

**DETERMINACIÓN DE TÉCNICA DE CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA DE
RADIONÚCLIDOS ARTIFICIALES EN SUELOS ALEDAÑOS A INSTALACIÓN DE
ALMACENAMIENTO DE DESECHOS RADIATIVOS PARA SEGUIMIENTO
AMBIENTAL**

LISETH ANDREA OSPINA PERDIGÓN

**Proyecto Integral de Grado para optar al título de
ESPECIALISTA EN GESTIÓN AMBIENTAL**

Directores

MEng. Paula Andrea Arboleda Zuluaga

MSc. Juan Andrés Sandoval Herrera

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
ESPECIALIZACIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2022**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma de la Directora
Paula Andrea Arboleda Zuluaga

Firma del Director
Juan Andrea Sandoval Herrera

Firma del calificador

Bogotá D.C. Mayo de 2022

DIRECTIVOS 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
Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Directora del Departamento de Ingeniería Química y Ambiental
Dra. Nubia Liliana Becerra Ospina

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.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	8
INTRODUCCIÓN	9
1. OBJETIVOS	11
1.1. Objetivo General	11
1.2. Objetivos Específicos	11
2. GENERALIDADES	12
2.1. Radiaciones ionizantes	12
2.2. Periodo de semidesintegración	13
2.3. Radionúclidos	14
2.3.1. <i>De origen natural</i>	14
2.3.2. <i>De origen artificial</i>	14
2.4. Muestreo y preparación de muestra	15
2.5. Contaminación radiactiva en suelos	16
2.6. Dispositivos radiactivos empleados en la industria en Colombia	17
2.7. Normatividad Colombiana	18
2.7.1. <i>Resolución 18005 de 2010</i>	18
2.7.2. <i>Resolución 90874 de 2014</i>	19
2.8. Normatividad a nivel Internacional	19
2.9. Formas de almacenamiento de desechos radiactivos	20
2.10. Mecanismos de dispersión de la contaminación radiactiva en suelos	21
2.10.1. <i>Caracterización suelos CAN</i>	21
2.10.2. <i>Mecanismos de dispersión de radionúclidos en suelos</i>	23
3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA CUANTITATIVA	25
3.1. ¿Qué es caracterización radiométrica?	25

3.2. Espectrometría gamma	25
3.3. Fluorescencia de rayos X	26
3.4. Difracción de rayos X	27
3.5. ICP-MS	27
3.6. Espectrometría alfa	28
3.7. Espectroscopía Atómica ICP-OES	29
4. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS	30
5. VIABILIDAD TÉCNICO-AMBIENTAL DE LA TÉCNICA	35
6. CONCLUSIONES	38
BIBLIOGRAFÍA	39
ANEXOS	43

LISTA DE ABREVIATURAS

ICGDR	Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos
DAN	Dirección de Asuntos Nucleares
MME	Ministerio de Minas y Energía
OIEA	Organismo Internacional de Energía Atómica
SGC	Servicio Geológico Colombiano
OMS	Organización Mundial de la Salud
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
EPA	Environmental Protección Agency
ICP- MS	Espectrometría de Masas con plasma acoplado inductivamente
ICP-OES	Espectrometría de emisiones ópticas plasmáticas acopladas inductivamente

RESUMEN

En esta revisión monográfica teórica que se realiza para la primera fase de la investigación, se buscó indagar en la literatura, las técnicas de caracterización radiométricas empleadas para la identificación de radionúclidos en matriz suelos disponibles en Colombia y su viabilidad bajo factores como los económicos, preparación de muestras, versatilidad de la técnica, afectación ambiental, entre otras. Todo lo anterior aplicado a la identificación de radionúclidos de origen artificial en suelos aledaños a la única instalación colombiana autorizada para la gestión y almacenamiento temporal de fuentes radiactivas en desuso y desechos radiactivos.

Dentro de las técnicas espectrométricas seleccionadas, fueron evaluadas: la espectrometría alfa, espectrometría gamma, Fluorescencia de rayos X, Difracción de rayos X, ICP- MS e ICP-OES; y su relación con los criterios anteriormente mencionados. Dando como resultado, la selección de la técnica mediante espectrometría gamma de alta resolución, para emisores gamma requeridos en el análisis, así como la espectrometría alfa para aquellos radionúclidos que no emiten energía gamma que pueda ser identificados con la primera técnica.

Estas dos últimas técnicas, se seleccionaron gracias a su versatilidad, economía y disponibilidad en el país; puesto que se conoce que a nivel nacional, se cuentan con espectrómetros alfa y gamma operativos, lo que hace que la técnica sea de fácil acceso. El SGC en la sede CAN Bogotá, cuenta con alrededor de 10 espectrómetros gamma y 2 espectrómetros alfa que se pueden emplear para el análisis de las muestras de suelos de interés.

