica realizada al proyecto de grado desarrollado en el año 2018 por la Ingeniera y Científica del Servicio Geológico Colombiano, Liseth Ospina, se encontró que la investigadora desarrolló un protocolo de muestreo implementado el uso de herramientas tecnológicas como el software ArcGis, el cual utilizó para simular la cuenca del Río Bogotá y los puntos de muestreo empleados con los respectivos resultados, los cuales están contenidos en la Figura 15. Por lo anterior, la investigadora encontró el radio mayor y el radio menor de incidencia del ^{131}I a lo largo de la cuenca media del Río Bogotá. Esto le permitió establecer que las variables principales que afectan la concentración de ^{131}I en el río son el caudal y la distancia de la toma de muestras. De igual forma, la investigadora logró visualizar los niveles de contaminación radioactiva en el afluente hídrico, y examinar las relaciones de éste con las posibles fuentes de contaminación, las cuales atribuyó que podrían ser los centros médicos que desarrollan tratamientos con ^{131}I . Por todo lo anterior, la investigadora obtuvo como resultado un radio de incidencia mayor de 511 metros y un radio de incidencia menor de 350 metros.

Figura 15.

Actividad de ^{131}I en los puntos muestreados



Nota. En el grafico anterior se evidencia los valores de ^{131}I encontrados en los puntos de muestreo, siendo 0.4 Bq/L el valor mínimo obtenido y 6.8 Bq/L el pico, encontrándose muy cerca del valor límite permitido por la normativa colombiana. Tomado de: L. T. Ospina, Propuesta Para La Remoción De ^{131}I A Nivel Generadores Debido A Su Concentración En Los Flujos De La P.T.A.R Del Salitre, tesis pre. Facultad de Ingenierías, Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018. [en línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6727>. [Acceso: mar.21,2021]

2.5 Antecedentes bibliográficos relacionados con muestreos, cuantificación y determinación de ^{131}I en otros lugares del mundo

Para plantear un protocolo de medición de ^{131}I en matrices vegetales y productos de origen animal, primero, se consultaron diferentes fuentes bibliográficas las cuales incluyeran estudios relacionados con la liberación de ^{131}I en el mundo y la metodología de medición empleada en diferentes matrices.

De la revisión se observó un mismo factor común, el estudio de la liberación de ^{131}I como consecuencia de accidentes nucleares y/o causas terroristas, generalmente en países de continente europeo y asiático [56]. A continuación, se presenta un resumen histórico de las liberaciones de ^{131}I en el mundo el cual busca dar a conocer al lector características importantes como la cantidad del radionúclido liberado, así como el lugar y el periodo de tiempo del acontecimiento.

Tabla 8.

Resumen histórico de las liberaciones de ^{131}I en el mundo

Cantidad total estimada de ^{131}I liberada del sitio (Ci)	Liberación total estimada de ^{131}I del sitio (PBq)	Sitio del evento	Periodo de tiempo
6,300,000,000	233,100	Programa de ensayos nucleares de las Islas Marshall	1946-1958
150,000,000	5,550	Sitio de prueba de Nevada, Nevada	1952-1970
50,000,000	1,850	Chernobyl (ex Unión Soviética)	1986
13,800,000	511	Fukushima	2011
740,000	27.38	Reserva Hanford, Washington	1944-1972

60,000	2.22	Sitio del río Savannah, Carolina del Sur	1955-1990
8,000-42,000	0.296-1.554	Laboratorio Nacional Oak Ridge, Tennessee	1944-1956
20,000	0.74	Windscale, Reino Unido	1957
15-21	$5,55 \times 10^{-4} - 7,77 \times 10^{-4}$	Three Mile Island, Pensilvania	1979

Nota. Esta tabla muestra las liberaciones históricas de ^{131}I al ambiente, y está organizada desde la mayor cantidad de radioisótopo liberado en Ci, hasta la menor cantidad. Tomado de: E. Braverman, K. Blum, B. Loeffke: 2014, Managing Terrorism or Accidental Nuclear Errors, Preparing for Iodine-131 Emergencies: A Comprehensive Review [En Línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/261749627_Managing_Terrorism_or_Accidental_Nuclear_Errors_Preparing_for_Iodine-131_Emergencies_A_Comprehensive_Review. [Acceso: oct.04,2021]

De lo anterior se observa que en el continente suramericano no han existido atmósferas contaminantes ocasionadas por liberaciones directas de ^{131}I , de modo que, en los países en donde se han desarrollado estudios similares al presente, han existido diferentes características ambientales las cuales alteran el proceso tanto de toma de muestra, como de pretratamiento y tratamiento de las mismas. De manera que, se procedió a estudiar minuciosamente cada referencia bibliográfica, sus procedimientos y las similitudes ambientales del tiempo exacto y el lugar estudiado con relación al lugar de investigación delimitado en este proyecto, obteniendo como resultado la siguiente tabla resumen en la cual se presentan las fuentes bibliográficas con mayor relevancia y selectividad relacionada al proyecto en desarrollo.

Tabla 9.*Resumen de estudios importantes de ¹³¹I*

Título	Descripción	Autor
<i>“Dispersión de ¹³¹I de la pila al medio ambiente de una planta de producción de radiosótopos de suelo y pasto, Serpong, Indonesia”</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Describe el procedimiento experimental para analizar muestras de pasto en un espectrómetro con GeHP. • Estudia la dispersión de ¹³¹I en el medio ambiente alrededor del Área Nuclear de una planta productora y procesadora de ¹³¹I (SNA), en Serpong, Indonesia. • Resalta la importancia de determinar y mitigar la actividad de ¹³¹I en el pasto. 	G. Suhariyono H. Kusnoputranto Kardono A. Syahrir
<i>“La liberación de Chernobyl ¹³¹I: validación del modelo y evaluación de la efectividad de la contramedida”</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Presenta el resumen de ¹³¹I contenido en pasto, como consecuencia de la explosión de la planta de Chernóbil. • Relaciona la tasa de ingesta de pasto por parte de las vacas, con la cantidad de ¹³¹I contenida en la leche. • Establece tiempos de muestreo para la determinación de ¹³¹I en pasto. • Acota la zona de influencia directamente afectada para realizar los respectivos muestreos. 	Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA)
<i>“Métodos de muestreo y análisis de radionúclidos utilizados en los</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Establece la altura de la toma de muestra en matriz de pasto. • Establece los principales indicadores terrestres de ¹³¹I. 	Comité Nórdico de Enlace para la Energía

<i>países nórdicos para muestras ambientales”</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Da a conocer la importancia de tomar muestras de pasto para determinar concentración de ^{131}I, por la relación de esta matriz con cultivos, alimentación de animales, entre otros. 	Atómica (N.K.A)
<i>“Determinación de radionúclidos en muestras de ecosistemas de gramíneas”</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Especifica procedimientos y consideraciones en la medición de muestras vegetales para determinación de actividades de radionúclidos. • Establece recomendaciones sobre el control de calidad para la determinación de radionúclidos en muestras ambientales. 	J.J. LaBrecque, R. Schelenz and R.W. Perkins
<i>“Medición de radionúclidos en Alimentos y Medio Ambiente”</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Detalla la preparación de muestras de diferentes matrices, como lo son: leche, pasto, aire, agua, suelo, entre otros. • Especifica las condiciones de almacenamiento y transporte para matrices de interés como la leche, el pasto, y la lechuga. • Presenta los métodos espectrométricos para el análisis de muestras, de acuerdo al radioisótopo estudiado. • Da a conocer los conservantes más apropiados para preservar muestras de leche. • Presenta detalladamente las alturas de corte propicias para tomar muestras vegetales de pasto y suelo. 	Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA)

<p><i>“Transferencia del ¹³¹I de Fukushima a la vegetación y la leche en Francia”</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Determinación de ¹³¹I en matrices de pasto, verduras y leches, provenientes del accidente de Fukushima. • Estudio de la masa de aire contaminado presente en Francia, a raíz del accidente de Fukushima. • Da a conocer la capacidad de absorción de ¹³¹I en las matrices estudiadas. • Estima la velocidad aparente de deposición seca del ¹³¹I en el pasto. 	<p>V. Parache. L. Pourcelot. S. Roussel-Debet. D. Orjollet. F. Leblanc. C. Soria. R. Gurriaran. Ph. Renaud. O. Masson.</p>
<p><i>“Informe preliminar sobre la leche”</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realiza muestreos en leche para determinar diferentes radionúclidos, incluyendo el ¹³¹I. • Establece el volumen requerido para análisis de muestras de leche. • Enlista los preservativos apropiados para conservar muestras de leche de diferentes radioisótopos, incluyendo el ¹³¹I. • Determina el tiempo de muestreo necesario en relación con el número de lugares y número de muestras a analizar, para asegurar la representatividad de la campaña. • Realiza un reporte técnico de datos basados en el estudio desarrollado. 	<p>Oficina de Investigación y Desarrollo del Centro Nacional de Investigación Ambiental de los Estados Unidos</p>
<p><i>“Método para la determinación de bajas concentraciones de actividad de</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Establece el tiempo de agitación para la homogenización de las muestras de leche. 	<p>Centro De Control De Suelos, Vegetación, Piensos Y</p>

<p><i>¹³¹I en leche fresca mediante enriquecimiento en una salsa de intercambio aniónico y medición espectrométrica gamma adecuada”</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Recomienda la potencia a trabajar para analizar las muestras de leche por espectrometría de rayos gamma. • Determina el procedimiento de transporte de las muestras de leche, y a su vez, establece el tipo de material de envases. • Estipula las revoluciones por minuto a las cuales se debe realizar la agitación de las muestras para la homogenización de las mismas. • Su estudio se basa en la ISSN 1865-8725. 	<p>Alimentos De Origen Vegetal Y Animal</p>
<p><i>“Cuantificación de la transferencia de radionúclidos a productos alimenticios de granjas domésticas Animales”</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Realiza revisión de parámetros de la O.I.E.A sobre parámetros de transferencia de radionúclidos. • Compilación de bases de datos para derivar valores de parámetros relevantes para la transferencia de radionúclidos desde piensos hasta productos de animales domésticos. • Describe la relación entre el consumo de alimentos contaminados con radionúclidos, y la actividad de radionúclido contenida en los cuerpos de las especies estudiadas. 	<p>B.J. Howard. N.A. Beresford. C.L. Barnett. S. Fesenko.</p>
<p><i>“Examen de los estudios del idioma ruso sobre radionúclidos</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Determina los coeficientes de transferencia de diversos radionúclidos, incluyendo el ¹³¹I y estudia la influencia de éste los animales estudiados. 	<p>Sergey Fesenko, Isamov, N., Howard, B., Sanzharova, N y Wells, C,</p>

*comportamiento
en animales
agrícolas:
transferencia a
tejidos
animales”*

- Describe los tejidos con mayor índice de acumulación de los radionúclidos estudiados.
- Estudia la distribución de ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{54}Mn , ^{59}Fe , ^{60}Co , ^{22}Na , ^{65}Zn , ^{131}I y el U, entre los tejidos bovinos, toros, ovejas, cabras, cerdos, aves y conejos.
- Registra que los valores más altos de los coeficientes de transferencia se observaron para las aves de corral, seguidos por los cerdos, las ovejas y finalmente el ganado,

Nota. En esta tabla se especifica la importancia de los antecedentes más importantes, consultados para realizar este documento, así como sus autores, y el título del mismo. De éstos se extrajeron las técnicas y protocolos de muestreo, entre otras características del presente trabajo.

3. ZONA DE INFLUENCIA PARA LA DETECCIÓN DEL RADIOSOTOPO ¹³¹I

La detección del área de influencia o la zona de estudio en todo proyecto es una fase de vital importancia, puesto que, de acuerdo a las características propias de la misma, se deberán seleccionar los mecanismos pertinentes para llevar a cabo las diversas actividades que se requieran según el tipo de proceso a realizar. Para este caso, teniendo en cuenta que las actividades experimentales a ejecutar consistían en la adquisición de muestras de leche extraídas de bovinos, cuya zona de pastoreo se encontraban cerca a la ladera de la cuenca media del río Bogotá, y dando cumplimiento al objetivo No. 2 de este proyecto, en el cual se cita que se debe determinar una zona de influencia no sólo para el muestreo en matrices de productos de origen animal, sino también matrices de cobertura vegetal, a continuación se presentan las características que se tuvieron en cuenta para establecer la zona de influencia de este caso de estudio. Cabe mencionar que este mismo también fue determinado gracias al aporte del trabajo de grado presentado por la Ingeniera Liseth Ospina.

3.1 Área de influencia en el contexto de la evaluación de impacto ambiental

Las poblaciones, los recursos y las áreas protegidas se catalogan como prioritarias en temas de conservación de la biodiversidad. Por su parte, los humedales protegidos y los glaciares también agregan valor ambiental al territorio, además de ello, aportan un valor paisajístico, el cual en muchos casos se traduce en lugares turísticos. Por lo anterior, y con el fin de medir los posibles impactos que se puedan llegar a presentar sobre el medio ambiente según las condiciones particulares como el lugar, la cultura, los factores bióticos y abióticos, entre otros., la determinación y descripción del área de influencia, se debe realizar teniendo en cuenta los elementos del sociodemográficos y ambientales señalados anteriormente.

De igual forma, se debe tener presente las características propias del espacio geográfico que puedan llegar a contribuir con una mejor caracterización y evaluación de los posibles impactos, así como factores meteorológicos y climáticos del medio físico, como por ejemplo la atmósfera, el aire, y otros factores que se podrían ver afectados a mediano y largo plazo, y, en consecuencia, podrían afectar a la población circundante.

3.2 Zona de estudio

3.2.1 Descripción general de la zona de estudio

La cuenca media del río Bogotá actualmente posee una velocidad alarmante baja, debido a la lentitud de su caudal, la causa principal de esto y del deterioro de las aguas se da por el vertimiento de las aguas residuales domésticas de la capital, en la cuenca media, a través de los ríos urbanos y canales de aguas negras que desembocan en él, es de vital importancia entonces iniciar con un buen monitoreo que nos guíe más a profundidad en la identificación de los elementos que actualmente se encuentran navegando por el río, depositándose en las laderas y llegando a las fincas aledañas a este, pues es de este afluente que obtienen el recurso hídrico lo cual afecta su composición para llegar a soluciones de tratamiento que realmente sean eficaces en cuanto a la remoción de las materias peligrosas y que a mediano o largo plazo pueden llegar a ser perjudiciales para la salud humana y llegar a representar problemas sanitarios.

3.2.2 Hidrología

El escenario que se analiza primeramente y que se toma como punto crítico, es el periodo de sequía, ya que son meses durante los cuales el caudal del afluente hídrico se encuentra por debajo del promedio anual, más sin embargo para los diversos periodos se realizaron cálculos y balances basados en la oferta y la demanda del recurso, así como el índice de escasez del mismo.

De igual manera se planteó el estimativo sobre la demanda actual que existe sobre la subcuenca, esto se realizó teniendo como base el uso que se le da actualmente al suelo, el estimado poblacional tanto en las cabeceras municipales como en las diferentes veredas que se localizan dentro de la zona de afectación de la cuenca, sin dejar de lado las concesiones que han venido siendo otorgadas por la Corporación, para poder obtener un resultado respecto a la demanda de agua lo más cercano posible a la realidad, atendiendo a factores como uso doméstico, agropecuario o de riego, ecológico e industrial [43].

Es fundamental llevar un control en los valores del río, pues es con esto que se pueden realizar proyecciones con las cuales se pueda crear una base del comportamiento del mismo y poder llegar a generar un plan respecto al cuidado y preservación del afluente, es ahí donde el papel de la hidrología se vuelve fundamental ya que mediante su aplicación que logramos conocer

los picos, la precipitación, velocidad, caudal, entre otros factores decisivos en el comportamiento del río y la afectación que podría llegar a generar a los predios o estructuras vecinas [57].

3.2.3 Agua para uso agropecuario

Este tipo de economía se desarrolla en la cuenca del río Bogotá es su sector medio y alto, se puede encontrar cultivos de vegetales destinados al abastecimiento no solo local sino también nacional como lo son las hortalizas, la papa, la arveja, el maíz, la zanahoria, la fresa las flores y los pastos, estos últimos son de vital importancia para este estudio pues es de estos que se alimenta el ganado bobino del cual se obtiene la leche que se vende posteriormente a los productores de lácteos [55].

Tabla 10.

Uso del agua en la cuenca media del río Bogotá

Subcuenca	Oferta (m ³ /s)		Demanda (m ³ /s)				Índice de escasez	
	Periodo Seco	Periodo Húmedo	Doméstica	Agropecuaria	Industrial	Ecológica	Periodo Seco	Periodo Húmedo
Río Alto Bogotá	0.94	3.74	0.034	1.66	0.002	0.04	Alto	Medio Alto
Embalse Sisga	1.06	4.6	0.006	0.77		0.03	Alto	Medio
Embalse Tominé	3.51	10.05	0.021	1.76		0.04	Alto	Medio
Sector Sisga – Tibitoc	7.73	10.29	0.035	1.81	0.015	0.11	Medio Alto	Medio
Río Neusa	3.02	4.86	0.161	2.33	0.2	0.31	Alto	Alto
Río Negro	0.25	0.47	0.003	0.12		0.1	Alto	Medio Alto
Río Teusacá	2.73	5.38	0.05	1.95	0.002	0.15	Alto	Medio Alto
Río Frio	1.47	2.82	0.049	8.93	0.007	0.17	Alto	Medio Alto
Río Chicó	0.61	1.12	0.006	0.0	0.001	0.04	Alto	Alto
Sector Tibitoc – Soacha	15.21	20.67	5.244	2.26	0.006	2.27	Alto	Medio Alto
Río Balsillas	3.34	7.14	0.062	3.3	0.024	0.15	Alto	Medio Alto
Río Soacha	0.18	0.32	0.007	0.07		0.01	Alto	Medio Alto
Embalse Muña	0.58	1.06	0.044	0.63	0.002	0.04	Alto	Alto
Sector Salto – Soacha	22.02	29.92	0.089	0.51		3.28	Medio	Medio
Sector Salto – Apulo	29.82	40.31	0.078	1.11	0.004	4.89	Medio Alto	Medio
Río Calandaima	1.91	2.74	0.038	0.66	0.001	0.05	Medio Alto	Medio Alto
Río Apulo	6.17	7.92	0.118	2.14	0.004	0.16	Medio Alto	Medio Alto
Sector Apulo – Girardot	34.34	52.44	0.357	3.4	0.016	5.4	Medio Alto	Medio

Nota. La tabla presenta la demanda, oferta e índice de escasez de las subcuencas relacionadas con el río Bogotá. Tomado de: C.A.R. de Cundinamarca, P.E. LTDA., and E. LTDA.: 2006, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá (POMCA). [en línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>. [Acceso: oct.15,2021]

NOTA₁: en el recuadro azul que se ubica tanto sobre la tabla anterior como en las siguientes dentro de este capítulo se hace referencia al “Sector Tibitoc – Soacha” pues es en este dónde se descargan los ríos Juan Amarillo, Tunjuelo, Fucha pues los anteriores cuentan con

actividades del radioisótopo superiores a lo permitido, por lo cual este sector fue el epicentro de la zona de estudio.

NOTA₂: en este sector la demanda de agua para uso agropecuario corresponde a $2.26 \text{ m}^3/\text{s}$, siendo este el tercer uso que más utiliza este recurso encontrándose solamente $0.01 \text{ m}^3/\text{s}$, por debajo del uso ecológico, para esta zona se debe tener en cuenta que el índice de escasez tanto en el periodo seco como húmedo es alto, lo cual es preocupante.

3.2.4 Geología y geomorfología

Lo que se conoce de la geomorfología del río Bogotá es que está dividido en dos zonas diferentes, las cuales se caracterizan de acuerdo a la geomorfología del relieve y del modelado que presentan, más sin embargo para esta investigación se tomara exclusivamente la caracterización que presenta la segunda zona, la cuenca media y baja del río Bogotá donde las aguas debajo de la garganta de los cerros o “Garganta de Bochita” se encuentra el sector donde el río abandona el altiplano hasta encontrar su desembocadura en el río Magdalena, este sector de la cuenca se encuentra conformado de sustratos sedimentarios plegados, fallados y fracturados, más sin embargo la diferencia principal radica en la forma como se organiza el sustrato [55].

Dicha estructura resalta por la sucesión de bloques los cuales se encuentran separados por fallas cuyo buzamiento se da en dirección noreste, lo cual produce un relieve en escalones altamente escarpados y con una litología donde el material ubicado en la parte superior son areniscas y a medida que la profundidad aumenta se empiezan a presentar rocas de baja resistencia como lo son las lodolitas del Grupo Villeta, por su parte el área comprendida entre el borde occidental del altiplano y la desembocadura del río Bogotá al río Magdalena, se conforma por un grupo diverso de modelados los cuales se encuentran relacionados con los cambios climáticos del pasado y una variedad de cambios estructurales, por lo cual se presentan formación de cañones, cerros testigo, los escarpes y depósitos de vertiente.

Geológicamente se encuentran presentes tres regiones estratigráficas cretácicas paleógenas distintas en esta cuenca las cuales son la Región Oriental, la -región del Tequendama junto con el Oeste de la Sabana de Bogotá y la Región Oriental.

La Región Oriental por su parte se encuentra ubicada sobre el límite oriental de la cuenca del Río Bogotá y las fallas de Bogotá y Fusagasugá al occidente, se constituye por las formaciones Chipaque, el grupo Guadalupe y las formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme y Tilata, la región del Tequendama y el Oeste de la Sabana de Bogotá se encuentra ubicada en las fallas de Bogotá, Fusagasugá al oriente y Bituima- Salcedo al occidente, esta zona se encuentra conformada por las formaciones La naveta, Tincheras, Socotpa, Capotes Simijaca, La Frontera, Conejo el Grupo Gaudalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá, La Regadera y Tilata [55].

Así mismo los minerales que se extraen de esta cuenca son arcillas, arenas industriales, rocas calcáreas y carbón, entre otros, los cuales se explotan en aproximadamente 800 minas, de las cuales solo el 65% se encuentran activas. Por otro lado, en la siguiente tabla se muestra el uso de suelos destinado para la zona.

Tabla 11.

Descripción de suelos por subcuenca

Subcuenca	Paisaje	Características químicas	Características físicas	Taxonomía
	terrazas, en condición climática húmeda	saturación de bases, moderados contenidos de carbón orgánico, bajos contenidos de fósforo, potasio y calcio. En general, los suelos son de fertilidad moderada a alta	medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación	orden inceptisol de horizontes desaturados
Río Teusacá	Escarpado en una condición climática mayormente húmeda	pH ligeramente ácidos, moderada a alta saturación de aluminio, moderada a baja saturación de bases, moderados contenidos de carbón orgánico, bajos a moderados contenidos de fósforo, potasio y calcio. En general, los suelos son de fertilidad moderada a alta	Texturas moderadamente finas, estructuras moderadas, densidades aparentes medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación	Dominancia equilibrada de los suelos de los ordenes andisol e inceptisol
Río Balsillas	Plano en una condición climática fría mayormente seca	pH ligeramente ácidos, moderada saturación de aluminio, moderada a alta saturación de bases, moderados contenidos de carbón orgánico, moderados contenidos de fósforo, potasio y calcio. En general, los suelos son de fertilidad moderada a alta	Texturas moderadamente finas, estructuras moderadas, densidades aparentes medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación	Dominancia equilibrada de los suelos de los ordenes andisol e inceptisol
Sector Tibitoc – Soacha	Plano en una condición climática fría mayormente húmeda, en transición a seca	pH ligeramente ácidos, moderada a baja saturación de aluminio, alta saturación de bases, moderados y altos contenidos de carbón orgánico, moderados contenidos de fósforo, potasio y calcio. En general, los suelos son de fertilidad alta	texturas moderadamente finas, en sectores gruesas, estructuras moderadas, densidades aparentes medias en suelos originados a partir de rocas y bajas en aquellos que son producto de la evolución de cenizas volcánicas y una alta susceptibilidad a la erosión hídrica cuando son desprovistos de vegetación	Dominancia equilibrada de los suelos de los ordenes inceptisol y andisol
Río Apulo	Desde planos hasta muy escarpados, en condiciones climáticas igualmente variables	pH ligera a moderadamente ácidos, moderada a baja saturación de aluminio, moderada saturación de bases, moderados y altos contenidos de carbón orgánico, moderados contenidos de fósforo, potasio y calcio. Fertilidad moderada	Texturas moderadamente finas, en sectores gruesas, estructuras moderadas, densidades aparentes medias	Dominancia de los suelos del orden inceptisol

Nota. La anterior tabla describe los suelos de la subcuenca del río Bogotá. Tomado de: C.A.R. de Cundinamarca, P.E. LTDA., and E. LTDA.: 2006, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica

del Río Bogotá (POMCA). [en línea]. Disponible en:
<https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>. [Acceso: oct.15,2021]

3.2.5 Situación ambiental de la cuenca

El río Bogotá cuenta con cuatro áreas estratégicas definidas por las características propias de sus ecosistemas, encontramos entonces ecosistemas declarados los cuales ya se encuentran dentro de una de los sistemas pertenecientes a zonas protegidas, por su parte los ecosistemas a declarar son aquellos que debido a las condiciones de oferta de bienes y servicios de orden ambiental requieren ser incluidos en la categoría de ecosistemas declarados, están los ecosistemas a proteger, estos son los que necesitan ser manejados de una forma especial en cuanto a su uso, teniendo como eje central la preservación y conservación de la fauna y la flora que se encuentra en peligro de extinción en la zona de súper páramo y bosque alto andino, debido a sus características se deben proporcionar espacios de investigación, educación y recreación enfocados a la preservación del medio ambiente sin deteriorarlo y hacer del agua y sus nacedores algo de vital importancia para el desarrollo de la región, por ultimo están los corredores biológicos o ecológicos, los cuales se encuentran relacionamos con las zonas de protección y las áreas que poseen una alta biodiversidad de gran importancia, estos se destinan para contrarrestar la división de los hábitats y en la actualidad se reflejan como una propuesta interesante en cuanto a conservación ecológica [51].

Tabla 12.