Finalmente, el factor concluyente para la selección de la técnica es el ambiental, que permitió reconocer mediante estudios realizados por la OIEA y por la EPA que la espectrometría gamma es la mayoritariamente empleada para los radionúclidos de interés a detectar en los suelos. Esta técnica además satisface las normativas nacionales e internacionales para la determinación y cuantificación de contaminación radiactiva en suelos, cumpliendo también con lo establecido en el Plan de Manejo Ambiental de la ICGDR, en cuanto a la prevención y mitigación del impacto ambiental de la práctica de almacenamiento de desechos radiactivos.

PALABRAS CLAVE: Técnica, espectrometría, suelos, radiológico, ambiental.

INTRODUCCIÓN

El uso de material radiactivo en Colombia se encuentra en crecimiento, pues día a día la tecnología permite que el uso no destructivo de las fuentes radiactivas sea beneficioso para cualquier industria, aun así, el uso, tenencia y operación de estas fuentes radiactivas se encuentran bajo control regulatorio por parte del Ministerio de Minas y Energía junto a su autoridad delegada el Grupo de Licenciamiento y Control del SGC.

A raíz de lo anteriormente descrito, las industrias y empresas que optan por emplear el material radiactivo dentro de sus operaciones están obligadas a realizar una gestión segura de las mismas dentro o fuera del país. La resolución 180005 de 2010 emitida por el Ministerio de Minas y Energía, establece las responsabilidades del generador y poseedor de dicho material. Allí se establece que se le debe garantizar la gestión adecuada todas las fuentes radiactivas en desuso bien sea a través del país de fabricación o de origen bajo un permiso de reexportación, el cual entra en vigor una vez se haya declarado la fuente en desuso y requiera de gestión. En caso de realizarse por esta vía, el propietario del material debe hacerse cargo de toda la documentación y operación administrativa hasta la llegada de la fuente radiactiva en desuso al país de gestión. Por otro lado, si la empresa adquirió la fuente radiactiva en desuso antes del año 2002 fecha en el Ministerio de Minas que establece que solo podrán gestionadas en el país todas aquellas fuentes que no posean el permiso de reexportación a través de su delegado encargado que es la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos del SGC siempre y cuando cumplan con los criterios de aceptación de esta.

Una vez sea aceptada en la instalación, la fuente es sometida a un proceso de acondicionamiento seguro previo a su almacenamiento temporal de acuerdo con el emisor y actividad; esta se almacena en fosos subterráneos hasta alcanzar los niveles de dispensa o se defina la disposición final. Dentro de las prácticas comunes de verificación y control del programa de Protección Radiológica para salvaguardar el público y el medio ambiente, se tiene el muestreo de aguas y suelos cercanos a la instalación, con el fin de monitorear la presencia de los radionúclidos predominantes almacenados tales como cesio-137, americio-241 y radio-226. En este sentido, se busca revisar la mejor técnica de identificación y cuantificación ideal para el análisis de muestras de matriz suelos en los alrededores de diferentes centros de almacenamiento a nivel internacional

que contribuyan y mejoren el proceso actual local, asegurando viabilidad técnica y ambiental para la única instalación de gestión de estos residuos en Colombia.

Para lograr el objetivo, se efectúa un análisis de las diferentes técnicas radiométricas disponibles en Colombia, que tengan alcance radiactivo, es decir: identificación de radionúclidos, cuantificación de actividad y versatilidad en el análisis de diferentes matrices. Todo lo anterior, desde una fase teórica a través de revisión de literatura, normativa internacional y nacional, artículos científicos publicados e instructivos internos de la instalación autorizada para la gestión de desechos radiactivos en Colombia. Con esto, se dará paso a una etapa posterior experimental de acuerdo a la técnica seleccionada, evaluando su impacto en la operación del almacén y al medio ambiente.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo General

Determinar la técnica de caracterización radiométrica para la identificación de radionúclidos de origen artificial en suelos alrededor de una instalación que almacena desechos radiactivos para seguimiento ambiental.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar las técnicas cuantitativas de caracterización radiométrica empleadas en la detección de radionúclidos de origen artificial en suelos.
- Seleccionar las técnicas de caracterización radiométrica disponibles en Colombia.
- Estudiar la viabilidad técnica ambiental del método de caracterización radiométrico seleccionado.