Situación ambiental de la zona

CUENCA	ÁREAS PROTEGIDAS	ÁREAS A DECLARAR	ÁREAS A PROTEGER	CONECTIVIDAD ENTRE CUENCAS
Tibitoc)			Gachancipá y La Esmeralda en Tocancipá. Quebrada Honda en la Vereda San José Humedal los Patos y demás humedales en Tocancipá	
Rio Bogotá (Sector Soacha - Salto)	Sector Salto de Tequendama y Cerro Manjui Parque Ronda del Río Tunjuelo	Humedales de Soacha y Ronda del río Soacha, ecosistemas de conectividad con la cuenca del río Soacha	Ronda del río soacha	Rio Apulo - Balsillas -Rio Bogotá Sector salto Soacha - Río Medio Bogotá sector Salto Apulo Río Bogotá sector Salto - Soacha - Río Tunjuelo
Rio Bogotá (Sector Tibitoc- Soacha)	Cerros Orientales de Bogota	Parque Entrenubes, Vereda Cerro de Hierbabuena, Páramo de Cruz Verde, Humedal artificial del Parque Navarra, Cerro la Conejera.	Quebrada La Salitrosa	Rio Bogotá Sector Tibitoc - Soacha - Tuesacá y Tunjuelo
	El Sapo - San Rafael (La Calera)			Rio Bogotá Sector Tibitoc-Teusaca
	Cerro de Torca			
	Cerros de Suba			
	Sierras del Chico			
	Humedal de Capellania o Cofradia			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal de Córdoba			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal de Jaboque			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal de la Conejera			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal de Techo			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal del Burro			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal Juan Amarillo o Tibabuyes			Eje ambiental de Bogotá
	Humedal Santa Maria del Lago			Eje ambiental de Bogotá
	Meandro del Say			
Entre Nubes Cuchilla Guacamayas			Río Bogotá sector Tibitoc Soacha y Tunjuelo	

Nota. En la tabla anterior da a conocer las áreas protegidas con las que el sector cuenta, las cuales son divididas en: humedal, cerro y tres sectores de importancia. Tomado de: C.A.R. de Cundinamarca, P.E. LTDA., and E. LTDA.: 2006, Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá (POMCA). [en línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aebc81c.pdf>. [Acceso: oct.15,2021]

3.3 Factores determinantes

Para poder determinar los valores se deben tener en cuenta muchos factores como lo son la sedimentación con la que cuenta en el río en su cuenca media ya que esto afectara la velocidad con que el caudal del cuerpo hídrico se desplaza lo cual influirá en la facilidad que el elemento tendrá para desplazarse o depositarse en la ladera del río, así mismo se debe tener en cuenta el tipo de material por el cual se encuentra constituido el suelo la misma, pues factores como la porosidad, capacidad de absorber y de realizar intercambios entre otros este será un punto

determinante para la acumulación del ^{131}I pues si posee una capacidad grande de absorción podrá retener mayores cantidades del elemento.

3.4 Principales resultados en términos de la contaminación del río Bogotá por presencia de radioisótopos y su radio de incidencia

En el proyecto realizado por la ingeniera Liseth Andrea Ospina Perdigón se encontró actividad de ^{131}I en los 30 puntos de muestreo que se analizaron, de los cuales dos de estos cuentan con una mayor actividad del elemento, dichos puntos se consideran los picos del estudio, y se encuentran ubicados en el puente de la autopista Bogotá-Medellín con una actividad registrada de 16,8 Bq/L, siendo este el lugar de mayor concentración seguido por el punto ubicado en Gibraltar con 16.1 Bq/L. Lo anterior, conlleva a una hipótesis en la cual los hospitales que cuentan con la licencia para utilizar el radioisótopo no están cumpliendo con el plan de manejo para la descarga del agua posterior al tratamiento, arrojando contaminantes que llegaran al Río Bogotá [2].

Para este proyecto y teniendo en cuenta tanto los protocolos de muestreo como la implementación del software ArcGis en el cual se creó una capa correspondiente a la red hídrica del río Bogotá con el fin de determinar el radio de incidencia menor y el radio de incidencia mayor, datos que permiten generar una mejor visualización de la contaminación radiactiva producida por el radioisótopo en el agua que se desplaza a través del Río Bogotá así como su conexión con las pudieran llegar a ser las fuentes contaminación que se asume podrían ser los pacientes tratados con la terapia de ^{131}I así como los centros médicos donde se trabaja la medicina nuclear, dichos radios de incidencia se obtuvieron entre 511 metros y 350 metros, siendo este primero el valor del radio mayor de incidencia y el segundo el radio menor de incidencia [2].

Por otra parte, en un proyecto en el cual se analiza la presencia del radioisótopo se encontró que en 11 puntos que se encuentran cerca a lugares como parques, hospitales, centros educativos y zonas residenciales entre otras, esto a lo largo de las zonas norte, oriental y occidental de Bogotá, las cuales cuentan con descarga a la P.T.A.R El Salitre.

Gracias a radiación gamma que es emitida por el ^{131}I ; 3 pozos sobresalen, los cuales provienen de instituciones en las cuales el registro de actividad del elemento es mayor al límite legal permitido en la normativa colombiana para vertimientos al alcantarillado [58].

Para este caso al trabajarse con aguas residuales el radio de incidencia del ^{131}I se encuentra ligado a los vertimientos que se producen tanto en los hospitales como por los pacientes ambulatorios y los desechos generados por los elementos radiológicos y las farmacias, pues esto genera afectaciones al alcantarillado y en consecuencia al río Bogotá.

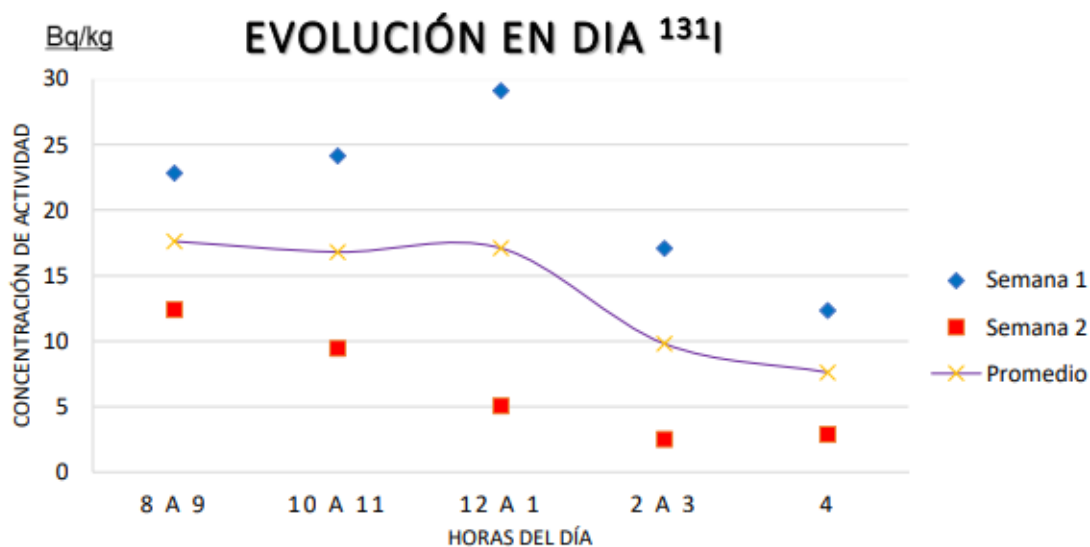
Este da la posibilidad de determinar los niveles de referencia, los cuales corresponden a la magnitud en que se deben tomar medidas, para este caso en áreas sanitarias respecto al radioisótopo, se debe investigar en cuanto a niveles de registro y niveles de investigación. Por otra parte, en investigaciones previas se ha logrado determinar ciertos niveles de referencia los cuales han determinado zonas de incidencia las cuales aportan niveles de investigación en el proceso de descarga desde los 249.99m hasta los 511.18m [2].

3.5 Manejo de aguas contaminadas por radioisótopos en la P.T.A.R. El Salitre

Una de las consecuencias del tratamiento de aguas ineficiente es encontrar actividad radiactiva contenida en el cuerpo acuático, además, de la irrigación y la contaminación radiactiva del afluente o del cuerpo hídrico en estudio. Lo anterior es de vital importancia, dado que, al generarse una transferencia de energía de un material con contenido radiactivo a otro como lo pueden ser los animales, los vegetales y los humanos, y, adicionalmente, tomando en cuenta actividades que requieren tener un contacto directo con el cuerpo contaminado, como lo es la revitalización de suelos o el abonado, se puede considerar que se estaría generando una alteración a la cadena trófica humana [59].

Figura 16.

Gráfico de resultados evolución de ^{131}I en el día



Nota. En la gráfica anterior se encuentran los datos de concentración del radioisótopo ^{131}I reportadas en Becquerels por kilogramo (Bq/kg) en relación con las horas en las cuales fueron tomadas las muestras, la fecha de muestreo fueron los jueves 15 y 22 de agosto del año 2019 pues en estos días fue donde la concentración de actividad fue elevada considerablemente, mientras que los resultados que se obtuvieron lo largo de las tres semanas fueron menos dispersos y pese a que se encontraron concentraciones de ^{131}I en todas las muestras, el momento del día en el cual se hallaron aglomeraciones del radioisótopo más elevadas fue en horas de la mañana y presentó decrecimiento en el transcurso del día. Tomado de: E.T. Mora C., C. D. Tello R: 2020, Propuesta para la remoción de ^{131}I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R Salitre [En Línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: may.03,2021]

Es evidente que la cantidad de ^{131}I que ingresa a la planta es elevada y que los hospitales no están verificando el contenido del agua que vierten al Río Bogotá, generando así que la planta cuente una concentración del radioisótopo alta y aparte de esto, que las aguas antes de llegar a la P.T.A.R. El Salitre cuenten con valores que superen los permitidos en la normativa colombiana, generando un potencial peligro de salud pública dado que se puede acarrear consecuencias nocivas para la salud del ser humano si no se toman las acciones pertinentes [7].

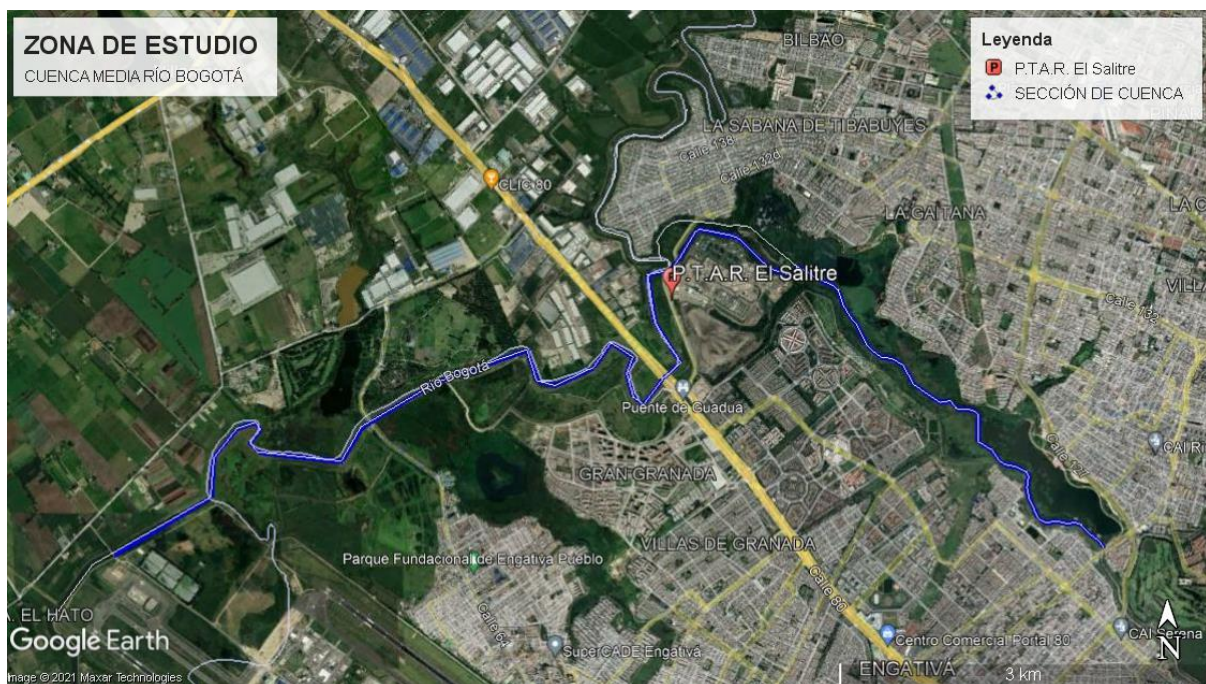
3.6 Determinación de la zona de estudio

Para este caso, teniendo como fundamento y soporte la información suministrada anteriormente, con respecto a todo lo que podría ser el área de influencia del río Bogotá se

determinó que la delimitación de la zona de estudio debería tener una longitud aproximada de 11 Km, los cuales tendrían puntos de muestreo tanto aguas arriba como aguas abajo de la P.T.A.R. del Salitre (es decir, tanto antes como después de la ubicación de ésta planta de tratamiento de agua), dada la importancia que se le atribuye a esta planta puesto que allí el agua sufre procesos tanto químicos como físicos para su purificación antes de volver a ser entregada al afluyente hídrico. Por lo anterior, se trazó la línea de muestro como se evidencia en la figura que se presenta a continuación.

Figura 17.

Zona de estudio para la detección del radioisótopo ¹³¹I



Nota. La figura anterior indica donde se encuentra ubicada la zona de estudio dentro de la cuenca media del río Bogotá. Tomado de: Google Earth

4. TÉCNICAS DE ADECUACIÓN DE MUESTRAS EN MATRICES ANIMALES Y VEGETALES

Este capítulo tiene como objetivo principal dar a conocer al lector las formas idóneas de adecuación de muestras y detección de ^{131}I en muestras de matrices vegetales y de productos de origen animal, con el fin de obtener resultados exactos de las mediciones de ^{131}I , y de esta manera, disminuir el mínimo margen de error durante el procesamiento y análisis de las mismas. Para ello, se presenta la forma más empleada tradicionalmente y utilizada en este proyecto para realizar la cuantificación de ^{131}I , de modo que, se presenta el método espectrométrico, su pertenencia de uso en este proyecto, el tipo de detector recomendado para usar en este trabajo, entre otros conceptos importantes para entender de manera más precisa el contexto de muestreo de ^{131}I .

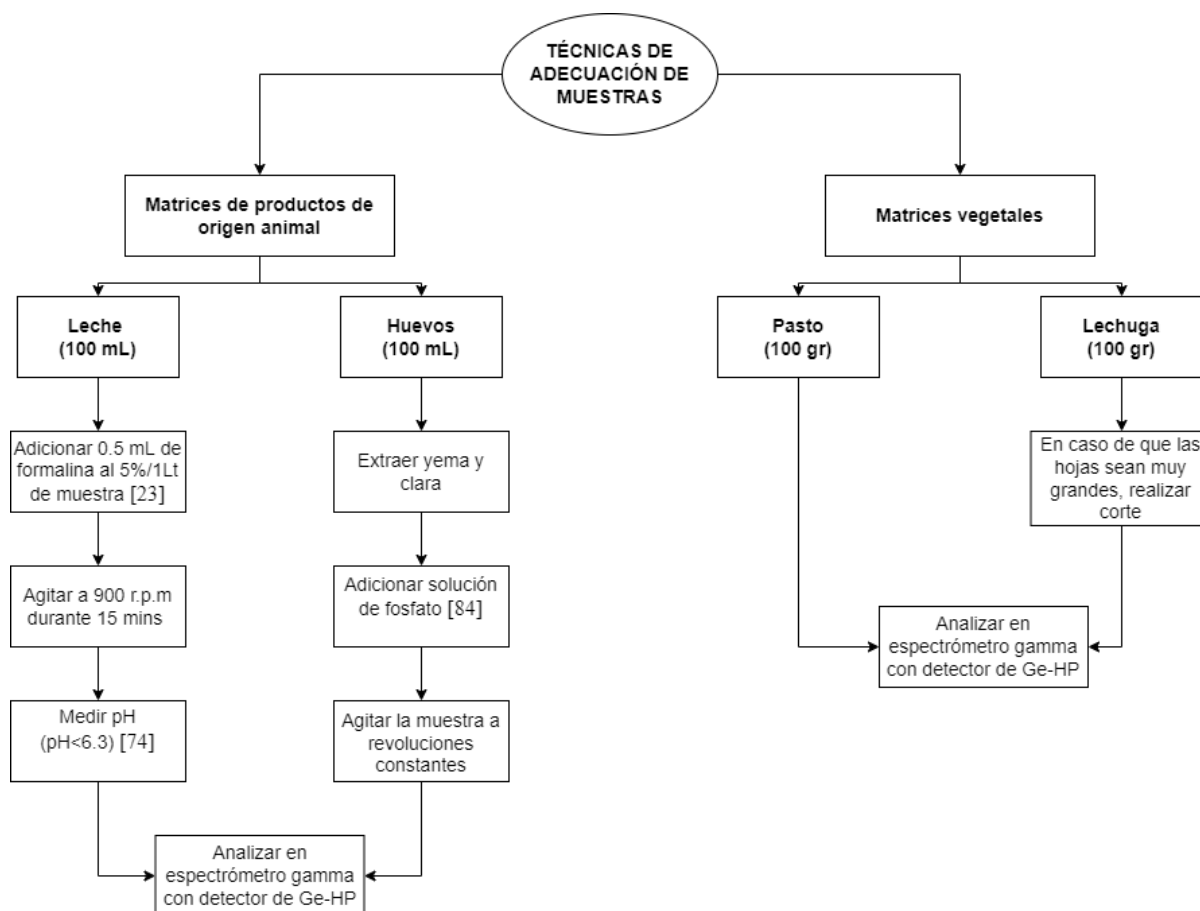
4.1 Método empleado para la adecuación de muestra ^{131}I

Para obtener resultados confiables del análisis de la presencia de ^{131}I en las matrices estudiadas, se debe tener en cuenta factores de relevancia como la correcta calibración del equipo de medición utilizado, la exactitud con la que esté midiendo este equipo, el ajuste del equipo y del programa de medición de la actividad del radionúclido de estudio, entre otros., en los cuales se busca reducir el porcentaje de error humano involucrado durante el análisis.

Uno de los factores que, de la mano con los anteriormente descritos, interviene en el análisis de isótopos es la correcta adecuación de muestras. Es por esto, que, se deben considerar factores que puedan afectar la naturaleza de la muestra tales como el tiempo de almacenamiento en el que permanecerá la muestra, si el análisis se llevara a cabo el mismo día del muestreo o no, la tolerancia a agentes microbianos y/o químicos del equipo utilizado, la distancia entre el lugar de muestreo y el lugar de análisis, las condiciones de descomposición de la muestra, las condiciones ambientales permisibles de la matriz evaluada, entre otros. Debido a esto, a continuación, se presenta de forma gráfica las adecuaciones que deben realizarse a las matrices estudiadas en este proyecto.

Figura 18.

Métodos empleados de adecuación de muestras de lechuga, pasto, leche y huevos para la determinación de la actividad de ¹³¹I



Nota. La figura muestra las adecuaciones previas que deben realizarse a las muestras de matrices de leche, huevos, pasto y lechuga. Tomado de: Association of International Education Administrators (A.I.E.A): 1989, Medición de radionúclidos en Alimentación y Medio Ambiente. [En Línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/041/20041399.pdf. [Acceso: ago.27,2021]

De la figura anteriormente presentada se puede observar el procedimiento para la adecuación de las muestras de cada matriz, en él, se encuentra el tamaño adecuado de las alícuotas de las muestras de cada matriz, así como el conservante a utilizar para cada una y el método de cuantificación y medida que debe emplearse. De igual manera, es posible analizar que las matrices las cuales necesitan adición de conservante son las provenientes de origen animal, mientras que las matrices vegetales no requieren ningún tipo de adecuación con agentes químicos. Por lo anterior, a continuación, se menciona de forma fusionada los protocolos de adecuación de muestras para matriz vegetal, mientras que, se detallan los protocolos de adecuación de matrices de productos de origen animal.

Cabe destacar que los químicos empleados dentro del proceso de adecuación de muestras tienen como función conservar y mantener estables las muestras de los productos de origen animal, por tal motivo, como conservantes se emplearon:

- Formalina: este conservante es útil para preservar las muestras de leche, ya que, gracias a su capacidad bactericida y fungicida, logra ser un gran desinfectante.
- Soluciones fosfatadas: por su parte, el uso de fosfatos como conservantes tiene como objetivo mantener estable la emulsión generada entre la yema, la clara y la cascara de los huevos empleados, con el fin de mantenerla homogénea durante el proceso de medición para evitar la presencia de picos erróneos generados por escenarios externos al origen de la actividad propia del elemento estudio.

4.1.1 Adecuación de muestras en matrices vegetales

De acuerdo a como lo indica el *Comité De Enlace Nórdico Para La Energía Atómica* (N.K.A), el ^{131}I se puede medir directamente a partir del pasto fresco [60], lo cual aplica también para la matriz lechuga, al poseer características y propiedades fisicoquímicas similares. Cabe resaltar, que no existe ninguna norma estipulada en la que se establezca la adición o pretratamiento, con agentes químicos y/o biológicos, a las muestras vegetales para medir concentraciones de ^{131}I .

4.1.2 Adecuación de muestras en matrices de productos de origen animal

No es recomendable realizar calentamiento de las muestras para medir actividades de ^{131}I , por lo que no resulta viable medir ^{131}I en muestras secas y/o cenizas [60]. El mismo principio aplica para las matrices de productos de origen animal estudiadas.

En concordancia con lo ilustrado en la Figura 18, cada matriz tiene una forma de adecuación distinta, las cuales difieren principalmente en el tipo de conservante. Por lo anterior, a continuación, se explican los acondicionamientos previos que se recomienda realizarle a las muestras antes de exponerlas al análisis.

4.1.2.a Adecuación de muestras en matriz leche. Con el objetivo de preservar y mantener desinfectadas las muestras de leche, se adicionan 0.5mL de formalina al 5% [61] o Azida Sódica al 5% por cada litro de muestra, para minimizar el deterioro causado por microorganismos. Adicionalmente, al implementar los métodos de muestreo usualmente ejecutados, como el compuesto o integrado [61], es necesario llevar a cabo la homogenización

de las muestras por medio de agitación a 900rpm durante 15 minutos para producir una mezcla uniformemente consistente.

4.1.2.b Adecuación de muestras en matriz huevo. Con el objetivo de contribuir a la estabilidad de la emulsión y reducir las pérdidas de grasa y agua [62], en las muestras de huevo, se debe adicionar una solución de fosfato [84]. Se recomienda realizar la recolección de huevos medianos de 50 gr de peso estimado entre la suma del peso de la yema y de la clara [63]. Para cumplir con masa de la alícuota requerida para analizar 100gr, se sugiere recolectar 2 unidades de huevos para formar 1 muestra. Por lo anterior, las muestras de huevo al ser obligatoriamente de carácter compuesto, es necesario realizar un proceso de homogenización, en el cual se pueda obtener una mezcla uniforme. Para ello, la muestra debe ser agitada durante un tiempo (t) constante.

Cabe resaltar, que no existe ninguna norma estipulada en la que se establezca el tiempo exacto de agitación o las revoluciones por minuto a las que deben ser expuestas las muestras de productos de origen animal, para medir concentraciones de ^{131}I .

4.2 Equipo de detección para cuantificar ^{131}I en matrices vegetales y productos de origen animal

La espectrometría gamma es la técnica más efectiva para el estudio de la dispersión de radionúclidos en el medio ambiente [64]. Por tal motivo, tradicionalmente, ha sido el método de análisis más empleado para cuantificar la concentración de ^{131}I en matrices ya sean de procedencia tanto vegetal como animal, es por esto que se empleó este método para desarrollar el presente proyecto.

El equipo en el cual se realizó este procedimiento es conocido como espectrómetro de rayos gamma con detector de Ge-HP, y se puede observar a continuación.

Figura 19.

*Espectrómetro gamma
con detector de Ge-HP,
DET F*



Nota. Esta figura ilustra el espectrómetro gamma DET F en el cual fueron analizadas las muestras de leche durante el desarrollo experimental del presente proyecto

Este equipo de medición de rayos gamma tiene una eficiencia relativa del 50% [59] tal y como se ilustra en la Tabla 13, la cual permite hacer mediciones exactas aún en baja presencia del radionúclido en cuestión.

Tabla 13.

Especificaciones del equipo de espectrometría gamma, DET F

Nombre del sistema	DET F
Tipo de detector	Ge-HP

Eficiencia relativa	50%
Características especiales	<ul style="list-style-type: none"> - Ventana de Al. - Protección contra neutrones. - Ultra bajo fondo.

Nota. Esta tabla ilustra las especificaciones del espectrómetro de rayos gamma DET F. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano. [Acceso: 08.nov,2021]

Este es un sistema de medida diseñado para identificar y determinar en un histograma y mediante espectros, los radionúclidos emisores de rayos gamma, y su concentración radiactiva, a través de la energía de dichas emisiones y del recuento de los impulsos durante el tiempo de medida [65]. Para el caso de estudio específico del ^{131}I , esta medición de rayos gamma se realiza a través de la detección del fotón de 364 KeV, e intensidad $Y= 81.2\%$ [40][16], emitido por el radionúclido, mientras que para el caso del ^{40}K , esta medición se realiza a través de la detección del fotón de 1460 KeV [66], permitiendo de esta manera, determinar la actividad de cada radioelemento en muestras vegetales y de productos de origen animal.

Es importante mencionar que, si bien la espectrometría ha sido el método más eficiente para cuantificar ^{131}I a lo largo de los años, este no ha permanecido constante, puesto que ha evolucionado en función del tiempo, incorporando nuevas tecnologías como los detectores semiconductores y sus variantes [65], los cuales aportan mayor exactitud en los resultados de las muestras analizadas, creando ambientes más sensibles para cuantificar concentraciones, aún en baja actividad del radioisótopo de estudio [67].

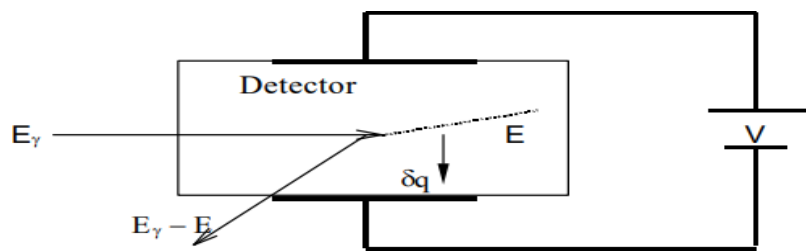
Este último busca a su vez brindar proporcionalidad entre la energía que los fotones depositan en él y la altura de los impulsos eléctricos que suministra como respuesta, permitiendo conocer el número de fotones gamma de cada energía que ha interactuado con él [64]. Lo anterior, se debe a que la cadena eléctrica amplifique y clasifique esos impulsos en función de su tamaño. A continuación, se presenta a detalle las partes y el funcionamiento del detector recomendado.

4.3 Funcionamiento y partes del espectrómetro gamma con detector de Ge-HP

En un espectrómetro con detector de Germanio Hiperpuro, el principal sistema de medida es el detector [64], el cual, para este caso, consiste en un cristal semiconductor de Germanio de alta pureza sobre el que se aplica una diferencia de potencial elevada, a fin de establecer un intenso campo eléctrico [64]. En él, la radiación gamma de energía (E_γ), procedente de la muestra interacciona con el detector mediante los procesos característicos de altas energías [64], como se observa en la Figura 20.

Figura 20.

Representación esquemática de la interacción de la radiación gamma de energía en el detector



Nota. La figura presenta la representación esquemática de la interacción de la radiación gamma de energía E_γ en el detector. La energía depositada, E , se transforma en la carga δq que genera el pulso de corriente en el detector. Tomado de: Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de MADRID, ESPAÑA.: 2018, Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles. [En Línea]. Disponible en:

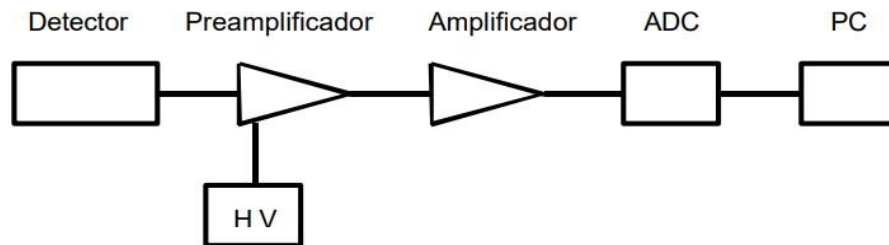
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/018/40018273.pdf. [Acceso: ago.11,2021]

De esta figura se puede observar que la energía E depositada por el fotón se transforma en portadores de carga electrón-hueco, los cuales se encargan de generar un pulso de corriente proporcional a dicha energía, es decir, la energía depositada, E , se transforma en la carga δq que genera el pulso de corriente en el detector [64].

En el sistema, el detector está conectado a una cadena electrónica convencional que amplifica la señal eléctrica, y en última instancia genera el espectro de radiación gamma [64], como puede observarse en la Figura 21.

Figura 21.

Esquema de la cadena electrónica del sistema de espectrometría gamma con detector de Ge-HP



Nota. La figura presenta la representación esquemática de la cadena electrónica asociada al sistema de espectrometría, consistente en detector, preamplificador, amplificador, convertidor analógico digital (ADC) y ordenador personal (PC). Tomado de: Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de MADRID, ESPAÑA.: 2018, Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs-137 en Suelos Españoles. [En Línea].

Disponible en:

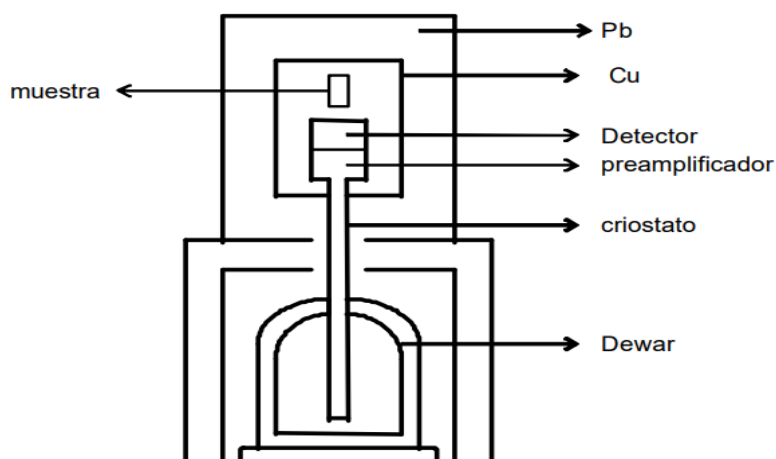
https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/018/40018273.pdf.

[Acceso: ago.11,2021]

Allí se puede observar que el sistema consta de un preamplificador y un amplificador, los cuales direccionan y amplifican el pulso eléctrico; un convertidor análogo que transforma la señal analógica en un dígito y un computador, el cual procesa la señal digital generando un espectro gamma [64]. A continuación, se presenta la representación gráfica de la disposición espacial de un espectrómetro gamma con Ge-HP.

Figura 22.

Disposición espacial de un espectrómetro de rayos gamma con detector semiconductor de Ge-HP



Nota. La figura presenta la disposición espacial de muestra, detector, blindaje y sistema de enfriamiento. Tomado de: Servicio de Información y Documentación, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de MADRID, ESPAÑA.: 2018, Puesta a Punto de un Sistema de Espectrometría Gamma para la Determinación de Cs- 137 en Suelos Españoles. [En Línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/018/40018273.pdf. [Acceso: ago.11,2021]

4.4 Calibración del espectrómetro gamma con detector semiconductor de Ge-HP

La importancia de la calibración del equipo radica en que, a partir de esta, es posible asegurar una buena reproducibilidad y trazabilidad para medir niveles de radiación gamma de acuerdo a las normas establecidas para la protección radiológica [69]. Cabe resaltar que al trabajar un radionúclido tan sensible como lo es el ^{131}I , es de vital importancia que el equipo esté bien calibrado para evitar grandes porcentajes de errores durante el análisis de las muestras.

Para la calibración del equipo de espectrometría DET F de rayos gamma con Ge-HP, se utiliza el espectrómetro GL0515 para calibrar la alícuota [70]. Para ello, se usan diferentes fuentes radiactivas como ^{133}Ba , ^{137}Cs y ^{60}Co , las cuales poseen fotones con energías características. Para la calibración del espectrómetro portátil GL0515 se utilizan 100.000 cuentas en cada región de interés (Roi) de acuerdo a la energía emitida por cada radionúclido [71], como lo

muestra en la Tabla 14. Lo anterior se realiza con el propósito de evitar posibles recalibraciones del equipo, y verificar que la variación de los resultados no exceda el 3% [71].

Tabla 14.

Energías de radionúclidos empleados calibrar el espectrómetro GL0515

Fuente	Área (cps)	Tiempo vivo	incertidumbre
¹³³ Ba	100118	542,180	317
¹³⁷ Cs	100031	875,185	316
⁶⁰ Co	100007	6634,900	317

Nota. La tabla especifica las energías y el ROI de los radionúclidos utilizados para hacer la calibración de espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra GL0515

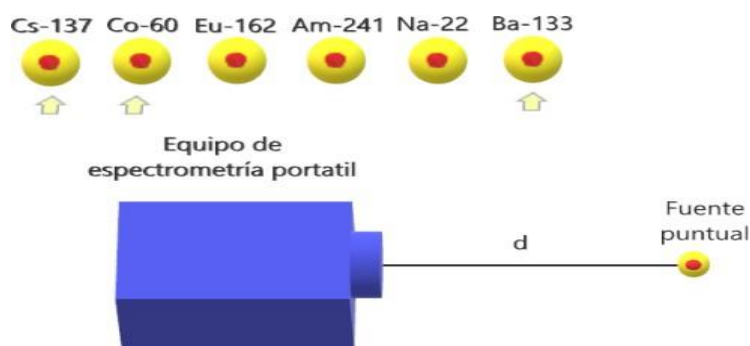
Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de calibración se utiliza el equipo GL0515 para realizar la calibración de la alícuota que será llevada al espectrómetro DET F. El primero, como ya se mencionó, se emplea para calibrar la alícuota de las fuentes empleadas, y luego de esto, realizar una dilución de las mismas. Luego, al obtener los valores de la actividad precisa de la alícuota, ésta se diluye y se lleva al espectrómetro DET F, y de esta manera se correlacionan el espectrómetro DET F con el espectrómetro portátil GL0515 [70].

Cabe resaltar que este procedimiento de aseguramiento metrológico, en el cual se lleva a cabo la calibración del equipo y las respectivas pruebas de estabilización, es llevado a cabo exclusivamente por funcionarios especializados del Servicio Geológico Colombiano, más no por los autores de este trabajo. Sin embargo, la información correspondiente a la calibración del equipo empleado fue suministrada directamente por el S.G.C. y es explicada a continuación.

Primero, los funcionarios del S.G.C. realizaron una verificación de la distancia entre la fuente y el detector. Para ello, colocaron los radionúclidos de emisión gamma utilizados, ¹³³Ba, ¹³⁷Cs y ⁶⁰Co, a una distancia específica, tal y como se ilustra en la Figura 23. Mientras que, con la ayuda de un pie de rey, midieron 10 cm exactos entre el centro de la fuente y la parte externa del detector [71], como se ilustra en la Figura 24.

Figura 23.

Esquema para la calibración del espectrómetro GL0515



Nota. En esta figura se observa esquema para estabilidad de espectrómetro GL0515. Tomado de: E.T. Mora C., C. D. Tello R: 2020, Propuesta para la remoción de ^{131}I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la P.T.A.R Salitre [En Línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: nov.02,2021]

Figura 24.

Verificación de distancia entre la fuente y el detector



Nota. La figura ejemplifica la forma de verificación de la distancia entre la fuente y el detector, para hacer calibración de espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra G10515

Posteriormente, realizaron la verificación de la altura. Para ello, con la ayuda de un soporte universal y de una aguja de sujeción, elevaron la fuente hasta la altura del centro del detector [71], tal y como se muestra a continuación.

Figura 25.

Verificación de altura

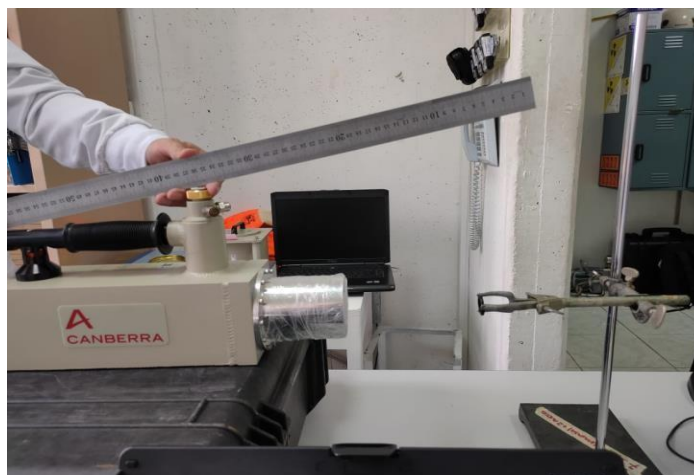


Nota. La figura ejemplifica la forma de verificación de la altura, para hacer calibración de espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra G10515

Seguidamente, ubicaron a lo largo del espectrómetro GL0515, una regla metálica de 1m y verificaron que éste se encontrara alineado con la fuente [71], tal y como se muestra en la Figura 26.

Figura 26.

Verificación de linealidad



Nota. La figura ejemplifica la forma de verificación de la linealidad, para hacer calibración de espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra GI0515

Luego de haber realizado la instalación de la fuente y del equipo, los funcionarios procedieron a realizar las lecturas de las fuentes empleadas para la calibración del equipo, las cuales fueron ^{133}Ba , ^{137}Cs y ^{60}Co , teniendo en cuenta el ajuste de las cuentas por segundo, el área, los tiempos vivos y la incertidumbre [71]. Para la última calibración del espectrómetro GL0515 realizada por el Servicio Geológico Colombiano, y sobre la cual, se realizaron los análisis de las muestras estudiadas en el presente proyecto, los funcionarios obtuvieron los resultados que se muestran a continuación.

Tabla 15.

Resultados obtenidos de los espectros en la última calibración del equipo GL0515

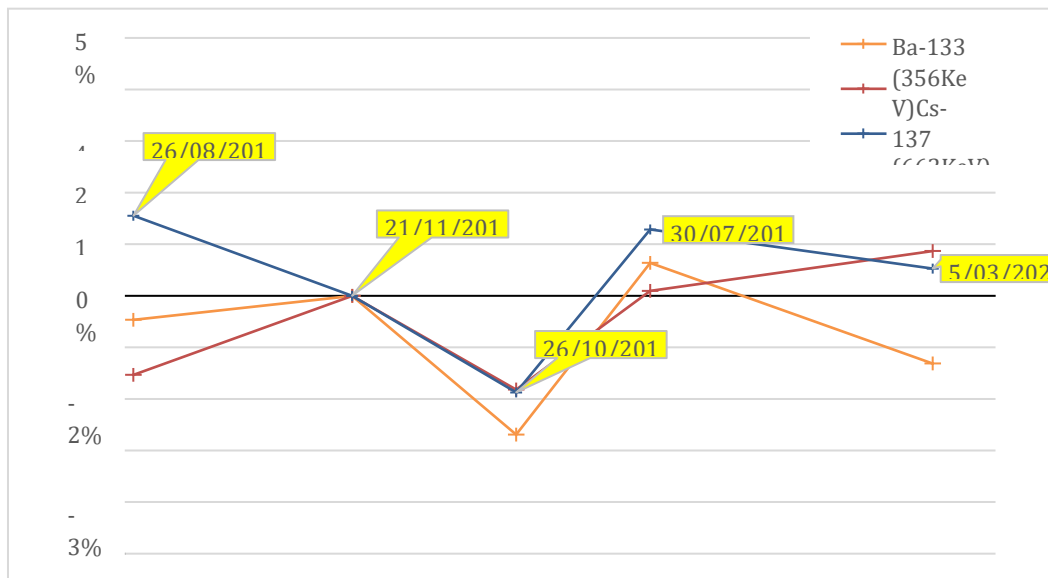
Fuente	Área (cps)	Tiempo vivo	incertidumbre
^{133}Ba	100118	542,180	317
^{137}Cs	100031	875,185	316
^{60}Co	100007	6634,900	317

Nota. La tabla presenta los resultados de área, tiempo vivo e incertidumbre de los radioisótopos empleados para hacer la calibración del espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra GI0515

Al ingresar los resultados obtenidos en una hoja de Excel creada por los investigadores del Servicio Geológico Colombiano, obtuvieron el diagrama de reportes de estabilidad del espectrómetro GL0515, el cual, para su último estudio, arrojó los resultados que se pueden observar en la Figura 27.

Figura 27.

Reportes de estabilidad del espectrómetro GL0515



Nota. La gráfica ilustra los resultados de los reportes de estabilidad de los últimos 4 años, del espectrómetro GL0515. Tomado de: Servicio Geológico Colombiano (S.G.C): 2021, Prueba De Estabilidad Espectrómetro Canberra GI0515

De la anterior gráfica se puede corroborar que el equipo se encuentra apto para arrojar resultados con excelente exactitud, ya que los porcentajes de variación de los radionúclidos empleados son menores al 3%, lo cual significa que el equipo se encuentra estable y no necesita ser recalibrado [71].

5. PLAN DE MUESTREO PARA LA DETECCIÓN DE ¹³¹I EN PRODUCTOS DE ORIGEN ANIMAL Y COBERTURA VEGETAL

Luego de recopilar información relacionada directamente con el radioisótopo de estudio, así como con las metodologías más eficientes para su cuantificación, se plantea la estrategia completa de muestreo para realizar la detección de ¹³¹I en las muestras de las matrices estudiadas. Es por esto que, en el presente capítulo se hablará de las características importantes para llevar a cabo la campaña de muestreo en el orden de cada matriz, así como los equipos e insumos necesarios, y el procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis correspondiente a cada muestra.

Cabe resaltar que a la única matriz a la cual se le realizó un seguimiento y análisis experimental fue la matriz leche, por ende, la información relacionada con el muestreo para la detección de ¹³¹I en matrices de cobertura vegetal y la matriz del huevo, se basan estrictamente en datos aportados y/o extraídos de fuentes bibliográficas, más no porque sean demostrados experimentalmente por los autores.

5.1 Características de muestreo

5.1.1 Tipo de muestras a analizar para cuantificar ¹³¹I

5.1.1.a Tipo de muestras de matriz de productos de origen animal. De acuerdo a una investigación realizada en el año 2017, por el grupo Semana Sostenible, de la Revista Semana, en la cual lograron constatar que los campesinos realizan actividades de riego de cultivos con agua del río Bogotá, y que incluso, el ganado toma agua directamente de este afluente [72]. Adicional a ello, según la investigación desarrollada por el Comité De Enlace Nórdico Para La Energía Atómica, N.K.A, una de las matrices de productos animales más asertivas para identificar presencia de ¹³¹I son los huevos y la leche [60]. Este último, al ser producido por vacas que están en contacto directo con el medio de transporte del radionúclido, el cual en este caso es el Río Bogotá y el pasto, es de vital importancia, ya que, a partir de esta matriz, se pueden establecer coeficientes de transferencia de ¹³¹I tanto en vacas, como en humanos, teniendo en cuenta la tasa de ingesta de agua contaminada, para el caso de las vacas, y de leche para el caso de los humanos. Por lo anterior, y debido a la revisión bibliográfica realizada para el desarrollo del presente proyecto, en la cual se encontró que los huevos y la leche son los

medios absorbentes con mayor grado de actividades detectables de ^{131}I [72], las matrices establecidas a estudiar en el presente proyecto son la leche y los huevos de gallina.

5.1.1.b Tipo de muestras de matriz vegetal. De acuerdo a un estudio realizado en el año 2009 por la Universidad Nacional de Colombia, junto a MinCiencias, se encontraron altas concentraciones de metales pesados, en diferentes matrices vegetales como lechuga, repollo, brócoli y apio [2]. Adicional a ello, según la investigación desarrollada por el Comité De Enlace Nórdico Para La Energía Atómica, N.K.A, una de las matrices vegetales más asertivas para identificar presencia de ^{131}I es la lechuga y el pasto [60]. Este último, al estar en contacto directo con el medio de transporte del radionúclido, el cual en este caso es el Río Bogotá, es de vital importancia, ya que, a partir de él, se pueden establecer coeficientes de transferencia de ^{131}I tanto en matrices de productos animales, cómo en matrices de cobertura vegetal, como lo son algunos tubérculos, legumbres, hortalizas y frutas. Por lo anterior, y debido a la revisión bibliográfica realizada para el desarrollo del presente proyecto, en la cual se encontró que la lechuga y el pasto son los medios absorbentes con mayor grado de actividades detectables de ^{131}I [74], las matrices establecidas a estudiar en el presente proyecto son la lechuga y el pasto.

5.1.2 Muestreo recomendado para el proyecto

5.1.2.a Tipo de muestreo recomendado en muestras de matriz vegetal. Se recomienda utilizar el muestreo de tipo no probabilístico, ya que, éste debe ser basado en información histórica e inspecciones visuales realizadas por el personal que conforma al equipo de muestreo [40]. Lo anterior debido a que los puntos a muestrear para tomar muestras de matrices vegetales deben ser relacionados con los puntos en los cuales se registraron actividades del radionúclido de estudio. Adicionalmente, los puntos de muestreo deben ser ubicados de acuerdo a la posición geográfica de los cultivos, por lo que no es viable utilizar muestreos probabilísticos directamente.

5.1.2.b Tipo de muestreo recomendado en muestras de matriz animal. De los tipos de muestreos que se pueden realizar en productos de origen animal mencionados en el marco teórico de este trabajo, se recomienda utilizar el muestreo compuesto, puesto que, para asegurar una representatividad efectiva entre las muestras recolectadas, se debe mezclar alícuotas de muestras de leche individuales. Igualmente sucede con las muestras de huevos; para tomar una alícuota representativa de muestra de huevo es necesario homogenizar el producto de dos huevos medianos, de modo que, para el caso de la leche, se debe mezclar toda la leche ordeñada,

para luego tomar la muestra, y para el caso del huevo, es necesario mezclar dos huevos para formar 1 muestra.

5.1.2.c Ubicación de los puntos de muestreo. Con el fin de determinar la existencia de ^{131}I en matrices vegetales y de productos de origen animal, y, teniendo como eje central la P.T.A.R El Salitre, se da paso a la determinación de los puntos de muestreos. Para ello, se tomaron en cuenta los resultados de los proyectos de tesis previos, los cuales se encuentran resumidos en el capítulo 2 de este trabajo. De igual forma, se tuvieron en cuenta factores adicionales como la cobertura vegetal y las condiciones de la misma, la posibilidad de estancamiento del agua del río en el tramo de la cuenca media (lo cual podría ocasionar acumulaciones de ^{131}I), la existencia de ganadería con fines lácteos y la distancia a la que se encontraban de la planta de tratamiento. Por todo lo anterior se lograron obtener 4 puntos estratégicos de muestreo, los cuales son presentados en la Figura 28.

Figura 28.

Ubicación de los puntos de muestreo a lo largo de la cuenca media del Río Bogotá



Nota. La figura ilustra los puntos de muestreo de matriz leche, ubicados a lo largo de la cuenca media del Río Bogotá

5.2 Equipos, reactivos, materiales e insumos requeridos

5.2.1 Elementos de protección e identificación personal

- Gafas de seguridad.
- Tapabocas antilíquido.
- Overol Blanco con tela antilíquido.
- Guantes de nitrilo.
- Botas de protección.
- Documentos de identificación (Carnet estudiantil, EPS).

5.2.2 Reactivos y conservantes

- Solución de fosfato.
- Formalina al 5%.

5.2.3 Insumos y materiales

- Recipiente de polietileno de 1000 mL con tapón y tapa.
- Embudo de filtración.
- Papel de filtro.
- Nevera térmica portátil.
- Termo gel refrigerante.
- Espátula.
- Vasos de precipitado de 500mL.
- Agitador magnético.
- Blindaje de plomo.
- Recipientes de polietileno de 120mL con tapa.
- Rotuladores.
- Software “maestro”.
- Probeta graduada de 100mL.
- Frasco lavador.
- Bolsas de papel.

5.2.4 Equipos

- Balanza analítica.

- Homogeneizador / Mixer.
- Espectrómetro de rayos gamma con detector Ge-HP.

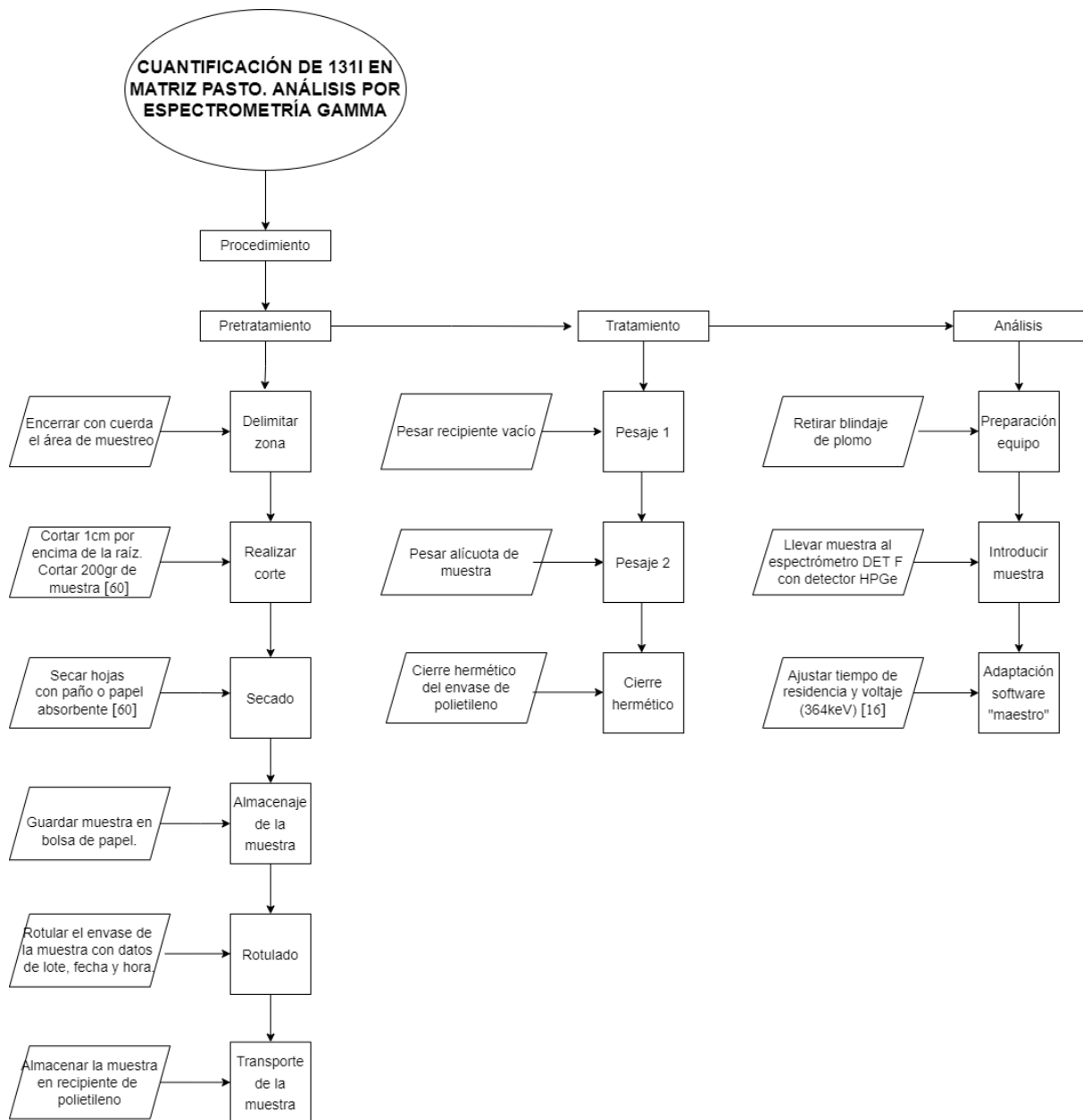
5.3 Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis para cada matriz

5.3.1 Procedimiento para analizar muestras de pasto

El procedimiento para analizar muestras de pasto es relativamente sencillo, dado que, para análisis de muestras para cuantificar ^{131}I en esta matriz no se requiere de adecuaciones químicas o biológicas para ser conservada, por lo tanto, el análisis se puede desarrollar en la muestra extraída de forma directa [60]. Sin embargo, su simplicidad asociada a la técnica de análisis no significa que se deban obviar los demás ítems durante el procedimiento de muestreo. Con base en lo anterior, en la Figura 29 se presentan los pasos que se deben cumplir durante el procedimiento de muestreo y análisis de muestras provenientes de matriz pasto.

Figura 29.

Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz pasto, para la cuantificación de ^{131}I



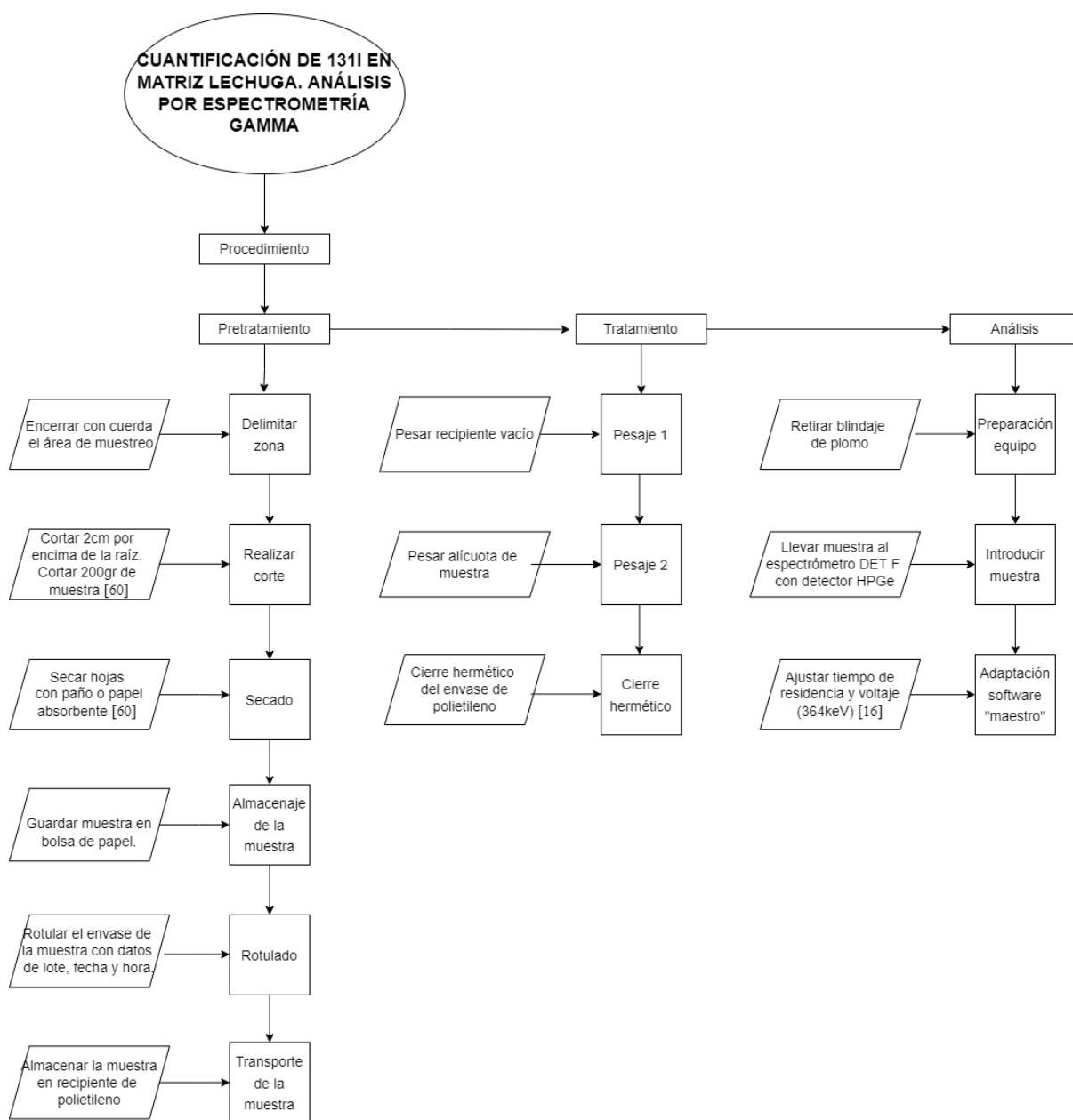
Nota. La figura presenta los pasos a realizar en cada etapa del procedimiento de muestreo y análisis de muestras de matriz pasto para determinar actividades de ^{131}I

5.3.2 Procedimiento para analizar muestras de lechuga

El procedimiento para analizar muestras de lechuga, al igual que el asociado a las muestras de pasto, es relativamente sencillo. Ésta matriz, al presentar similitudes con la matriz pasto, relacionadas con sus características y propiedades fisicoquímicas requiere de adecuaciones químicas o biológicas para ser conservadas con el fin de cuantificar ^{131}I [60]. No obstante, se deben tener en cuenta las recomendaciones en cada una de las etapas del procedimiento de toma de muestras y análisis de las mismas. Con base en lo anterior, en la Figura 30 se presentan los pasos que se deben cumplir durante el procedimiento de muestreo y análisis de muestras provenientes de matriz lechuga.

Figura 30.

Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz lechuga, para la cuantificación de ^{131}I



Nota. La figura presenta los pasos a realizar en cada etapa del procedimiento de muestreo y análisis de muestras de matriz lechuga para determinar actividades de ^{131}I

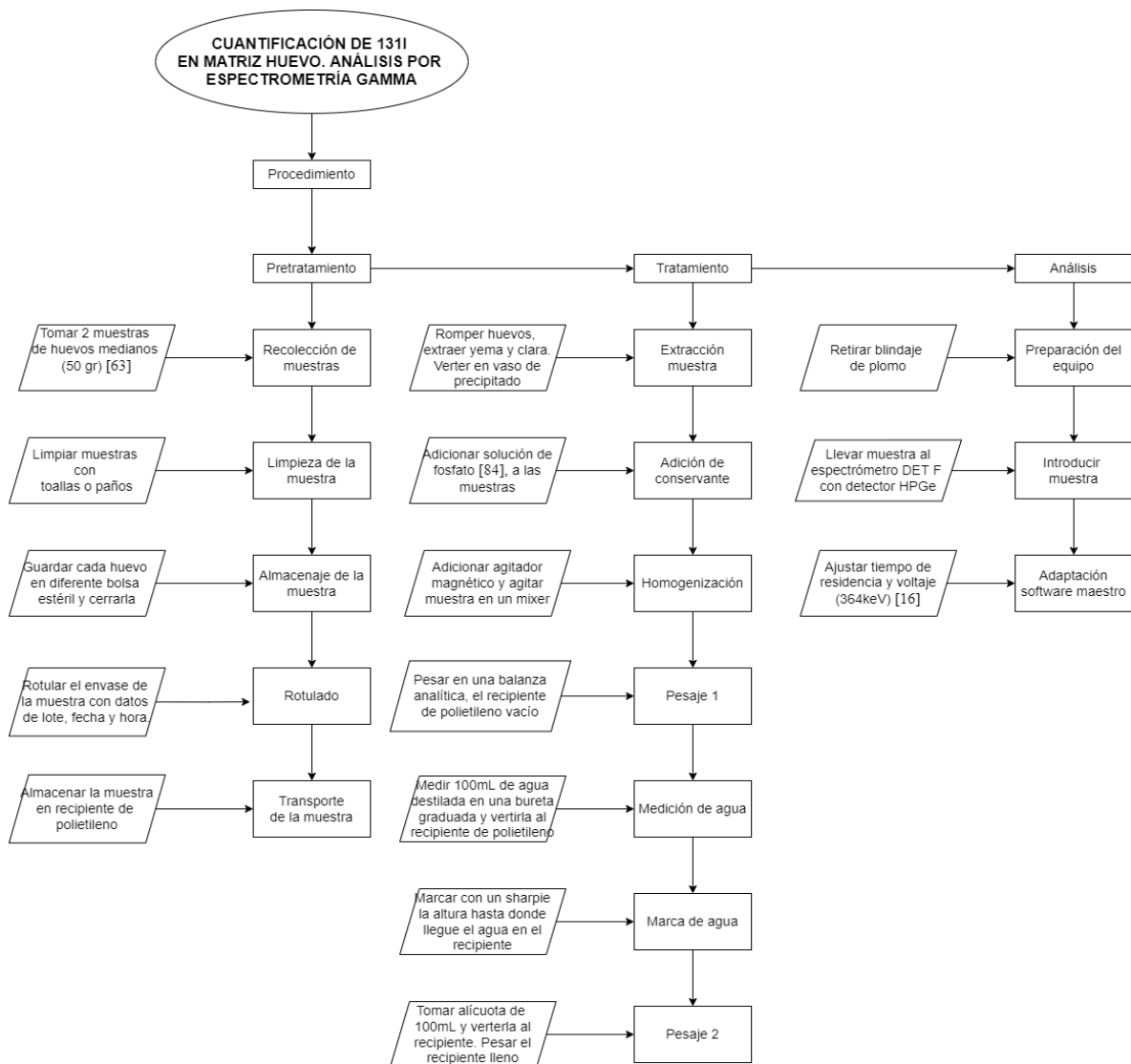
5.3.3 Procedimiento para analizar muestras de huevos

El procedimiento para analizar muestras de huevo con el fin de detectar ^{131}I , es relativamente es un poco más largo en comparación a los especificados para matrices vegetales. Esto se debe

a que, la matriz huevo sí necesita el aditamento de un conservante el cual se encargue de mantener estable la emulsión aún en un período de tiempo prolongado [73]. Con base en lo anterior, en la Figura 31 se presentan los pasos que se deben cumplir durante el procedimiento de muestreo y análisis de muestras provenientes de matriz huevo.

Figura 31.

Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz huevo, para la cuantificación de ^{131}I



Nota. La figura presenta los pasos a realizar en cada etapa del procedimiento de muestreo y análisis de muestras de matriz huevo para determinar actividades de ^{131}I

5.3.4 Procedimiento para analizar muestras de leche

La leche, al igual que el huevo requiere de la adición de conservantes químicos para mantener su vida útil, sin alterar propiedades organolépticas. Sin embargo, a pesar de que ambos necesiten de conservantes para mantenerse, éstos no utilizan los mismos.

Como el desarrollo experimental del presente proyecto se basó en el análisis de muestras de leche, a continuación, se presentan tanto teórica, como gráficamente, el protocolo empleado para el muestreo y análisis de muestras.

5.3.4.a Pretratamiento

- Preparar conservante de formalina al 5% para adicionar a los envases de muestreo [61].
- Desinfectar y preparar envases de polipropileno. Adicionar 0.5mL de formalina al 5%/Litro de leche [61].
- Desinfectar pezón de la vaca y secarlo con toalla absorbente [49].
- Ordeñar durante 5-7mins para evitar retención natural de leche [49].

Figura 32.

Ilustración de ordeño al bovino



Nota. La figura ilustra como se llevó a cabo el proceso de ordeño en los bovinos para la obtención de las muestras de leche

- Recolectar muestra en cantimploras de acero inoxidable [49].

Figura 33.

Ilustración del transvasado de la leche a cantimplora de acero inoxidable en la cual se mezclaban todas las muestras de leche recogidas, y se pasaban por el primer filtro

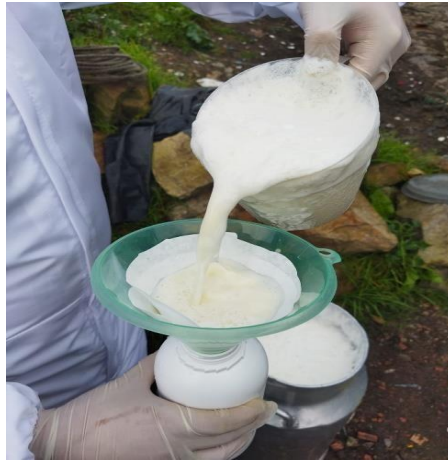


Nota. La figura ilustra cómo se trasvasaba la leche ordeñada a una cantimplora de acero inoxidable en la cual se mezclaban todas las muestras de leche recogidas, y se pasaban por el primer filtro

- Ubicar papel filtro dentro de un embudo de plástico sobre los envases. Filtrar muestra

Figura 34.

Proceso de filtrado de la muestra



Nota. La figura ilustra el proceso de envasado de la muestra del recipiente en que se tomó a uno hermético apto para llevar a laboratorio

- Rotular envase con datos de lote, fecha y hora de la recolección.

Figura 35.

Sticker rotulador de muestras

Lote:	_____
Número de Muestra:	_____
Nombre de Propietario:	_____
Fecha de Muestreo:	_____

Nota. Sticker adhesivo con el cual se rotulaban los frascos de polietileno en los que se analizan las muestras

- Almacenar muestra sellada en una nevera de icopor

Figura 36.

Proceso de refrigeración



Nota. La figura ilustra el proceso de refrigeración para conservar las propiedades de la muestra en el proceso de desplazamiento hasta los laboratorios donde será analizada.

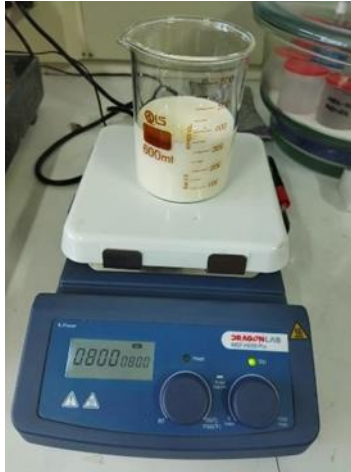
- Mantener cadena de frío utilizando bolsas de gel refrigerante (no exceder los 5°C durante el transporte) [74].
- Sellar nevera con cinta adhesiva para conservar cadena de custodia

5.3.4.b Tratamiento de la muestra en el laboratorio

- Verter 300 mL de la muestra en un vaso precipitado de 500mL.
- Adicionar un agitador magnético al vaso precipitado, y con la ayuda de un vortex o mixer, agitar durante 15 minutos a velocidad constante de 900 rpm.

Figura 37.

Agitación de la muestra



Nota. Esta figura ilustra el proceso de agitación de la muestra en el vortex

- Una vez terminado el periodo de agitación, medir el pH de la leche con el fin de determinar si ha existido o no actividad bacteriana que pueda alterar los resultados de la medición; el pH no puede descender de un valor de 6,3 [74].

Figura 38.

Medición de pH a la muestra



Nota. Esta figura ilustra el proceso de medición de pH de la muestra analizada

- Pesar vacío el recipiente de 120mL de polietileno.

Figura 39.

Pesaje de recipiente vacío de polietileno



Nota. Esta figura ilustra el ejemplo del pesaje de un recipiente vacío de polietileno

- Realizar una marca de agua con agua destilada, en los recipientes de polietileno. Para ello, medir 100mL de agua destilada en una bureta graduada, y agregarla a un recipiente de polietileno. Con la ayuda de un marcador sharpie, marcar el menisco, retirar el agua destilada y secar el recipiente de propileno con toallas absorbentes.

Figura 40.

Marca de agua en recipientes de polietileno



Nota. Esta figura ilustra el ejemplo de marca de agua en los recipientes de polietileno en los cuales se almacena la muestra para su correspondiente análisis

- Tomar una alícuota de 100mL de muestra y verterla en el recipiente de polietileno.
- Realizar pesaje del recipiente lleno.

Figura 41.

*Pesaje de muestra contenida
en recipiente de polietileno*



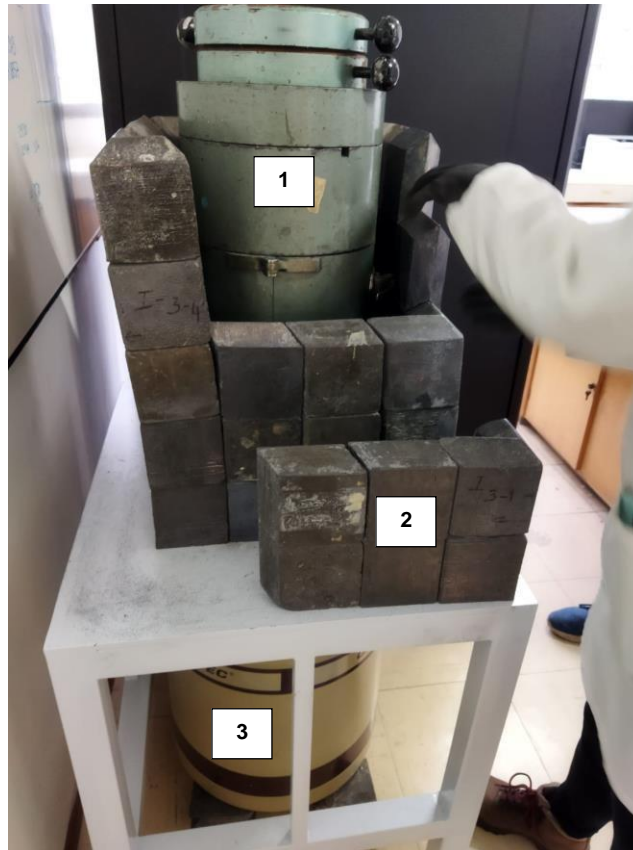
Nota. Esta figura ilustra el ejemplo de pesaje de recipiente de polietileno con alícuota de muestra contenida en él

5.3.4.c Análisis

- Retirar los bloques de blindaje de plomo que obstruyan el acceso a la puerta del espectrómetro, como se muestra en la siguiente ilustración.

Figura 42.

Desmontaje del recubrimiento de protección del blindaje en plomo



Nota. Esta figura ilustra el desmontaje del blindaje de plomo que recubre el espectrómetro gamma DETF. Donde 1 es el espectrómetro de rayos gamma con Ge-HP, 2 es el blindaje de plomo y 3 es el enfriador criogénico

- Llevar el recipiente de polietileno previamente lleno y pesado, al espectrómetro con detector de Ge-HP, tal y como se ilustra a continuación.

Figura 43.

Montaje de la muestra en el espectrómetro gamma DET F

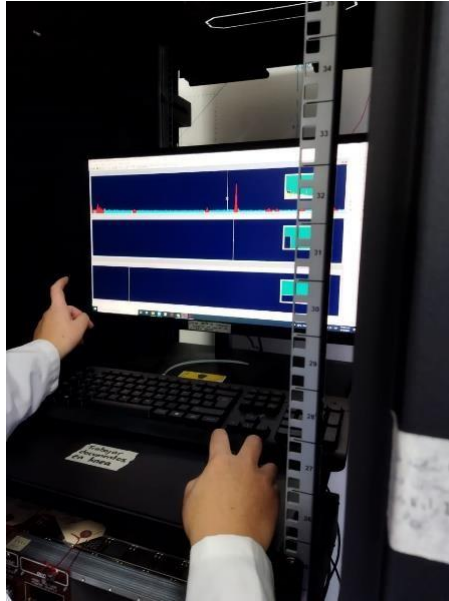


Nota. Esta figura ilustra el montaje de la muestra a analizar dentro del espectrómetro gamma DET F. Donde 1 es el espectrómetro de rayos gamma con Ge-HP. 2 es el lugar de ubicación de la muestra, 3 es la puerta del espectrómetro de rayos gamma con Ge-HP y 4 es blindaje de plomo

- Ajustar el tiempo de residencia de la muestra y la potencia requerida por el espectrómetro para medir ^{131}I , en el software Maestro, empleado para el análisis y lectura de las mismas.

Figura 44.

Configuración del equipo para la lectura de las muestras

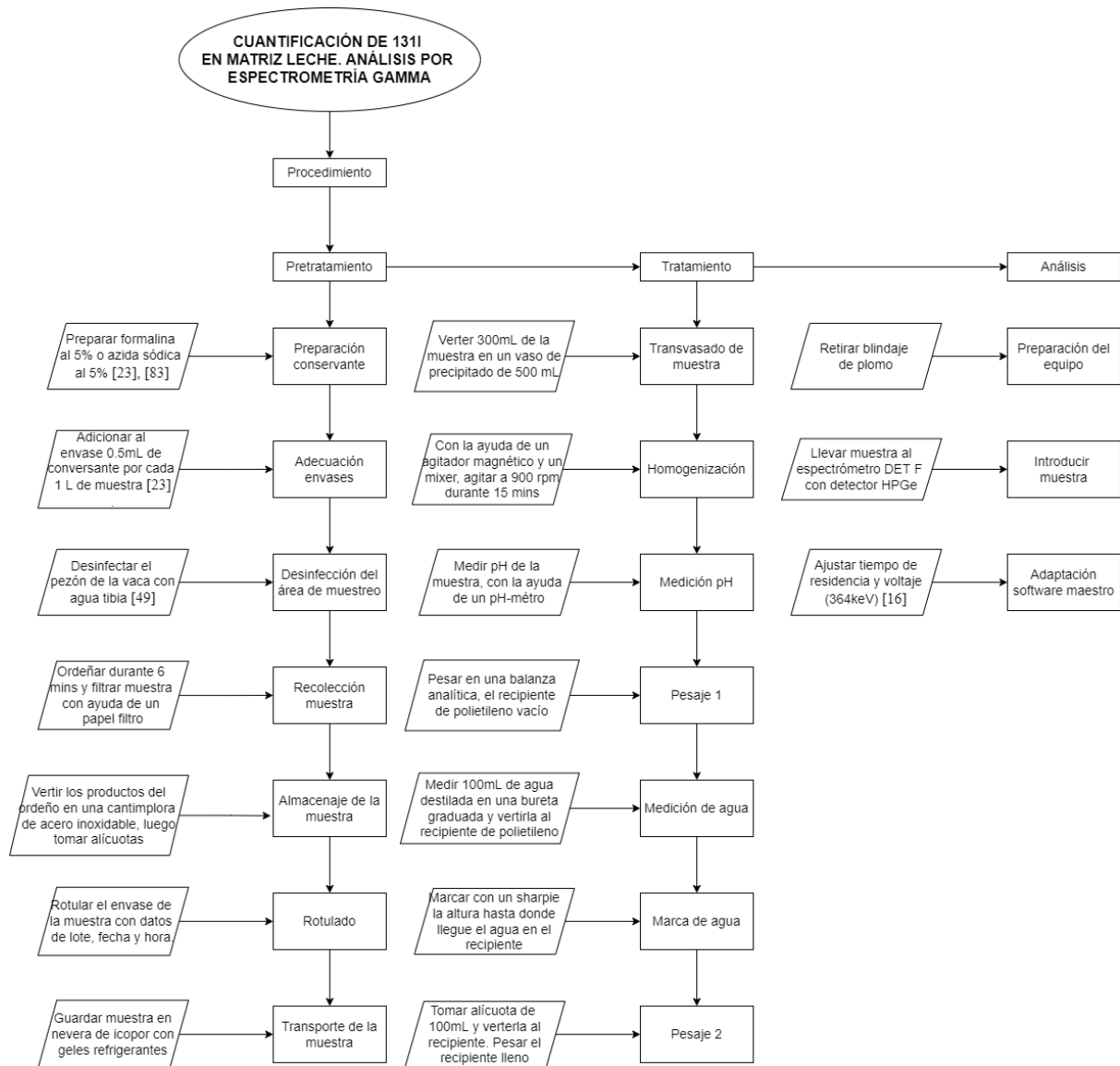


Nota. Esta figura ilustra el ajuste del voltaje y del tiempo de residencia de la muestra dentro del espectrómetro gamma DET F, por medio del software Maestro.

De manera fusionada, en la Figura 45 se presenta el procedimiento de cada una de las etapas anteriormente mencionada para medir concentraciones de ^{131}I en matriz leche.

Figura 45.

Procedimiento de pretratamiento, tratamiento y análisis de muestras de matriz leche, para la cuantificación de ¹³¹I



Nota. La figura presenta los pasos a realizar en cada etapa del procedimiento de muestreo y análisis de muestras de matriz leche para determinar actividades de ¹³¹I

6. REPORTE DE RADIATIVIDAD EN MATRIZ LECHE

Antes de empezar el procedimiento de análisis y tomando en cuenta el error humano, se previó que los pesos de cada muestra variarían, puesto que no siempre se mediría de manera exacta el agua con el cual se realizaba la marca de agua, o en su defecto, no siempre se contaría con la precisión exacta para medir los 100mL de muestra. Por lo anterior, y con el fin de calcular el peso neto de las muestras para obtener una mayor exactitud en los resultados, se pesó tanto vacío como lleno, el recipiente de polietileno en el cual se almacenaba la muestra a analizar para ingresarla al espectrómetro. Tales valores se observan en la Tabla 16, en la cual también se encuentra los resultados de los pesos netos muestreados en cada análisis.

Tabla 16.

Pesos de los recipientes de polietileno antes de la muestra (vacío), con la muestra (lleno), y peso neto en gramos y kilogramos

Muestra	w(g) Fracos+tapas	w (g) con muestra de leche	w neto (g)	w neto (Kg)
Leches 01	19,009	119,353	100,345	0,100
Leches 02	17,830	123,548	105,718	0,106
Leches 03	17,940	121,711	103,771	0,104
Leches 04	18,122	121,970	103,849	0,104
Leches 05	17,740	128,104	110,364	0,110
Leches 06	18,498	125,578	107,080	0,107
Leches 07	17,930	122,796	104,866	0,105
Leches 08	18,861	126,381	107,520	0,108
Leches 09	18,534	119,910	101,376	0,101
Leches 10	19,995	119,075	99,080	0,099
Leches 11	17,850	117,244	99,394	0,099
Leches 12	18,070	123,497	105,427	0,105
Leches 13	19,103	121,838	102,735	0,103
Leches 14	18,674	119,205	100,531	0,101
Leches 15	19,103	123,495	104,392	0,104
Leches 16	18,466	123,448	104,982	0,105

Nota. La tabla presenta los pesos del recipiente de polietileno vacío, lleno y los pesos netos tanto en gramos como en kilogramos

Por otra parte, para los casos de análisis de las muestras correspondientes al desarrollo experimental de este proyecto, los valores de lectura no se mantuvieron de forma estandarizada. De manera que, el análisis de las muestras se desarrolló en diferentes tiempos de lectura como

se evidencia en la Tabla 2, adicionado un tiempo muerto, el cual se esperaba que fuese siempre un valor menor al 5%. Lo anterior se llevaba a cabo con el principal objetivo de reducir la incertidumbre de las muestras. De esta forma, se construyó el espectro de cada una de las 16 muestras (Ver ejemplo en Figura 17), los cuales, una vez obtenidos, el software maestro procedía a realizar los cálculos correspondientes basándose en la información de interés.

Tabla 17.

Tiempos de muestreo: fecha y hora de la toma y análisis de muestras

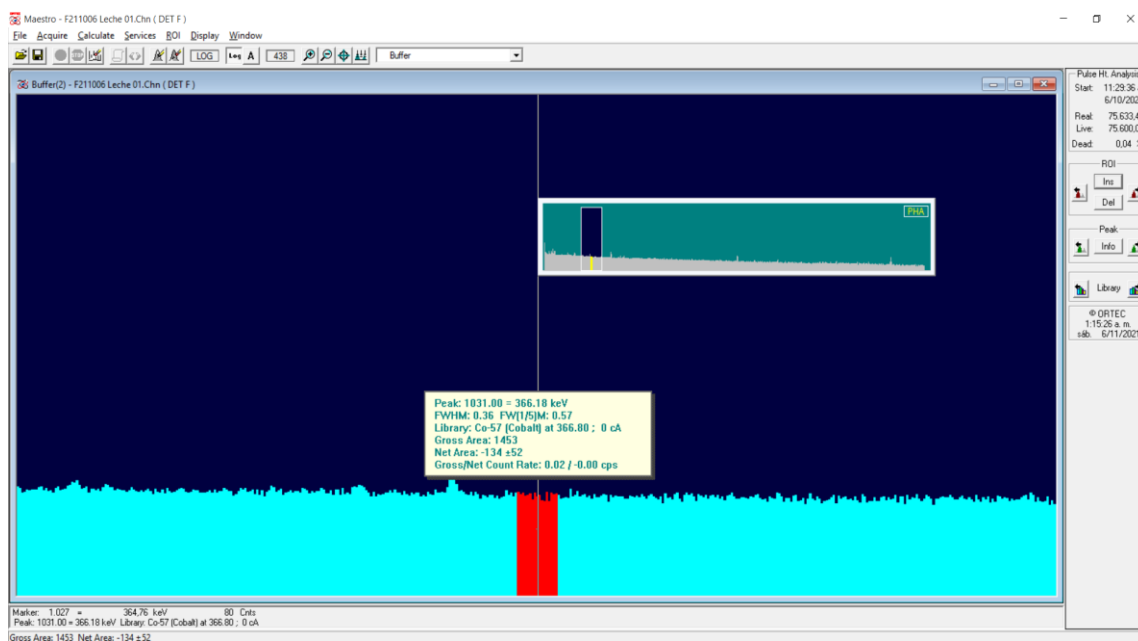
Muestra	Fecha y hora de toma de muestra		Fecha y hora del ingreso de la muestra a análisis		MAESTRO
					Tiempo de lectura en F
Leches 01	06/10/2021	05:40 AM	06/10/2021	11:29 AM	75600
Leches 02	06/10/2021	06:04 AM	07/10/2021	04:59 PM	84600
Leches 03	06/10/2021	07:15 AM	08/10/2021	06:22 PM	222769,42
Leches 04	11/10/2021	05:15 AM	11/10/2021	10:51 AM	77400
Leches 05	11/10/2021	05:35 AM	12/10/2021	09:01 AM	82800
Leches 06	11/10/2021	06:10 AM	13/10/2021	08:31 AM	86400
Leches 07	11/10/2021	07:25 AM	14/10/2021	05:06 PM	86000
Leches 08	11/10/2021	08:10 AM	15/10/2021	05:10 PM	223200
Leches 09	19/10/2021	05:15 AM	19/10/2021	10:00 AM	77400
Leches 10	19/10/2021	06:35 AM	20/10/2021	08:04 AM	82800
Leches 11	19/10/2021	07:25 AM	21/10/2021	04:38 PM	82800
Leches 12	19/10/2021	07:50 AM	22/10/2021	03:46 PM	223200
Leches 13	26/10/2021	07:50 AM	26/10/2021	11:43 AM	86000
Leches 14	26/10/2021	07:50 AM	27/10/2021	11:44 AM	86000
Leches 15	26/10/2021	07:50 AM	28/10/2021	11:44 AM	86000
Leches 16	26/10/2021	07:50 AM	29/10/2021	12:30 PM	239400

Nota. La tabla presenta los tiempos generales de muestreo. En ella se puede observar la fecha y hora en la que se realizó cada toma de muestra, así como la fecha y hora de la lectura del espectro de cada de estas; así mismo ilustra el tiempo de lectura de cada muestra en el espectrómetro gamma con detector de Ge-HP, DET F

Cabe enfatizar que, para llegar a la obtención de la información de interés como el área neta, la incertidumbre y la integral, con las cuales se realizaba el cálculo del factor de decaimiento desde el momento en que se obtenía la muestra, hasta su análisis y posteriores cálculos, se determinó primero la región de interés (ROI), la cual, para todos los casos, era la zona que daba origen al fotópico de interés.

Figura 46.

Ejemplo de espectro arrojado por el software Maestro



Nota. La imagen ilustra el ejemplo de un espectro de una muestra de leche analizada en el software Maestro. En ella se puede observar la región de interés (ROI)

6.1 Cuantificación de actividad de ^{131}I presente en matriz leche

El proceso de cuantificación del radioisótopo se llevó a cabo con ayuda del software Maestro. Sin embargo, con el fin de corroborar los resultados obtenidos de esta herramienta informática, se elaboró el cálculo en el programa Excel, en el que se evidenció que este método presenta una exactitud menor al momento de extraer la información.

Para evitar la presentación extensa de datos en este capítulo, a continuación, se presentan los resultados de la cuantificación de la actividad de ^{131}I extraídos del programa Excel. Si es de interés, el lector puede consultar la totalidad de los espectros de ^{131}I en el Anexo 1.

Tabla 18.

Actividad de ^{131}I y resultados generales obtenidos del análisis de 16 muestras de leche

Muestra	MAESTRO					
	Área Neta	Incertidumbre	Integral	Tiempo de lectura en DET F (Seg)	Actividad Calculada [Bq/kg]	Límite de detección[Bq/kg]
Leches 01	0	52	1453	75600	No detectable	0,825
Leches 02	0	56	1700	84600	No detectable	0,843
Leches 03	0	88	4296	222769,42	No detectable	0,602
Leches 04	0	53	1547	77400	No detectable	0,803
Leches 05	0	54	1612	82800	No detectable	0,782
Leches 06	0	55	1682	86400	No detectable	0,858
Leches 07	0	55	1679	86000	No detectable	0,984
Leches 08	0	89	4332	223200	No detectable	0,687
Leches 09	75	52	1520	77400	No detectable	0,793
Leches 10	0	55	1644	82800	No detectable	0,873
Leches 11	0	54	1623	82800	No detectable	0,969
Leches 12	0	88	4282	223200	No detectable	0,636
Leches 13	0	54	1624	86000	No detectable	0,747
Leches 14	0	56	1735	86000	No detectable	0,860
Leches 15	64	54	1662	86000	No detectable	0,867
Leches 16	0	92	4680	239400	No detectable	0,620

Nota. La tabla presenta los resultados obtenidos del software Maestro para la cuantificación de la actividad de ^{131}I , a partir del análisis espectrométrico de las 16 muestras de leche

De la Tabla 18 se puede observar que, de los 16 análisis realizados a muestras de leche, se encontró que todos los valores obtenidos son de concentraciones de ^{131}I inferiores al límite de detección, de modo que estos resultados no se consideran como peligrosos y/o tóxicos. Cabe resaltar que el límite de detección que se calcula para cada una de las muestras, está basado en la norma ISO 11929 de 2010, y este, es considerado como el nuevo cero absoluto, es decir, es tomado como el punto de partida en el análisis de los resultados.

6.2 Cuantificación de actividad de ^{40}K presente en matriz leche

Al igual que en el caso del ^{131}I , el proceso de cuantificación de ^{40}K se llevó a cabo con ayuda del software Maestro. Sin embargo, también se corroboraron los resultados en el programa Excel, obteniendo resultados de actividades que oscilaban entre 38,53 Bq/Kg y 60,53 Bq/Kg tal y como se ejemplifica en la Tabla 19.

Tabla 19.

Actividad de ^{40}K y resultados generales obtenidos del análisis de 16 muestras de leche

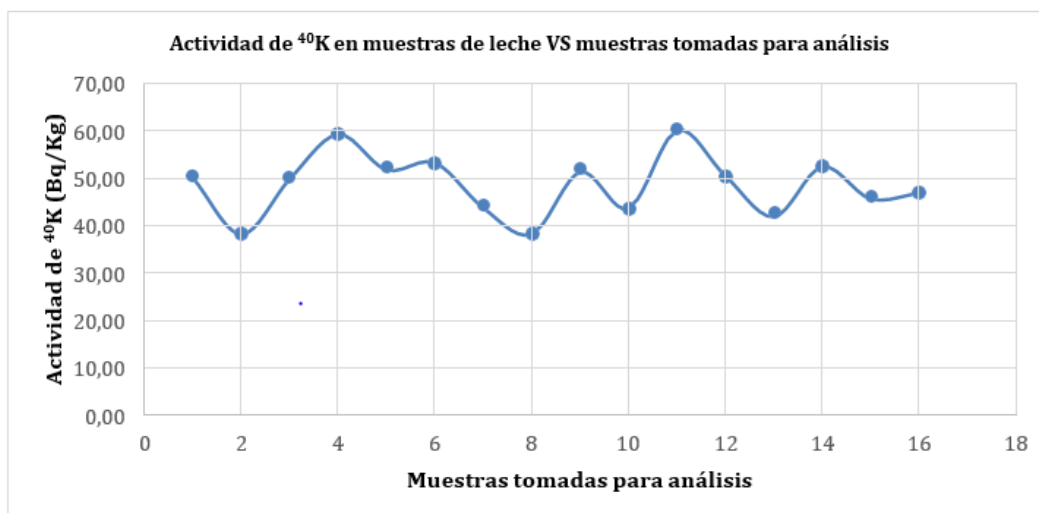
Muestra	MAESTRO			
	Area neta K40	Incertidumbre 40K	Actividad calculada [Bq/kg]	% 40K
Leches 01	971,000	59	50,44	0,13
Leches 02	1280,000	59	38,53	0,10
Leches 03	3327,000	93	50,19	0,13
Leches 04	1274	55	59,59	0,15
Leches 05	1307	56	52,10	0,14
Leches 06	1362	60	53,59	0,14
Leches 07	1206	59	44,08	0,11
Leches 08	2965	95	38,56	0,10
Leches 09	1159	55	51,64	0,13
Leches 10	1127	60	44,01	0,11
Leches 11	1339	59	60,43	0,15
Leches 12	3386	94	50,83	0,13
Leches 13	1168	61	42,24	0,11
Leches 14	1297	59	52,77	0,13
Leches 15	1230	61	46,00	0,12
Leches 16	3481	99	47,19	0,12

Nota. La tabla presenta los resultados obtenidos del software Maestro para la cuantificación de la actividad de ^{40}K , a partir del análisis espectrométrico de las 16 muestras de leche

A continuación, se ilustra en un diagrama de dispersión con marcadores, los resultados de las actividades de ^{40}K contenidas en las muestras de leche analizadas.

Figura 47.

Actividad de ^{40}K Vs Muestras tomadas para análisis de leche

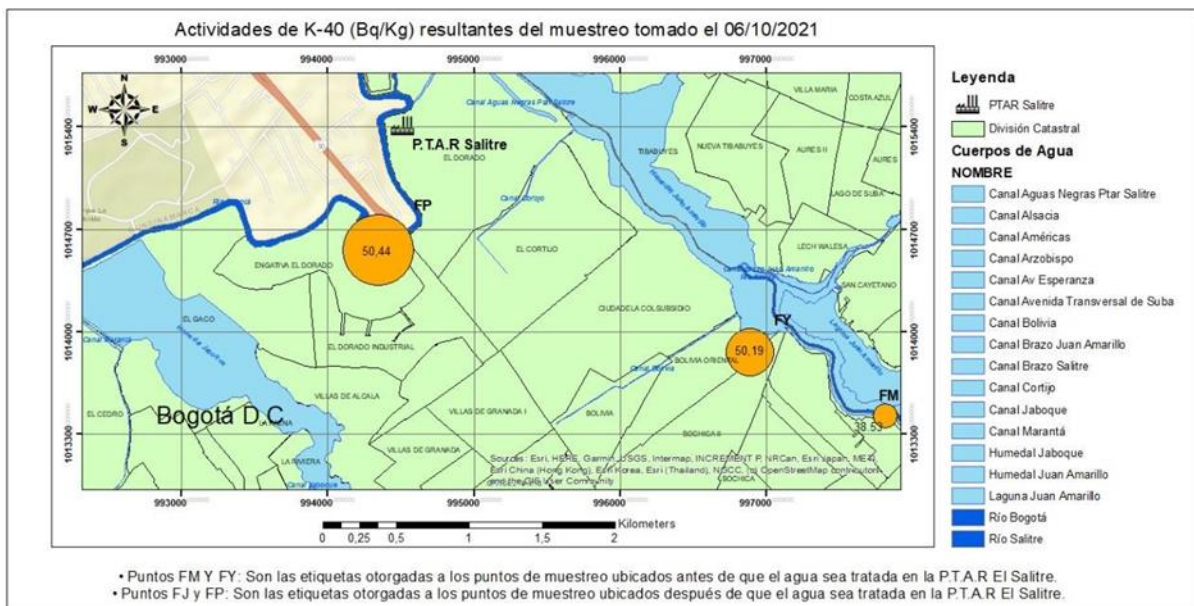


Nota. El diagrama de dispersión presenta los resultados de la actividad de ^{40}K VS las muestras tomadas para análisis.

A pesar de que el diagrama presentado en la Figura 47 ilustra claramente los valores de actividad de ^{40}K obtenidos durante el análisis de las muestras, es necesario conocer y relacionar los valores de actividades de ^{40}K obtenidos, respecto a los puntos de muestreo utilizados. Es por eso que a continuación se presenta una serie de mapas de la zona de muestreo, los cuales están clasificados por la fecha de muestreo, e ilustran las actividades obtenidas con relación a los puntos de muestreo utilizados.

Figura 48.

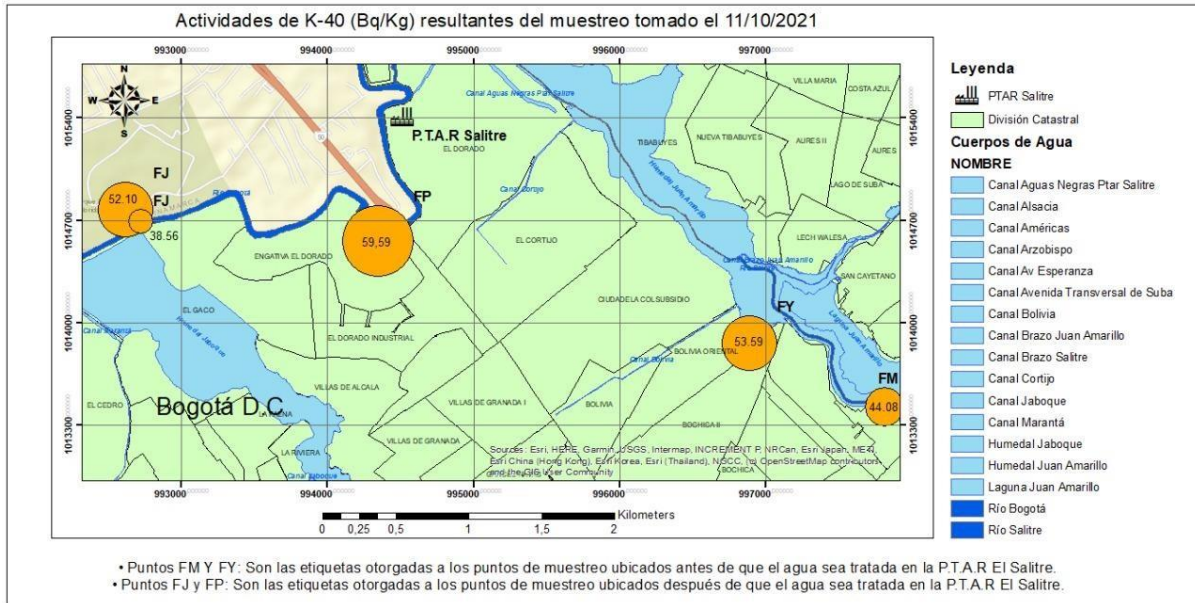
Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 06/10/2021



Nota. Esta figura ilustra la relación de los puntos de muestreo con las actividades de ^{40}K obtenidas en los mismos

Figura 49.

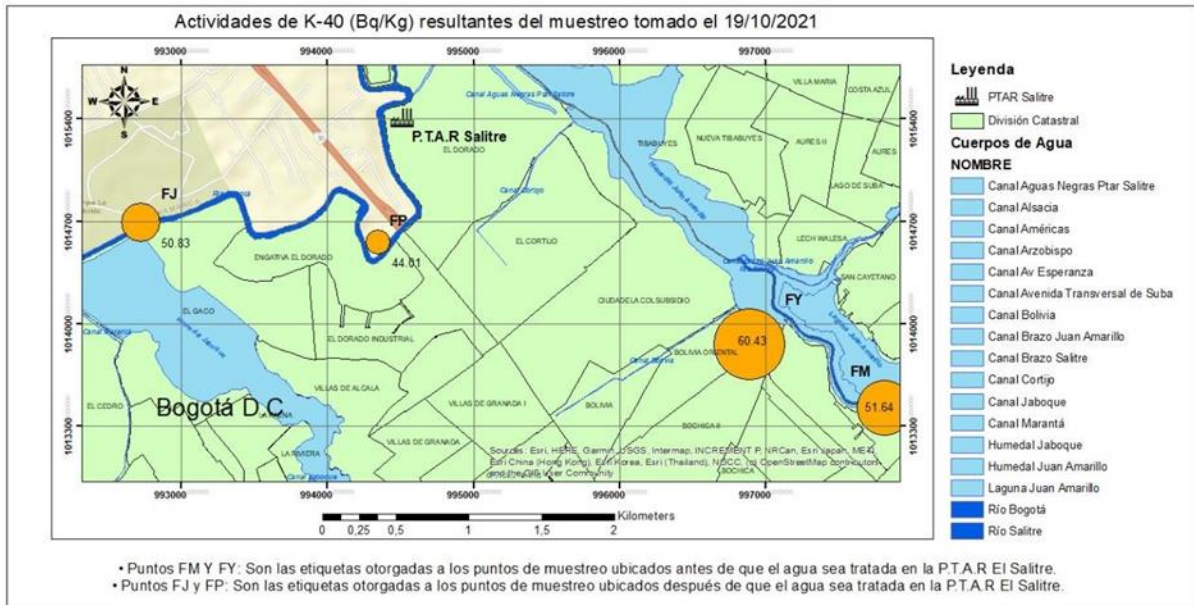
Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 11/10/2021



Nota. Esta figura ilustra la relación de los puntos de muestreo con las actividades de ^{40}K obtenidas en los mismos

Figura 50.

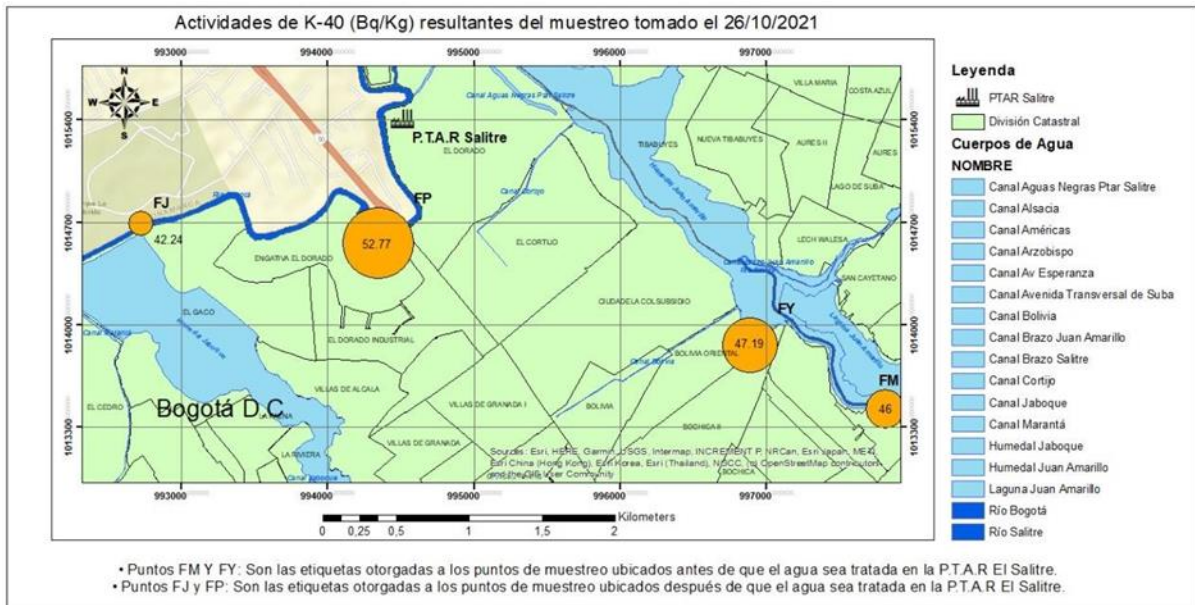
Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 19/10/2021



Nota. Esta figura ilustra la relación de los puntos de muestreo con las actividades de ^{40}K obtenidas en los mismos

Figura 51.

Relación de puntos de muestreo con actividades de ^{40}K resultantes del muestreo realizado el 26/10/2021



Nota. Esta figura ilustra la relación de los puntos de muestreo con las actividades de ^{40}K obtenidas en los mismos

De las figuras anteriormente presentadas se observa existen puntos los cuales, en todos los resultados de muestreo registraron mayor acumulación de ^{40}K en las muestras de leche analizadas. De esta manera, se puede encontrar a FP ocupando el primer lugar con mayor actividad de ^{40}K registrada, seguido de FY, FM y finalizando con FJ. Lo anterior puede atribuirse a la capacidad de absorción de ^{40}K que tengan los alimentos con los que son alimentados los bovinos.

7. CONCLUSIONES

Se realizó la revisión de la información existente referente a los niveles de actividad del radioisótopo ^{131}I en las aguas que poseen vertientes de la P.T.A.R. El Salitre y la cuenca media del río Bogotá, y se encontró que, en todos los puntos de muestreo empleados por los investigadores, existían valores de concentración de este elemento, los cuales, en algunos casos, se encontraban tan elevados, al punto de llegar casi al límite de lo permitido actualmente por la normativa de calidad del agua que rige en Colombia.

Se determinó la zona de influencia próxima a la ladera de la cuenca media del Río Bogotá, lo cual permitió establecer 4 puntos de muestreo, de los cuales dos se encontraban ubicados antes del ingreso del agua a la P.T.A.R El Salitre, y dos ubicados después de la salida de esta.

Se seleccionaron las técnicas de adecuación de muestras y detección de ^{131}I en matrices vegetales de pasto y lechuga, así como en matrices de productos de origen animal como huevos de gallina y leche de vaca, de las cuales se logra concluir que, para detección de ^{131}I en matrices de vegetales, no es necesaria la adición de componentes químicos y/o biológicos que actúen como conservantes. Mientras que, para matrices de leche y huevo sí se requiere la adición de conservantes con el fin de evitar la descomposición durante el análisis de las muestras de estos. De igual manera, se logró corroborar que el equipo de detección más eficiente para cuantificar presencia de ^{131}I en matrices de diversos orígenes es el espectrómetro gamma con detector semiconductor de Germanio Hiperpuro.

Se planteó una estrategia de muestreo y detección de ^{131}I , la cual se llevó a cabo de forma experimental para la matriz leche, y de forma teórica, basándose en aportes bibliográficos, para el caso de las matrices huevo, lechuga y pasto como se puede observar en las Figuras 29, 30, 31 y 32.

De acuerdo a los resultados de los análisis de las muestras de leche correspondientes al desarrollo experimental de este trabajo, se determinó que la leche que se obtiene de los bovinos en la zona muestreada se encuentra libre de ^{131}I , y es apta para ser consumida y/o entregada a los productores de lácteos.

Los niveles por debajo del límite de detección de radioisótopo pueden deberse a que los bovinos que habitan cerca a la rivera de la cuenca media del río Bogotá no se abastecen directamente del afluente hídrico, sino de la red de agua potable a la cual se han acogido los ganaderos y han incorporado a sus fincas.

Parte fundamental de la composición de la leche es la calidad del agua que consumen los bovinos por lo cual es fundamental garantizar que esta cumpla con los parámetros requeridos por la normativa para que no se contamine el recurso hídrico y posteriormente el producto lácteo.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Radiology Info, “*Radioiodine (I -131) Therapy for Hyperthyroidism.*”, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://www.radiologyinfo.org/en/info/radioiodine>. [Acceso: may. 11, 2021]
- [2] L. A. Ospina Perdigón, “*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*” Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2018. [en línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.11839/6727>. [Acceso: mar. 21, 2021]
- [3] Lenntech B.V, “*Yodo (I) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente*” Water Treatment, 2018. [en línea]. Disponible en: <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/i.htm> [Acceso: jun. 02, 2021].
- [4] M. del R. Obando Rodriguez, “*Evaluación de parámetros físico - químicos en tres marcas de sal de consumo nacional en el ecuador continental*” Tesis, pp. 1–95, 2017. [en línea]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/5081/1/UPS-CYT00109.pdf>. [Acceso: abr. 18, 2021]
- [5] Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro e Enfermedades, “*Resumen de Salud Pública: Yodo (Iodine) | PHS | ATSDR.*”, 2016. [en línea]. Disponible en: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs158.html. [Acceso: abr. 18, 2021].
- [6] Solution for human progress, “*Aplicaciones del Yodo.*”, 2018. [en línea]. Disponible en: <https://www.sqm.com/estudio/aplicaciones-del-yodo/>. [Acceso: abr. 22, 2021]
- [7] E. T. Mora Carrillo and C. D. Tello Reino, “*Propuesta para la remoción de 131I a nivel generadores debido a su concentración en los flujos de la PTAR del Salitre*” Fundación Universidad de América, 2020. [En Línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7767/1/6121859-2020-1-IQ.pdf>. [Acceso: May. 28, 2021]
- [8] Foro Nuclear, “*¿Qué son los radioisótopos?*”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.foronuclear.org/descubre-la-energia-nuclear/preguntas-y-respuestas/sobre-fisica-nuclear/que-son-los-radioisotopos/>. [Acceso: may. 28, 2021]
- [9] Chegg.com, “*Learn About Artificial Radioactivity | Chegg.com.*”, [En Línea]. Disponible en: <https://www.chegg.com/learn/physics/introduction-to-physics/artificial-radioactivity>. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [10] Dpto de CCNN.Col.N.S del Carmen-Asunción Catalina, “*La radiactividad*”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.carmenmostoles.es/wp-content/uploads/2018/02/FQ4->

- RADIATIVIDAD.pdf. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [11] Universidad Complutense de Madrid, “*Carbono 14*”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.ucm.es/arqueoanalisis/carbono-catorce>. [Acceso: mar. 10, 2021]
- [12] M. Rentería Villalobos, “*Estudio de la radiactividad natural en la ciudad Aldama, Chihuahua*.” Centro de Investigación en materiales avanzados, 2003. [En Línea]. Disponible en: <https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/614/1/Tesis%20Marusia%20Renter%20C3%ADa%20Villalobos%20%20%20283%29.pdf>. [Acceso: nov. 08, 2021]
- [13] Enresa, “*Radiactividad*”. [En Línea]. Disponible en: www.enresa.es. [Acceso: abr. 21, 2021]
- [14] Organismo Internacional de Energía Atómica, “*Nociones básicas sobre la radiación para el diagnóstico y el tratamiento médico seguro / OIEA*.” [En Línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/nociones-basicas-sobre-la-radiacion> [Acceso: abr. 21, 2021]
- [15] Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) and Organismo mundial de la salud (WHO), “*Aspectos básicos de la radiación y la protección radiológica*”. [En Línea]. Disponible en: https://www-ns.iaea.org/downloads/iec/radiation-basics-leaflet_s.pdf. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [16] L. Alba, “*Medición de límites de descarga para vertimientos generados en medicina nuclear*” Universidad Tecnológica y Pedagógica de Colombia (UPTC), Tunja, 2015. [En Línea]. Disponible en: <https://repositorio.uptc.edu.co/handle/001/1502>. [Acceso: may. 07, 2021]
- [17] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Radioisótopos*”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/radioisotopos>. [Acceso: jul. 17, 2021]
- [18] D. L. Alonso, V. M. Pabón, G. A. Parrado, and J. C. Parada, “*Revisión sobre la producción de radionúclidos en reactores nucleares y sus aplicaciones como radiotrazadores*” *Rev. Investig. y Apl. Nucl.*, pp. 6–23, 2017, [En Línea]. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/17>. [Acceso: oct. 12, 2021]
- [19] J. S. Lagos and E. M. López, “*Desarrollo de capacidades para la operación del reactor nuclear IAN-RI*” *Rev. Investig. y Apl. Nucl.*, no. 2, pp. 15–30, 2018. [En Línea]. Disponible en: <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/invapnuclear/article/view/17>. [Acceso: jun. 01, 2021]

- [20] Organismo internacional de energía Atómica (IAEA), “*Emisiones al medio ambiente de las industrias nucleares, normas de seguridad*”. [En Línea]. Disponible en: <https://www.iaea.org/es/temas/emisiones-al-medio-ambiente>. [Acceso: jun. 19, 2021]
- [21] J. M. Osores, “*Contaminación radiactiva ambiental en el neotrópico*,” *Biol.*, vol. 6, no. 2, pp. 155–165, 2008. [En Línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3989371&info=resumen&idioma=SPA>. [Acceso: may. 03, 2021]
- [22] A. Garcia Alvarez, J. Ibañez Marti, and A. Perez Gonzalez, “*Centrales nucleares e impacto ambiental en el medio edáfico*”, 1993. [En Línea]. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/en/parques-nacionales-oapn/publicaciones/ecologia_07_03_tcm38-100780.pdf. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [23] IAEA. “*Measurement of radionuclides in food and the environment. A guidebook*”, vol. 11, no. 2, 1989. [En Línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/041/20041399.pdf. [Acceso: nov. 14, 2021]
- [24] C. R. McLellan, J. V. Whiteman, L. E. Walters, and G. V. Odell, “*Evaluation of the K40 counter as a predictor of lean in beef cattle*,” *Okla Agr Exp Sta Misc Publ*, 1969. [En Línea]. Disponible en: <https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301222433>. [Acceso: nov. 05, 2021]
- [25] S. Ripol Girona, “*Contaminación radiactiva de los alimentos. Su importancia sanitaria*,” *An. Med. Cir.*, vol. 58, no. 252, pp. 133–151, 1978. [En Línea]. Disponible en: <https://www.raco.cat/index.php/AnalesMedicina/article/download/97848/163710/>. [Acceso: nov. 18, 2021]
- [26] M. Ramírez, “*Problemas de salud derivados de la contaminación radiactiva: un desafío para la salud pública en el mediano plazo*,” *Rev. Chil. Salud Pública*, vol. 18, no. 1, p. 15, 2014. [En Línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/269969935_Problemas_de_salud_derivados_de_la_contaminacion_radiactiva_un_desafio_para_la_salud_publica_en_el_mediano_plazo. [Acceso: nov. 11, 2021]
- [27] R. W. Mayes, “*The quantification of dietary intake, digestion and metabolism in farm livestock and its relevance to the study of radionuclide uptake*,” *Sci. Total Environ.*, vol. 85, no. C, pp. 29–51, 1989. [En Línea]. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/2814458/>. [Acceso: nov. 03, 2021]
- [28] S. Fesenko et al., “*Review of Russian language studies on radionuclide behaviour in*

- agricultural animals: Biological half-lives*” Journal of Environmental Radioactivity, vol. 142. Elsevier Ltd, pp. 136–151, Apr. 01, 2015. [En Línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X1500017X>. [Acceso: jun. 06, 2021]
- [29] Organización Internacional de la Energía Atómica (IAEA), “*Proteccion radiologica de los pacientes*”, 2013. [En Línea]. Disponible en: https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/HealthProfessionals/3_NuclearMedicine/TherapeuticNuclearMedicine/TNM_GeneralPublic.htm. [Acceso: may. 05, 2021]
- [30] CDC Radiation Emergencies, “*Radioisotope Brief: Iodine-131 (131I)*”, 2018. [En Línea]. Disponible en: <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/emergencies/isotopes/iodine.htm>. [Acceso: nov. 14, 2021]
- [31] F. Castro Díaz-Balart, “*Energía nuclear y desarrollo : realidades y desafíos en los umbrales del siglo XXI*” Buenos Aires-Argentina: Ediciones Colihue, 1991. [En Línea]. Disponible en: <https://www.casassaylorenzo.com/Papel/9789505816613/ENERGIA+NUCLEAR+Y+DESARROLLO+REALIDADES+Y+DESAFIOS+EN+LOS+UMBRALES+DEL+SIGLO+XXI>. [Acceso: abr. 13, 2021]
- [32] E. Rodriguez, “*Análisis de la Influencia de parametros radiologicos con la exposicion interna de los trabajadores de medicina nuclear con 131I*” Universidad Nacional de Cuyo, 2009. [En Línea]. Disponible en: https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/142/1/1Rodriguez_Carrascal.pdf. [Acceso: jun. 02, 2021]
- [33] T. Smith and C. J. Edmonds, “*Radiation Dosimetry in the Treatment of Thyroid Carcinoma by 131I*,” Radiat. Prot. Dosimetry, vol. 5, no. 3, pp. 141–149, 1983. [En Línea]. Disponible en: <https://academic.oup.com/rpd/article/5/3/141/1603226>. [Acceso: mar. 23, 2021]
- [34] Summary of Product Characteristics, “*Ficha técnica curicap*”, 2005. [En Línea]. Disponible en: <https://botpluweb.portalfarma.com/documentos/2005/4/27/22854.pdf>. [Acceso: ene. 14, 2022]
- [35] H. H. F. Sheet, “*Potassium-40*,” p. 87527. [En Línea]. Disponible en: <http://hpschapters.org/northcarolina/NSDS/potassium.pdf>. [Acceso: nov. 14, 2021]
- [36] N. Connor, “*Qué es el potasio-40 - Características - Vida media - Definición*”, 2020.

- [En Línea]. Disponible en: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-potasio-40-caracteristicas-vida-media-definicion/>. [Acceso: nov. 14, 2021]
- [37] CNRS, “*Radioactivity: Potassium 40*”, [En Línea]. Disponible en: https://www.radioactivity.eu.com/site/pages/Potassium_40.htm. [Acceso: ene. 05, 2022]
- [38] ILCE, “*III. Significado del tiempo medido por radiactividad.*” [En Línea]. Disponible en: http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/074/html/sec_7.html. [Acceso: nov. 14, 2021]
- [39] National Library of Medicine, “*Potassium, Radioactive.*” [En Línea]. Disponible en: <https://webwiser.nlm.nih.gov/substance?substanceId=421&identifier=Potassium, Radioactive&identifierType=name&menuItem=44&catId=51>. [Acceso: abr. 23, 2021]
- [40] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Guidelines on soil and vegetation sampling for radiological monitoring*”, 2019. [En Línea]. Disponible en: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/DOC_010_486_web.pdf. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [41] Environmental Protection Agency (EPA), “*Superfund program representative sampling guidance volume 4: waste interim final*”, 1995. [En Línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-03/documents/superfund-samp.pdf>. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [42] C. Draghici and I. Manciulea, “*Learning toxicology through open educational resources*”. [En Línea]. Disponible en: <https://toxoe.com>. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [43] ISO, “*ISO - ISO 18400-101:2017 - Soil quality — Sampling — Part 101: Framework for the preparation and application of a sampling plan*”, 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/62842.html>. [Acceso: jun. 03, 2021]
- [44] ISO, “*ISO 18400-103:2017 - Soil quality — Sampling — Part 103: Safety*”, 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/62363.html>. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [45] ISO, “*ISO 18589-2:2007 - Measurement of radioactivity in the environment — Soil — Part 2: Guidance for the selection of the sampling strategy, sampling and pre-treatment of samples*”, 2007. [En Línea]. Disponible en: <https://www.iso.org/standard/40871.html>. [Acceso: nov. 02, 2021]
- [46] Ministerio de Minas y Energía, “*Resolución 41178 de 2016*”, 2016. [En Línea].

- Disponible en: <https://extwprlegs1.fao.org/docs/pdf/col162160.pdf>. [Acceso: oct. 02, 2021]
- [47] ICONTEC, “*NTC 399 Leche Cruda*”, 2002. [En Línea]. Disponible en: <https://vdocuments.net/ntc-399-leche-cruda.html>. [Acceso: ene. 02, 2022]
- [48] ICONTEC, “*NTC666 - Guia para El Muestreo.*”, 1996. [En Línea]. Disponible en: <https://es.scribd.com/doc/148105760/NTC666-Guia-Para-El-Muestreo>. [Acceso: jun. 02, 2021]
- [49] FAO, “*Manual de buenas prácticas en el manejo de la producción lechera*”, 2012. [En Línea]. Disponible en: <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/346658/>. [Acceso: may. 22, 2021]
- [50] C. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “*Información General Río Bogotá*”, 2018. [En Línea]. Disponible en: https://www.car.gov.co/rio_bogota. [Acceso: nov. 12, 2021]
- [51] C. A. R. de Cundinamarca, P. E. LTDA., and E. LTDA., “*Plan De Ordenación Y Manejo De La Cuenca Hidrografiaca Del Rio Bogota (POMCA)*” p. 104, 2006. [En Línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ac24aeabc81c.pdf>. [Acceso: abr. 12, 2021]
- [52] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), “*Boletín de calidad hídrica 2017*”, 2017. [En Línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b29580029c10.pdf>. [Acceso: abr. 12, 2021]
- [53] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR), “*Problemática Río Bogotá*”, 2018. [En Línea]. Disponible en: https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/5. [Acceso: nov. 13, 2021]
- [54] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “*Recuperación Río Bogotá*”, 2018. [En Línea]. Disponible en: https://www.car.gov.co/rio_bogota/vercontenido/6. [Acceso: oct. 23, 2021]
- [55] Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, “*Río bogotá Adecuación hidraulica y recuperación ambiental*”, 2009. [En Línea]. Disponible en: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5aecd52992546.pdf>. [Acceso: nov. 13, 2021]
- [56] E. R. Braverman et al., “*Managing terrorism or accidental nuclear errors, preparing for iodine-131 emergencies: A comprehensive review*,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 11, no. 4, pp. 4158–4200, 2014. [En Línea]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4025043/>. [Acceso: jul. 25, 2021]
- [57] Secretaria de Planeación, “*Apartes especiales 1.2-río bogotá.*”

- [58] S. Mateus Castillo and D. F. Rodriguez Valencia, “*Propuesta de un plan de muestreo y detección de radioisótopos para el establecimiento de zonas con actividad de ^{131}I en la red de sistema de alcantarillado de aguas sanitarias con descargas a la cuenca salitre en Bogotá*”, 2021. [en línea]. Disponible en: <https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/8659/1/6161880-2021-2-IQ.pdf>. [Acceso: ago. 25, 2021]
- [59] Acueducto Agua y alcantarillado de Bogotá, “*PTAR Salitre*”, 2021. [en línea]. Disponible en: https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/Home/ambiente/saneamiento/rio-bogota/ptar-salitre!/ut/p/z0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zizQKdDQwtDIz83F09zQwCHY1C3F39Qo18vY31C7IdFQEf7jxa/. [Acceso: nov. 13, 2021]
- [60] Nordic Liason Committee For Atomic Energy, “*The Sampling and Analysing Methods of Radionuclides used in The Nordic Countries for Environmental Samples*,” 1985. [en línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/20685320>. [Acceso: jul. 01, 2021]
- [61] International Atomic Energy Agency (IAEA), “*Measurement of radionuclides in food and the environment a guidebook*”, 1989. [en línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/20/041/20041399.pdf. [Acceso: jul. 01, 2021]
- [62] B. J. Howard, N. A. Beresford, C. L. Barnett, and S. Fesenko, “*Quantifying the transfer of radionuclides to food products from domestic farm animals*” *J. Environ. Radioact.*, vol. 100, no. 9, pp. 767–773, 2009. [en línea]. Disponible en: <https://sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0265931X09000472>. [Acceso: jun. 01, 2021]
- [63] Huevos Santa Marta, “*Preguntas Frecuentes - Información de calibres*”. [en línea]. Disponible en: <https://asml.cl/pages/preguntas-frecuentes>. [Acceso: jul. 24, 2021]
- [64] M. Barrera, M. L. Romero, and F. Valido, “*Puesta a punto de un sistema de espectrometría gamma para la determinación de Cs-137 en suelos españoles*,” *Calibration a gamma Spectrom. Syst. used Determ. Cs-137 spanish soils*, vol. 1, no. 1147, pp. 0–43, 2008. [en línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/018/40018273.pdf. [Acceso: jul. 30, 2021]
- [65] Servicio Central de Soporte a la Investigación Experimental, “*Espectrometría gamma*”

- con detectores de Ge Hp*”). [en línea]. Disponible en: <https://www.uv.es/uvweb/servicio-central-soporte-investigacion-experimental/es/organizacion/laram/equipos/espectrometria-gamma-detectores-ge-hp-1285876925885/OCTRecurs.html?id=1286175352301>. [Acceso: mar. 30, 2021]
- [66] E. Quintero Ponce, M. de las M. Alfaro López, G. Valentín Alejándrez, and V. P. Rojas Martínez, “*Determinación de 40k en alimentos y en cuerpo entero*”. [en línea]. Disponible en: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/39/015/39015135.pdf. [Acceso: nov. 02, 2021]
- [67] AMETEK ORTEC, “*High Purity Germanium (HPGe) Radiation Detectors*”, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://www.ortec-online.com/products/radiation-detectors/germanium-hpge-radiation-detectors>. [Acceso: sep. 02, 2021]
- [68] Radiation Dosimetry, “*Qué es el detector de silicio - Principio de funcionamiento - Definición*”, 2020. [en línea]. Disponible en: <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-el-detector-de-silicio-principio-de-funcionamiento-definicion/>. [Acceso: sep. 14, 2021]
- [69] L. F. Guarín Cabrera, “*Calibración de espectrómetro gama en eficiencia absoluta con el programa Hypermet-PC*”, 2016. [en línea]. Disponible en: https://ricabib.cab.cnea.gov.ar/605/1/1_Guar%C3%ADn_Cabrera.pdf. [Acceso: dic. 14, 2021]
- [70] E. T. Mora Carrillo. [Entrevista]. 14/12/2021
- [71] Servicio Geológico Colombiano, “*Prueba de estabilidad espectrómetro CANBERRA GL0515.*” .
- [72] Revista semana, “*Alimentados con agua del río Bogotá*”, 2017. [en línea]. Disponible en: <https://www.semana.com/impacto/articulo/el-agua-del-rio-bogota-se-utiliza-en-cultivos-y-ganaderia/36796/>. [Acceso: ago. 14, 2021]
- [73] Official Portal of Government of La Rioja, “*Fosfatos en la industria cárnica*”, 2009. [en línea]. Disponible en: <https://www.larioja.org/innovacion/en/noticias/noticia-innovacion/fosfatos-industria-carnica>. [Acceso: ago. 27, 2021]
- [74] A. D. Tait Wiechen;, “*Verfahren zur Bestimmung niedriger Aktivitätskonzentrationen von Iod-131 in frischer Milch durch Anreicherung auf einer Anionenaustauschersäule und anschließende gammaspektrometrische Messung.*” Leitstelle für Boden, Bewuchs, Futterm. und Nahrungsm. Pflanzl. und Tier. Herkunft, 1992. [en línea]. Disponible en: https://www.openagrar.de/servlets/MCRFileNodeServlet/Document_derivate_0000691

- 5/Messanltg-F-I-131-MILCH-01_1992.pdf. [Acceso: sep. 20, 2021]
- [75] Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), “*Glosario - CSN*”. [en línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/glosario>. [Acceso: sep. 25, 2021]
- [76] Banrepcultural, “*Oferta y demanda*” [en línea]. Disponible en: https://enciclopedia.banrepcultural.org/index.php/Oferta_y_demanda. [Acceso: sep. 12, 2021]
- [77] Universidad Santo Tomas, “*Determinísticos / Estocásticos*.” [en línea]. Disponible en: http://soda.ustadistancia.edu.co/enlinea/invoperaciones2/determinsticos__estocsticos.html. [Acceso: ene. 12, 2022]
- [78] Cherry. Robert, “*Radiaciones ionizantes*”. [en línea]. Disponible en: <https://www.insst.es/documents/94886/162520/Cap%C3%ADtulo+48.+Radiaciones+ionizantes>. [Acceso: abr. 15, 2021]
- [79] V. Gamo Pascual, “*Efectos de la radiactividad y protección contra la radiación módulo 0: conceptos básicos sobre protección radiológica*”. [en línea]. Disponible en: <https://www.csn.es/documents/10182/950714/Curso+General+de+Formaci%C3%B3n+de+Actuantes+en+Emergencias+Nucleares+TEMA+00.+Conceptos+b%C3%A1sicos+sobre+protecci%C3%B3n+radiol%C3%B3gica>. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [80] Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares, “*Glosario*”. [en línea]. Disponible en: http://www.inin.gob.mx/_temasdeinteres/glosario.cfm?letra=R. [Acceso: nov. 16, 2021]
- [81] Instituto Nacional del Cáncer, “*Definición de radioisótopos*”. [en línea]. Disponible en: <https://www.cancer.gov/espanol/publicaciones/diccionarios/diccionario-cancer/def/radioisotopo>. [Acceso: nov. 28, 2021]
- [82] US EPA, “*Información básica sobre la radiación*”. [en línea]. Disponible en: <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion>. [Acceso: dic. 03, 2021]
- [83] A. N. Jarvis and D. G. Easterly, “*Preliminary milk report. Environmental monitoring series*”, 1975. [en línea]. Disponible en: <https://www.osti.gov/biblio/7268857>. [Acceso: dic. 21, 2021]
- [84] F. Wei and Y. Q. Feng, “*Methods of sample preparation for determination of veterinary residues in food matrices by porous monolith microextraction-based techniques*,” *Anal. Methods*, vol. 3, no. 6, pp. 1246–1256, 2011. [en línea]. Disponible en: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2011/ay/c1ay05079f>. [Acceso: jul. 01, 2021]

GLOSARIO

Activación: mecanismo por el cual un átomo que no es radiactivo se convierte en otro que lo es al someterse a un proceso de irradiación con neutrones o partículas cargadas [75].

Actividad: magnitud física que mide el número de transformaciones espontáneas ocurridas en una sustancia por unidad de tiempo [75].

Contaminación Radiactiva: presencia indeseable de sustancias radiactivas en seres vivos, objetos o en el medio ambiente. Se habla de descontaminación superficial (si afecta a la superficie de los objetos), contaminación externa (piel de las personas) o contaminación interna (órganos internos de personas) [75].

Demanda: es la cantidad o cantidades que se requieren de un elemento para un proceso determinado o la cantidad que este que el mercado solicita [76].

Determinísticos (o no estocásticos): son aquellos en los que una relación causal entre la dosis y el efecto. Únicamente se manifiestan cuando la dosis alcanza o supera un determinado valor (llamado nivel umbral) Su gravedad depende, por tanto, de la dosis recibida [77].

Dosimetría: sistema para la medida y registro de la dosis absorbida [75].

Efecto biológico: transformaciones producidas por la radiación ionizante cuando incide en un organismo vivo como, por ejemplo, el cuerpo humano. Estos efectos son de dos clases [78].

Efluente radiactivo: 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 [75].

Elemento químico: sustancia formada por átomos que tienen el mismo número de protones, aunque pueden tener diferente número de neutrones. Su comportamiento químico es siempre el mismo, cualquiera que sea su composición isotópica [75].

Gammagrafía: técnica de radiografía industrial de piezas y estructuras metálicas, de hormigón etc., en las que se utilizan los rayos gamma procedentes de una fuente encapsulada, incorporada a un aparato, para obtener una imagen del objeto sobre una placa fotográfica. La manipulación de la fuente se realiza con telemando [75].

Índice de escasez: se calcula para condiciones hidrológicas de años promedios, modales y secos [75].

Ion: átomo o grupo de átomos que, por pérdida o ganancia de uno o más electrones, ha adquirido carga eléctrica [75].

Isotopo: cada uno de los distintos nucleidos que tienen el mismo número atómico (número de protones) y, por tanto, pertenecen al mismo elemento químico, pero que difieren entre sí en el número de neutrones [75].

Probabilísticos (o estocásticos): son aquellos en los que la relación entre dosis y efecto es de naturaleza probabilística. Carecen de dosis umbral y su gravedad no depende, linealmente, de la dosis recibida [79].

Radiactividad: propiedad de algunos elementos químicos de emitir partículas u ondas electromagnéticas. Esta propiedad se debe a la existencia de una descompensación entre el número de neutrones y de protones del núcleo del átomo, que provoca una inestabilidad y una liberación de la energía acumulada en forma de partículas u ondas. La radiactividad natural se debe a elementos que emiten radiaciones espontáneamente, como es el caso del Uranio, el Torio, el Radón, etc. [80].

Radioisótopo: forma inestable de un elemento que libera radiación a medida que se descompone y se vuelve más estable. Los radioisótopos se pueden presentar en la naturaleza o producir en el laboratorio. En el campo de la medicina, se usan en las pruebas de imaginología y para tratamiento. También se llama radionúclido [81].

Rayos gamma: radiación electromagnética producida en el fenómeno de desintegración radiactiva. Su longitud de onda es menor que la de los rayos X, por lo que es una radiación extraordinariamente penetrante [82].

ANEXOS

ANEXO 1.

ESPECTROS GAMMA DE MUESTRAS ANALIZADAS PARA DETECTAR ¹³¹I

1. Espectro gamma de la muestra Leches 01.

Tabla 20.

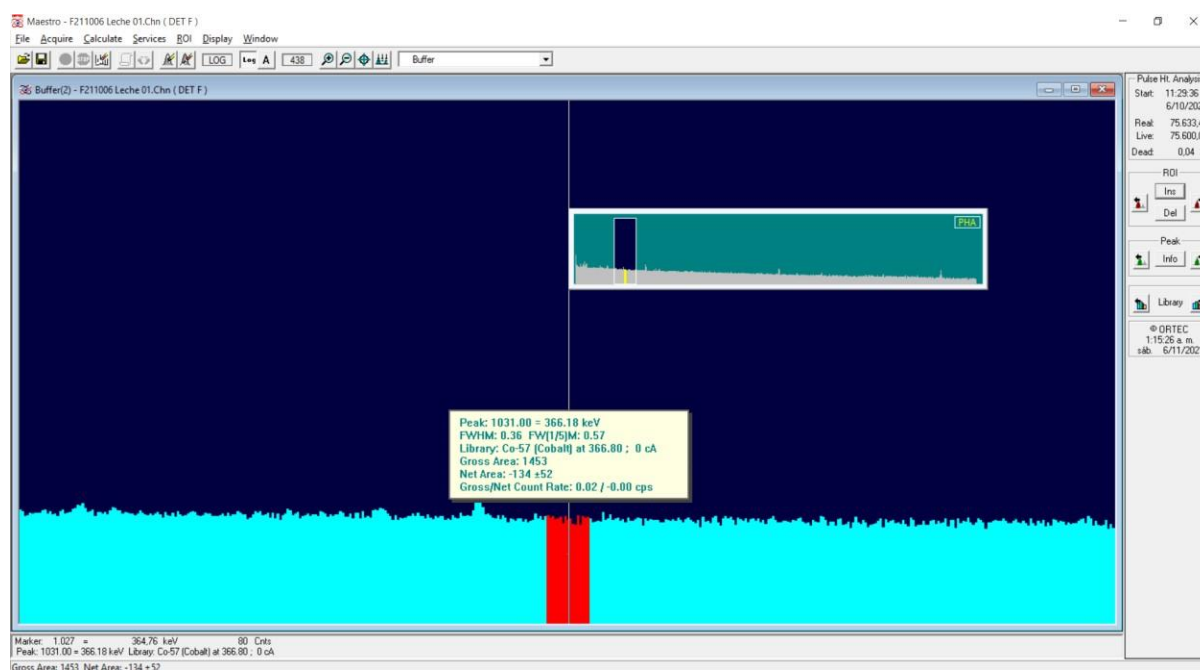
Características de tiempos de muestra Leches 01

Características principales de muestra Leches 01	
Fecha de la toma de muestra	06/10/2021
Hora de la toma de muestra	05:40 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FP
Fecha de ingreso a análisis	06/10/2021
Hora de ingreso a análisis	11:29 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	75600

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 01, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 52.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 01



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 01

2. Espectro gamma de la muestra Leches 02.

Tabla 21.

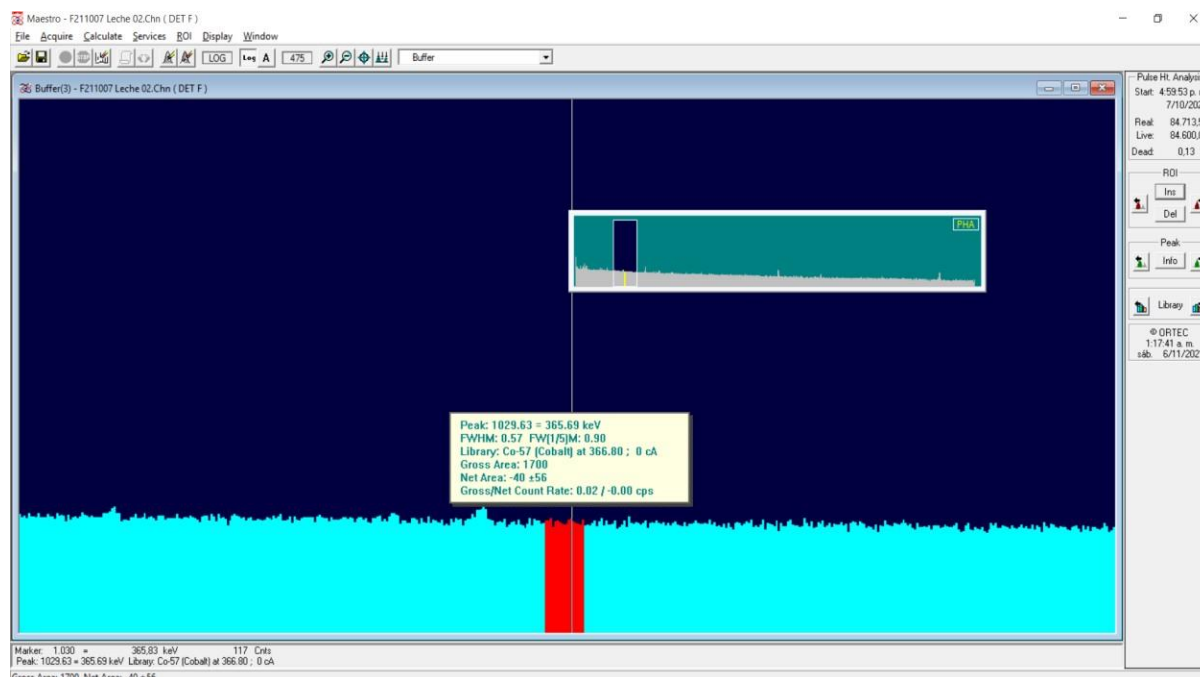
Características de tiempos de muestra Leches 02

Características principales de muestra Leches 02	
Fecha de la toma de muestra	06/10/2021
Hora de la toma de muestra	05:04 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FM
Fecha de lectura	07/10/2021
Hora de lectura	04:59 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	84600

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 02, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 53.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 02



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 02

3. Espectro gamma de la muestra Leches 03.

Tabla 22.

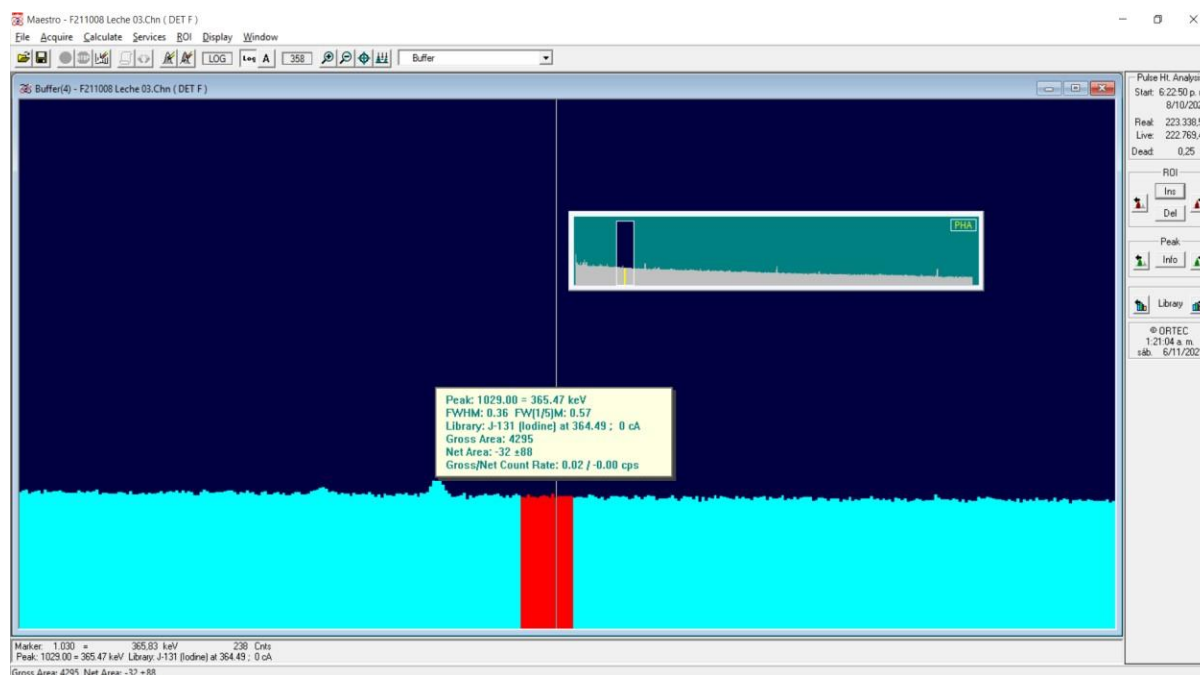
Características de tiempos de muestra Leches 03

Características principales de muestra Leches 03	
Fecha de la toma de muestra	06/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:15 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FY
Fecha de ingreso a análisis	08/10/2021
Hora de ingreso a análisis	06:22 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	222769,42

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 03, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 54.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 03



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 03

4. Espectro gamma de la muestra Leches 04.

Tabla 23.

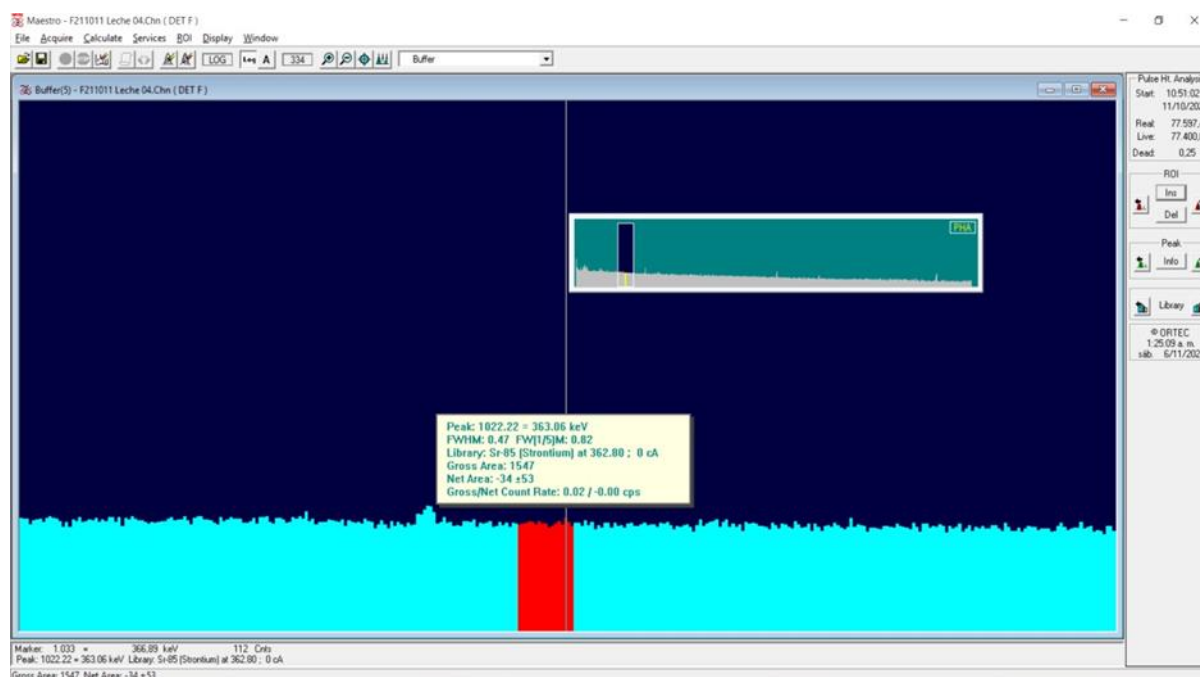
Características de tiempos de muestra Leches 04

Características principales de muestra Leches 04	
Fecha de la toma de muestra	11/10/2021
Hora de la toma de muestra	05:15 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FP
Fecha de ingreso a análisis	08/10/2021
Hora de ingreso a análisis	06:22 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	77400

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 04, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 55.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 04



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 04

5. Espectro gamma de la muestra Leches 05.

Tabla 24.

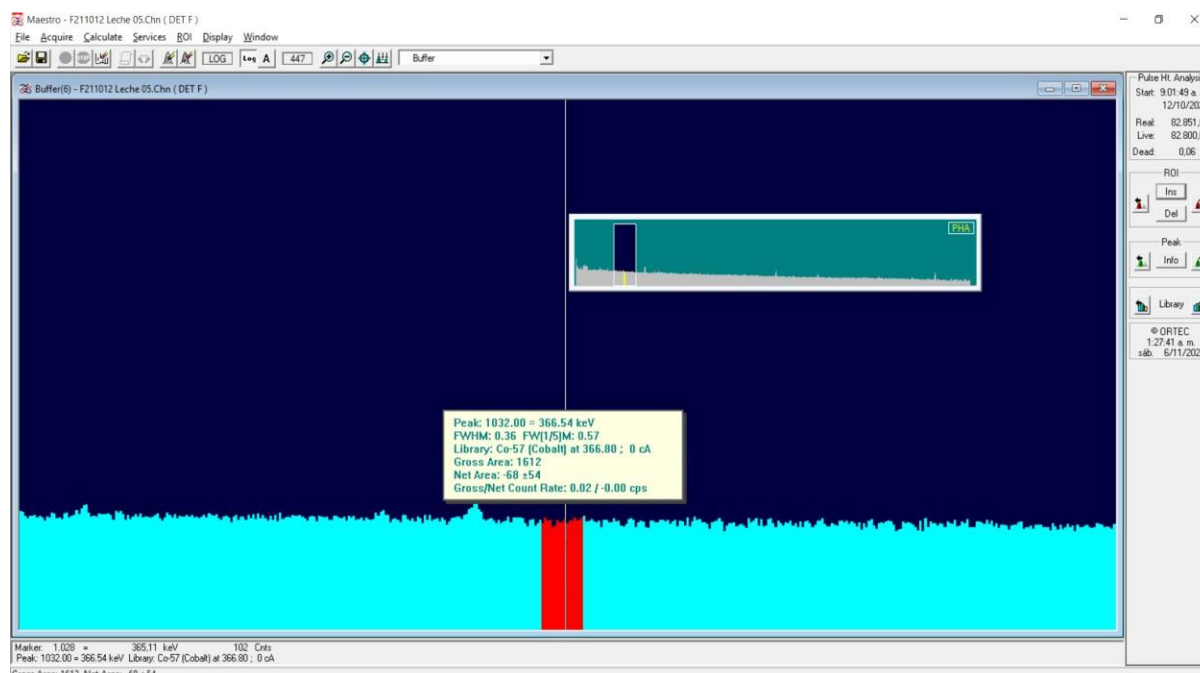
Características de tiempos de muestra Leches 05

Características principales de muestra Leches 05	
Fecha de la toma de muestra	11/10/2021
Hora de la toma de muestra	05:35 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FJ
Fecha de ingreso a análisis	12/10/2021
Hora de ingreso a análisis	10:51 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	82800

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 05, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 56.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 05



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 05

6. Espectro gamma de la muestra Leches 06.

Tabla 25.

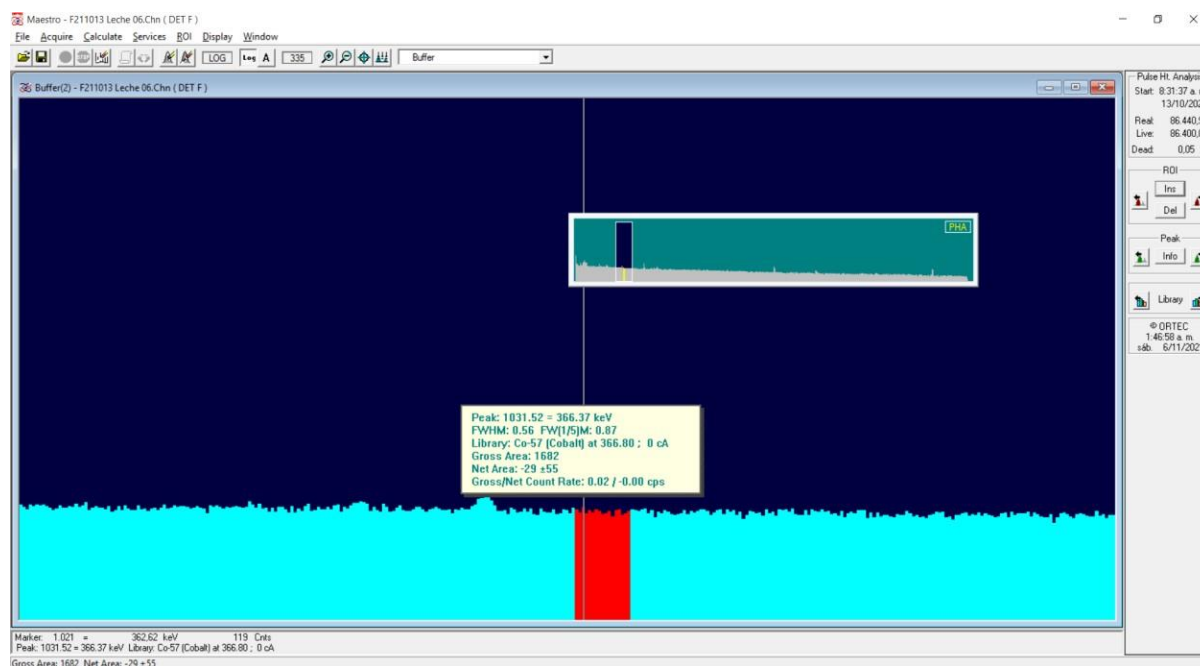
Características de tiempos de muestra Leches 06

Características principales de muestra Leches 06	
Fecha de la toma de muestra	11/10/2021
Hora de la toma de muestra	06:10 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FY
Fecha de ingreso a análisis	13/10/2021
Hora de ingreso a análisis	08:31 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	86400

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 06, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 57.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 06



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 06

7. Espectro gamma de la muestra Leches 07.

Tabla 26.

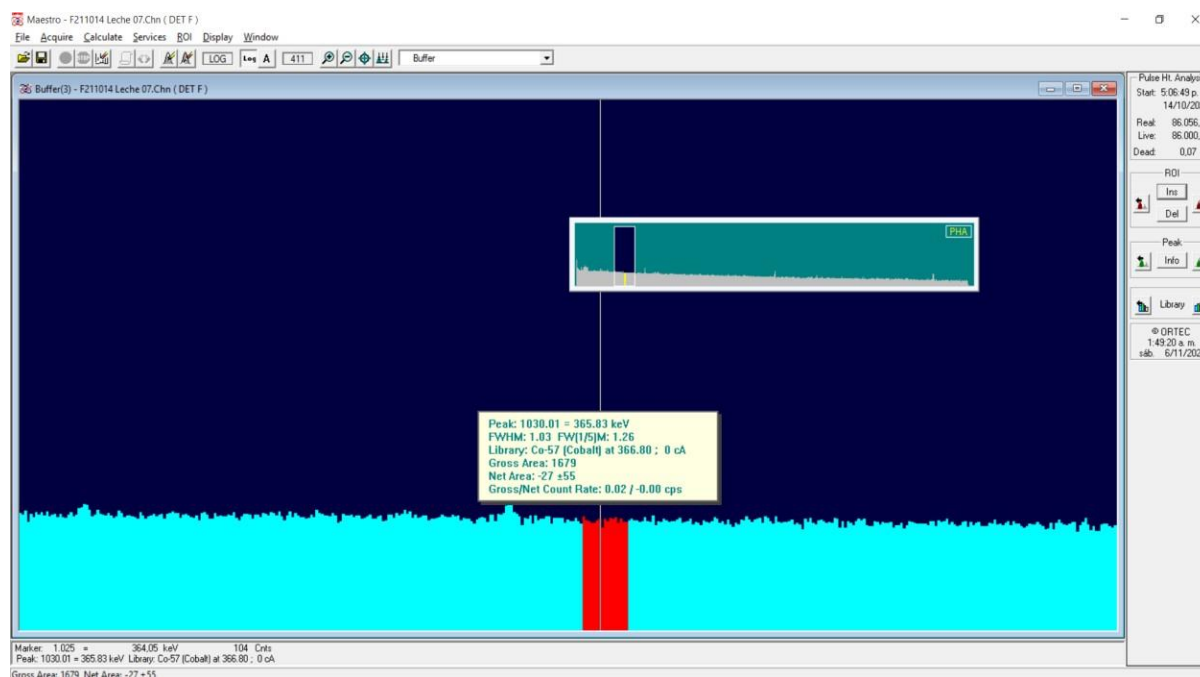
Características de tiempos de muestra Leches 07

Características principales de muestra Leches 07	
Fecha de la toma de muestra	11/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:25 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FM
Fecha de ingreso a análisis	14/10/2021
Hora de ingreso a análisis	05:06 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	86000

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 07, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 58.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 07



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 07

8. Espectro gamma de la muestra Leches 08.

Tabla 27.

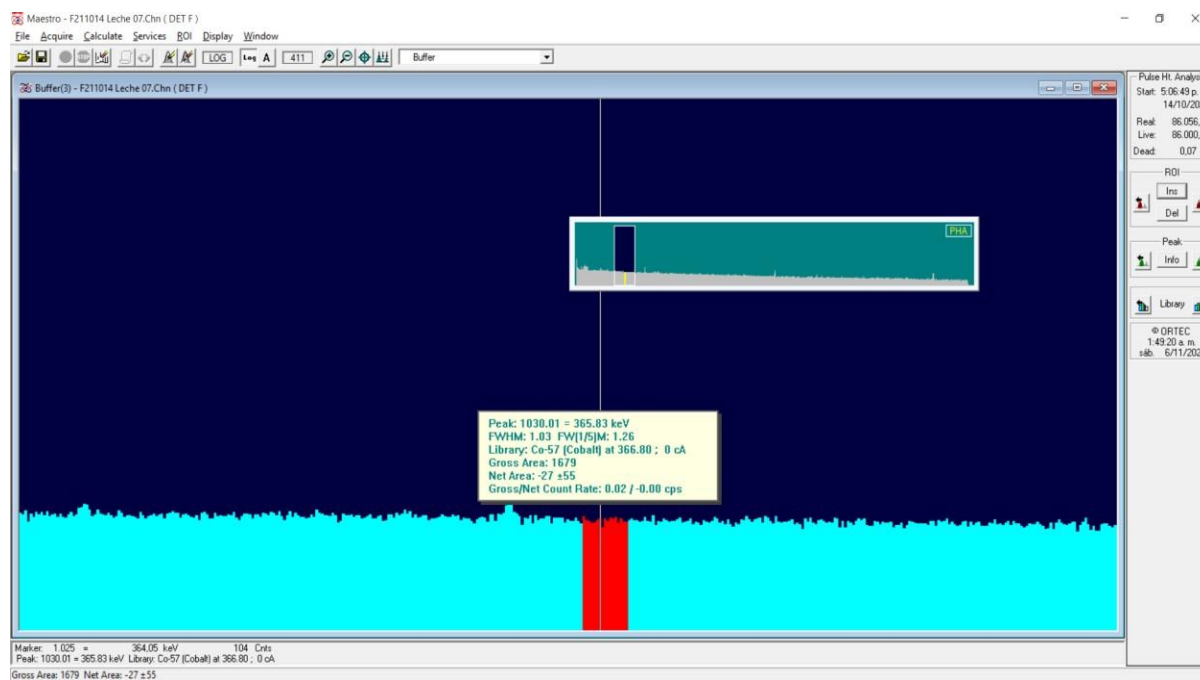
Características de tiempos de muestra Leches 08

Características principales de muestra Leches 08	
Fecha de la toma de muestra	11/10/2021
Hora de la toma de muestra	08:10 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FM
Fecha de ingreso a análisis	15/10/2021
Hora de ingreso a análisis	05:06 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	223200

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 08, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 59.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 08



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 08

9. Espectro gamma de la muestra Leches 09.

Tabla 28.

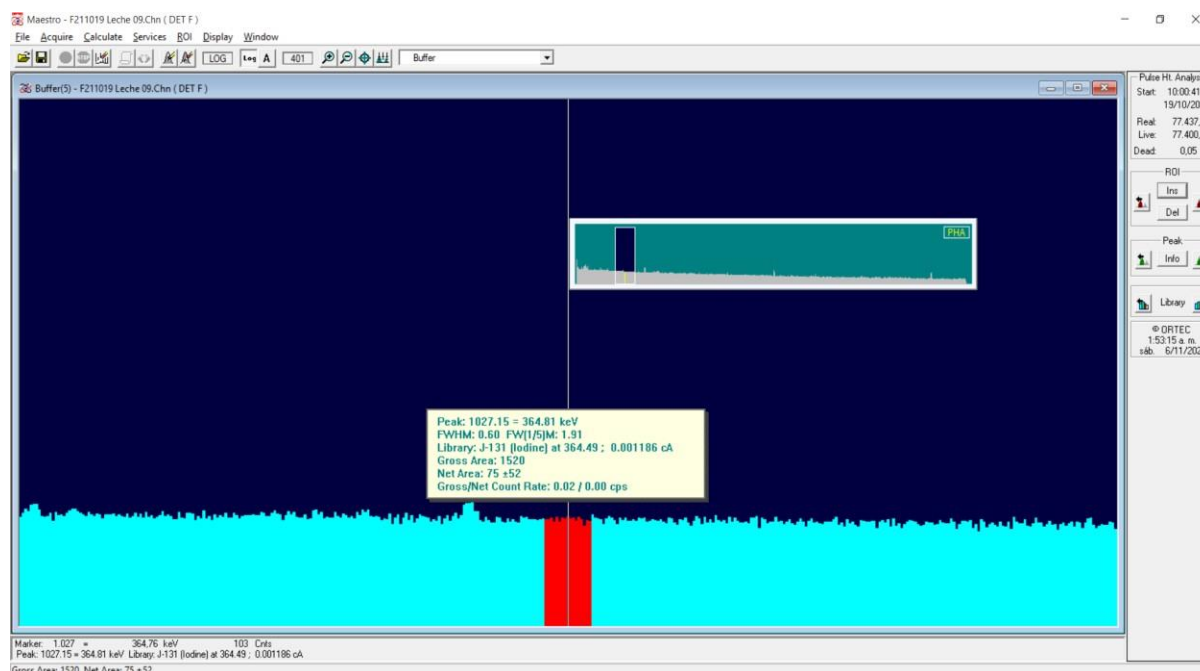
Características de tiempos de muestra Leches 09

Características principales de muestra Leches 09	
Fecha de la toma de muestra	19/10/2021
Hora de la toma de muestra	05:15 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FM
Fecha de ingreso a análisis	19/10/2021
Hora de ingreso a análisis	10:00 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	77400

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 09, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 60.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 09



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 09

10. Espectro gamma de la muestra Leches 10.

Tabla 29.

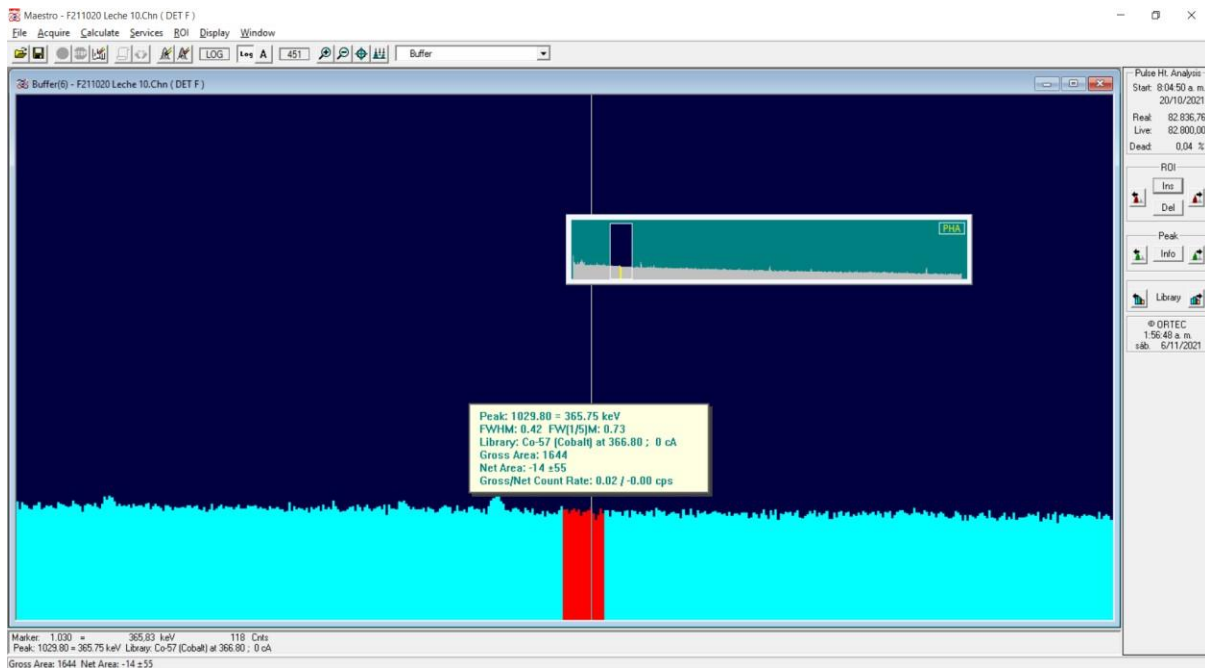
Características de tiempos de muestra Leches 10

Características principales de muestra Leches 10	
Fecha de la toma de muestra	19/10/2021
Hora de la toma de muestra	06:35 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FP
Fecha de ingreso a análisis	20/10/2021
Hora de ingreso a análisis	08:04 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	82800

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 10, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 61.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 10



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 10

11. Espectro gamma de la muestra Leches 11.

Tabla 30.

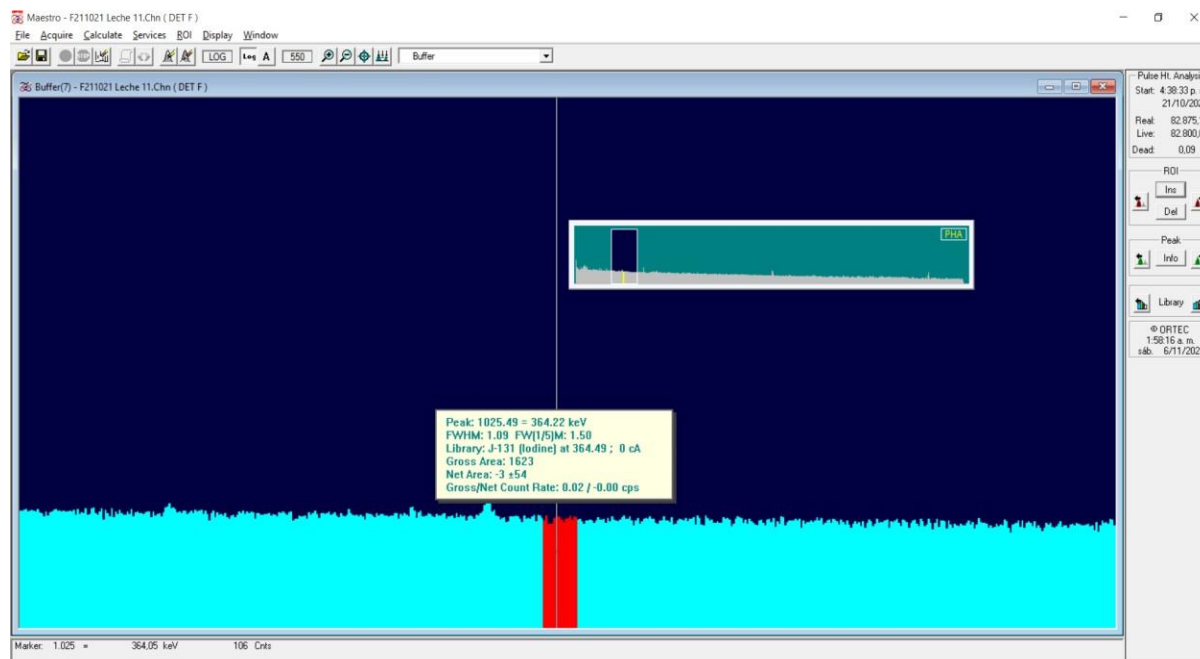
Características de tiempos de muestra Leches 11

Características principales de muestra Leches 11	
Fecha de la toma de muestra	19/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:25 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FY
Fecha de ingreso a análisis	21/10/2021
Hora de ingreso a análisis	04:38 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	82800

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 11, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 62.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 11



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 11

12. Espectro gamma de la muestra Leches 12.

Tabla 31.

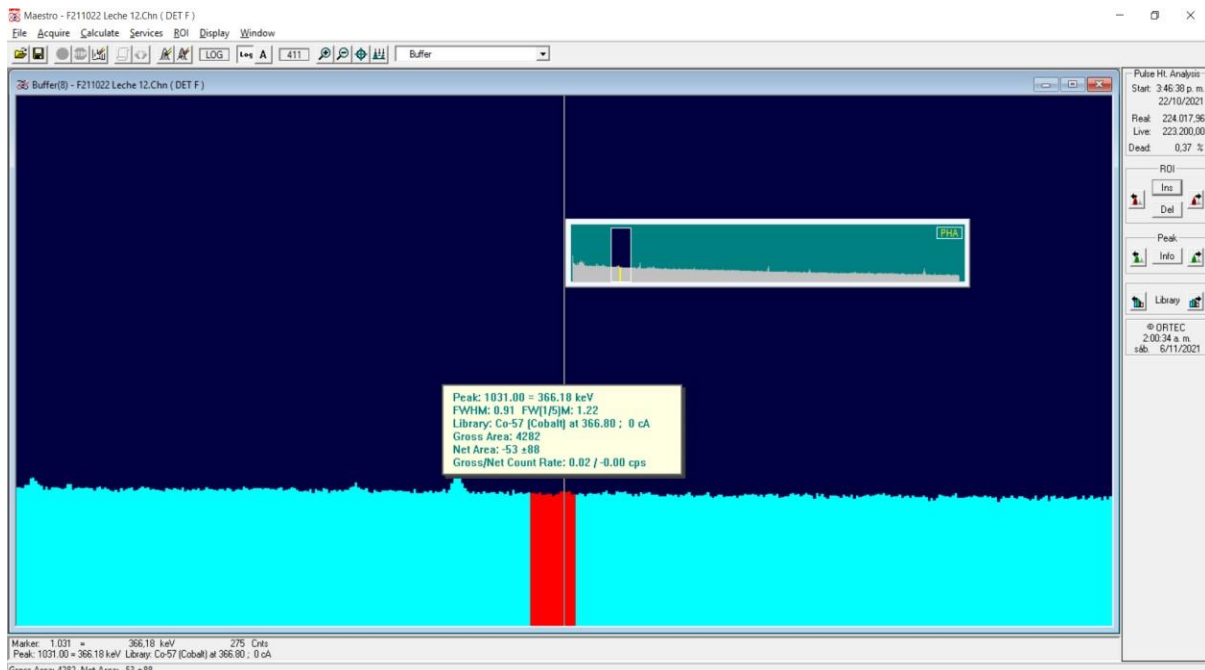
Características de tiempos de muestra Leches 12

Características principales de muestra Leches 12	
Fecha de la toma de muestra	19/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:50 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FJ
Fecha de ingreso a análisis	22/10/2021
Hora de ingreso a análisis	03:46 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	223200

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 12, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 63.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 12



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ^{131}I para la muestra Leches 12

13. Espectro gamma de la muestra Leches 13.

Tabla 32.

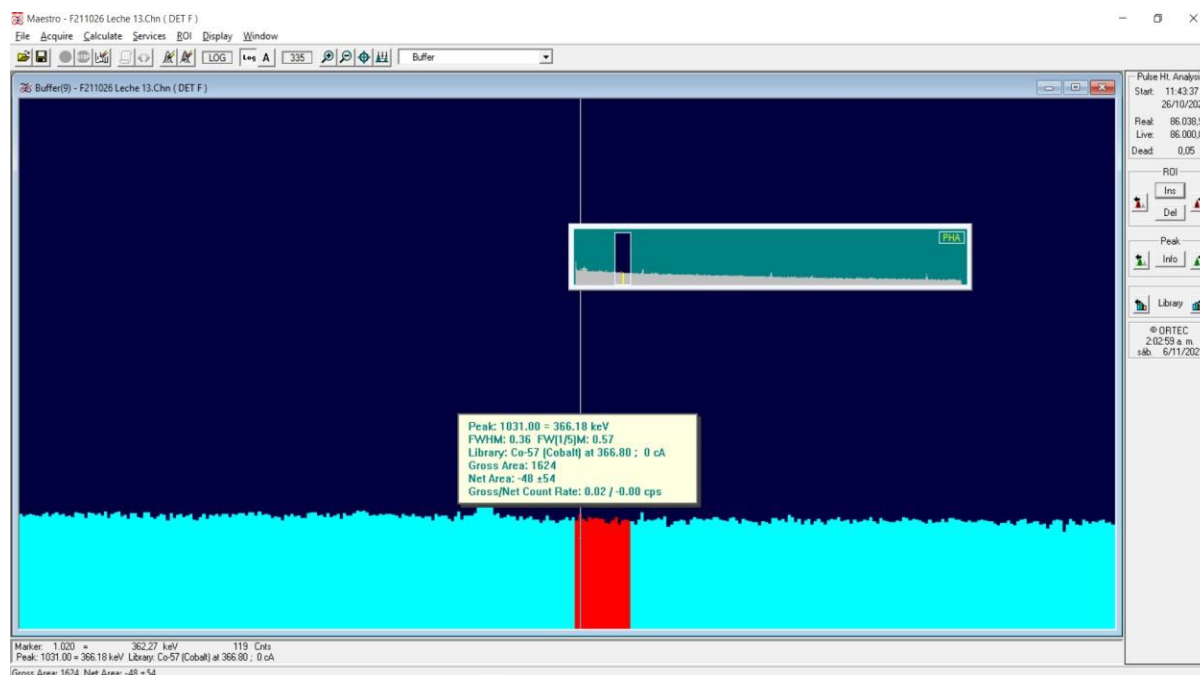
Características de tiempos de muestra Leches 13

Características principales de muestra Leches 13	
Fecha de la toma de muestra	26/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:00 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FJ
Fecha de ingreso a análisis	26/10/2021
Hora de ingreso a análisis	11:43 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	86000

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 13, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 64.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ^{131}I , correspondiente a muestra Leches 13



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ^{131}I para la muestra Leches 13

14. Espectro gamma de la muestra Leches 14.

Tabla 33.

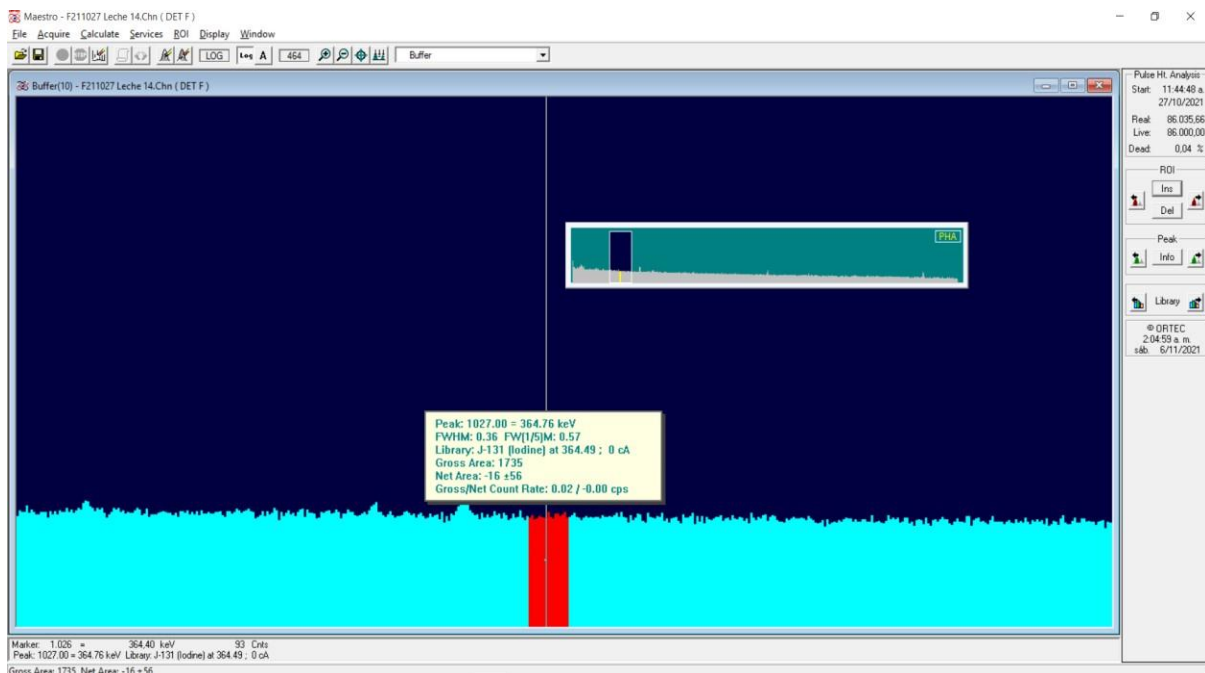
Características de tiempos de muestra Leches 14

Características principales de muestra Leches 14	
Fecha de la toma de muestra	26/10/2021
Hora de la toma de muestra	07:30 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FP
Fecha de ingreso a análisis	27/10/2021
Hora de ingreso a análisis	11:44 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	86000

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 14, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 65.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 14



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 14

15. Espectro gamma de la muestra Leches 15.

Tabla 34.

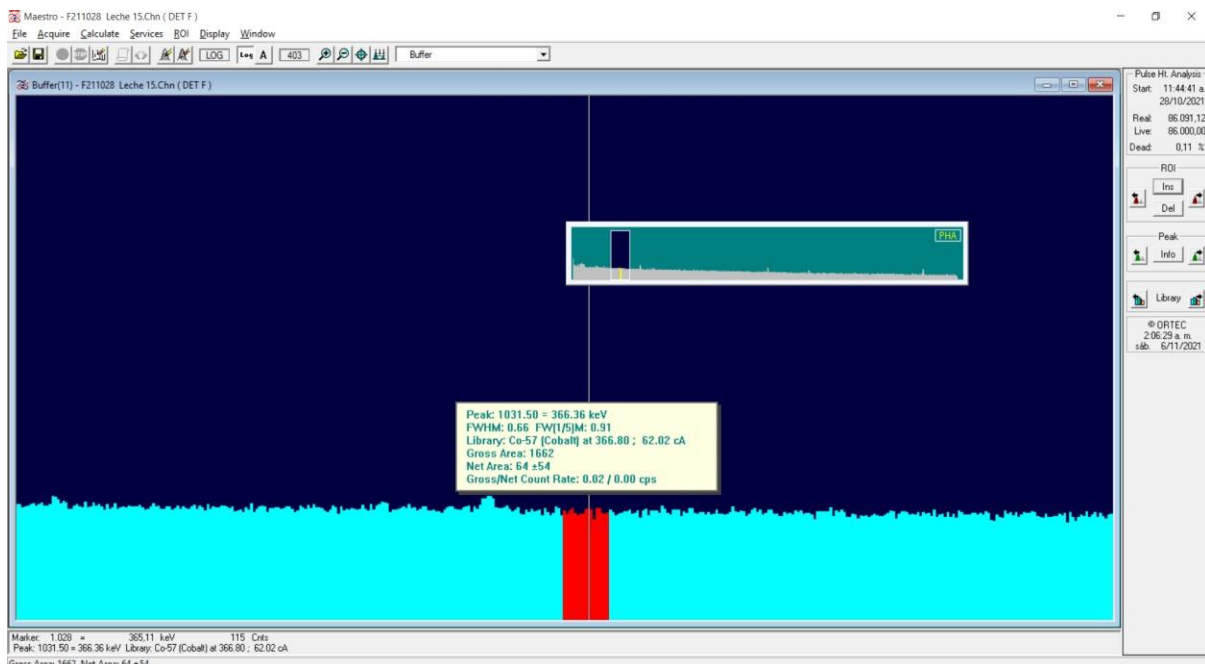
Características de tiempos de muestra Leches 15

Características principales de muestra Leches 15	
Fecha de la toma de muestra	26/10/2021
Hora de la toma de muestra	04:00 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FM
Fecha de ingreso a análisis	28/10/2021
Hora de ingreso a análisis	11:44 AM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	86000

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 15, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 66.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 15



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 15

16. Espectro gamma de la muestra Leches 16.

Tabla 35.

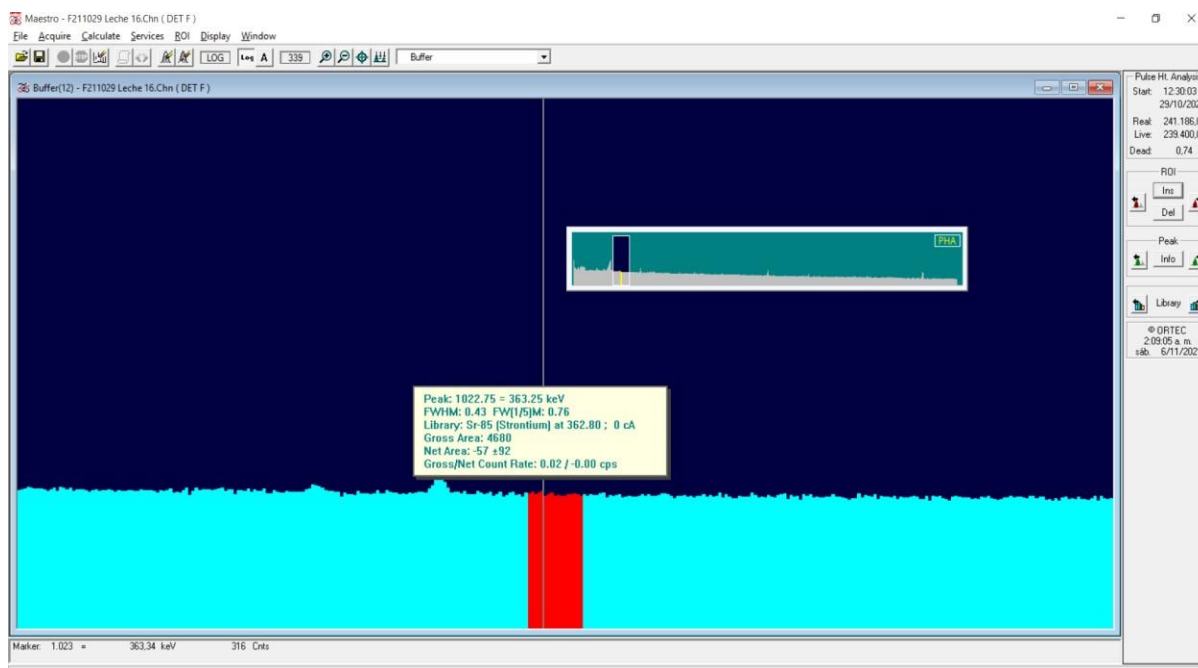
Características de tiempos de muestra Leches 16

Características principales de muestra Leches 16	
Fecha de la toma de muestra	26/10/2021
Hora de la toma de muestra	04:00 AM
Indicador de ubicación correspondiente	FJ
Fecha de ingreso a análisis	29/10/2021
Hora de ingreso a análisis	12:30 PM
Tiempo de lectura en DET F (seg)	239400

Nota. Esta tabla presenta los tiempos de muestreo y análisis de la muestra Leches 16, así como su tiempo de residencia en el espectrómetro gamma Det F

Figura 67.

Espectro gamma con potencia de 364.76 KeV para cuantificar ¹³¹I, correspondiente a muestra Leches 16



Nota. Esta figura presenta el espectro gamma resultante del análisis de ¹³¹I para la muestra Leches 16

ANEXO 2.

RECOMENDACIONES

Analizar las cantidades del radioisótopo presente en la matriz leche en diversos periodos del año, pues el caudal de la cuenca es un factor importante para la acumulación y los valores del mismo, por lo tanto, es de vital importancia realizar un estudio que evalúe la concentración del elemento en función del caudal.

La ladera de la cuenca que encuentra en contacto con el agua, tanto antes como después de ser tratada requiere un estudio más amplio y profundo, ya que, según las propiedades de los materiales por los que se encuentra conformada, esta podría ser capaz de llegar a almacenar y retener el elemento.

Se recomienda realizar la toma de muestras de la leche en diversas horas de del día con el fin de identificar si según el momento del día en que se realice el muestreo la cantidad del radioisótopo aumenta, disminuye o se mantiene constante.

Aumentar los puntos de muestreo ampliando la zona de estudio. Especialmente, aguas arriba, ya que es la zona donde los bovinos consumen agua la cual no se sabe a ciencia cierta si está siendo tratada o no antes de ser entregada al cuerpo hídrico a través del sistema del drenaje.

Elaborar un estudio en el cual se tengan en cuenta un número más amplio de parámetros sobre la cuenca del río como lo son la velocidad a la que este fluye, su caudal y profundidad.

ANEXO 3.
HOJA DE SEGURIDAD FORMALDEHIDO

Material Safety Data Sheet (MSDS): Formaldehyde

Section 1: Product Identification			
Product name:	FORMALDEHYDE		
Chemical formula:	N/A		
Synonyms:	Methylene oxide, AC-4553, AC-4554, 41860, 41883		
Supplier:	Chemicals LTD 123 Anywhere St. Ottawa, ON K5R 8N9		
Material uses:	For laboratory use only.		
Section 2: Hazardous Ingredients			
Name	CAS #	%	TLV
1. Formaldehyde	50-00-0	30 – 40	Exposure limits: 0.3 ppm (0.37mg/m3)
2. Methanol	67-56-1	5 – 15	Exposure limits: 200 ppm (262mg/m3)
3. Water	7732-18-5	Balance	N/A
Section 3: Physical Data			
Physical state	Clear, colourless liquid with strong formaldehyde odour.		
pH	2.8 – 4.0 (25 degrees Celsius) (37% solution)		
Odour threshold	0.8 – 1ppm		
Percent volatile	100%(V/V)		
Freezing point	Insoluble polymer gradually forms.		
Boiling point	90 - 100		
Specific gravity	1.08 to 1.0975 (Water = 1)		
Vapour pressure	~40 mm of Hg (@ 39°C)		
Vapour density	0.62 to 1.04 (Air = 1)		
Evaporation rate	2.1(n-Butyl acetate = 1) (Methanol).		
Solubility	Miscible in water.		
Section 4: Fire and Explosion Data			
Flash point	50 – 78 degrees Celsius		
Flammability	Lower: 7%; Upper: 73%		
Fire extinguishing procedures	Use DRY chemical, carbon dioxide, alcohol-resistant foam or water spray. Cool containing vessels with flooding quantities of water until well after fire is out.		
Section 5: Reactivity Data			
Stability	Stable. Conditions to avoid: heat, sparks and flame, temperatures below 20°C.		
Incompatibility	May react violently with: acids, alkalis, anhydrides, isocyanates, urea, phenol, oxidizing agents, oxides, organic oxides, reducing agents, ammonia, aniline, magnesium carbonate, performic acid, alkali metals, amines, hydrogen peroxide, nitromethane, nitrogen dioxide, perchloric acid, perchloric acid-aniline mixtures, bases, monomers, water reactive materials, magnesium carbonate hydroxide.		

Section 6: Toxicological Properties	
Routes of entry	Inhalation, ingestion, absorption through skin and eyes.
Effects of acute exposure	Death if inhaled or absorbed; severe eye irritation and burns; allergic dermatitis, skin burns; bronchitis, pulmonary oedema; headache, dizziness, nausea, vomiting; abdominal pain; blindness.
Effects of chronic exposure	Nasal cancer, respiratory tract irritation; reproductive disorders, asthma, dermatitis; multiple organ damage.
Section 7: Preventative Measures	
Protective clothing and PPE	Wear self-contained breathing apparatus, rubber boots and heavy rubber gloves, and an acid suit.
Handling procedures	Store in a cool place away from heated areas, sparks, and flame. Store in a well ventilated area. Store away from incompatible materials. Do not add any other material to the container. Do not wash down the drain. Do not breathe gas/fumes/vapor/spray. In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment. Keep container tightly closed. Manipulate under an adequate fume hood. Take precautionary measures against electrostatic discharges. Ground the container while dispensing. Ground all equipment containing material. Use only explosion proof equipment. Use non-sparking tools. Watch for accumulation in low confined areas. Do not use pressure to dispense. Storage temperature depends on methanol content and should be controlled to avoid precipitation or vaporization. Handle and open container with care. Take off immediately all contaminated clothing. This product must be manipulated by qualified personnel. Do not get in eyes, on skin, or on clothing. Wash well after use. In accordance with good storage and handling practices. Do not allow smoking and food consumption while handling.
Spill containment	Evacuate and ventilate the area. Stay upwind. Keep out of low areas. Eliminate all sources of ignition. Dyke the area with sand or a natural barrier. Absorb on sand or vermiculite and place in a closed container for disposal. Use non-sparking tools. Transport outdoors. Wash spill site after material pick up is complete. DO NOT empty into drains. DO NOT touch damaged container or spilled material. Runoff to sewer may create fire or explosion hazard.
Section 8: First Aid Measures	
Eye contact	Immediate first aid is needed to prevent eye damage. IMMEDIATELY flush eyes with copious quantities of water for at least 20 minutes holding lids apart to ensure flushing of the entire surface. Seek immediate medical attention. DO NOT use an eye ointment.
Skin contact	Immediate first aid is needed to prevent skin damage. Immediately flush skin with plenty of water for at least 20 minutes while removing contaminated clothing and shoes. Seek immediate medical attention. Wash contaminated clothing before reusing.
Inhalation	Remove patient to fresh air. Administer approved oxygen supply if breathing is difficult. Administer artificial respiration or CPR if breathing has ceased. Seek immediate medical attention.
Ingestion	If conscious, wash out mouth with water. DO NOT induce vomiting. Seek immediate medical attention.
Section 9: Preparation Information	
Prepared by	Chemical Inc. Laboratories
Preparation date	Aug. 16, 2005
Contact information	(555) 555-5555