2. GENERALIDADES

2.1. Radiaciones ionizantes

Hace referencia a la capacidad que tiene un cuerpo de transportar la suficiente energía para ionizar el medio de propagación, es decir, extraer los electrones que están sujetos al átomo para generar una carga. Dicha radiación proviene de material radiactivo cuya característica es emitir energía de forma espontánea o artificialmente mediante por ejemplo aceleradores de partículas o generadores de rayos X. Existen tres tipos de radiaciones ionizantes de acuerdo a su origen, (bien sea corpuscular o electromagnética) denominadas partículas alfa, beta y gamma. Las partículas alfa, se caracterizan por tener una radiación corpuscular, son de bajo poder de penetración en materiales, pero alto poder de ionización, sin embargo, son perjudiciales para la salud en caso de inhalación o ingestión. (Universidad Pública de Navarra, 2010; IAEA, 2005)

Sus orígenes se dan a partir de la desintegración de uranio, polonio y radio; los principales emisores alfa son: el americio 241 que se encuentra en detectores de humo o densímetros nucleares y el radio 226 hallado en pararrayos. Ambos radionúclidos tienen la capacidad de emitir radiación gamma durante su desintegración por lo cual se pueden identificar mediante técnicas espectrométricas de rayos gamma. Por otro lado, las partículas beta, se caracterizan por ser radiaciones corpusculares, al tener una menor masa la producción de energía es menor, lo que disminuye el poder de ionización, pero incrementa el poder de penetración en los materiales; existen diversos materiales que logran detener el potencial de penetración como el agua, el aluminio, ropa de vestir, entre otras. No obstante, la inhalación o ingestión de estas partículas causan irradiaciones a órganos internos ocasionando efectos en la salud. Respecto a los principales emisores beta, se conoce el estroncio 90, el carbono 14, el tritio, entre otros. Estos radionúclidos se encuentran en fuentes de calibración, en equipos de datación o en el agua pesada. En cambio, las partículas gamma, se caracterizan por emitir radiación electromagnética y por poseer un bajo poder de ionización, aunque elevada capacidad de penetración en materiales (superior a las partículas beta y alfa). La forma de contención de estas partículas requiere del uso del concreto o el plomo, su exposición prolongada puede causar efectos irreversibles en la salud; dentro de los principales emisores gamma se encuentra el Cobalto 60, el Cesio 137, el Americio 241, el Radio

226, comúnmente empleados en la medicina nuclear diagnóstica o de tratamiento (Universidad Pública de Navarra, 2010).

2.2. Periodo de semidesintegración

Las especies radiactivas de estos elementos desprenden energía a través de partículas y ondas electromagnéticas de acuerdo con su naturaleza. Esta desintegración de átomos activos puede ser alfa, beta o gamma hasta lograr la estabilidad. Debido a este fenómeno es posible cuantificar el tiempo que tarda un radionúclido en reducir a la mitad la cantidad de átomos radiactivos gracias a la desintegración espontánea. Por otro lado, se tiene la definición de **vida media** que consiste en la media aritmética de una vida de una especie nuclear en un estado específico. Existen radionúclidos de vida corta (pueden ser segundos, minutos o días), de vida media (días y años) o de larga vida (miles de años). La figura 1, presenta ejemplos de los diferentes radionúclidos. (CCHEN, 2019; GTIS & FAO, 2019; OIEA, 2007).

Se denota $T_{\frac{1}{2}}$ y es igual al logaritmo natural de dos (2) sobre la constante de desintegración lambda (λ) la cual depende de cada radionúclido, como lo muestra la ecuación 1 (OIEA, 2007; Otero Pazos, 2014).

Ecuación 1. Periodo de semidesintegración.

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\text{Ln } 2}{\lambda}$$

La actividad en un radionúclido se expresa en Becquerelios (Bq) para el Sistema Internacional de Unidades, lo que mide es la desintegración nuclear por segundo o también llamado decaimiento radiactivo, hasta llegar a la estabilidad por medio de la emisión de fotones, electrones o partículas de acuerdo a la forma de decaimiento del radionúclido. Derivado de lo anterior, es posible conocer la concentración de actividad cuya magnitud se expresa en actividad sobre unidad de masa, la más ampliamente utilizada es Bq/g por cada muestra; estas muestras pueden estar en diferentes matrices análisis tales como aguas, suelos o gas; para un intervalo de tiempo entre t_0 y t el cual se calcula con la ecuación 2. (Otero Pazos, 2014)

Ecuación 2. Cálculo de la actividad.

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

2.3. Radionúclidos

2.3.1. De origen natural

Desde los inicios de la formación del planeta, diversos radionúclidos originados a partir de la radiación natural se encontraban presentes gracias a la transmutación, de radiactividad baja y con periodos de semividas casi iguales a la edad del planeta, fueron llamados *radionúclidos primordiales*. No obstante, existen otros que se generan radiación de forma constante pero no representan una afectación a la salud, impacto que, si es de gran cuidado con los *radionúclidos cosmogénicos*, tales como el carbono-14, sodio-22 o tritio. Así mismo, es fácil asociar la radiactividad natural a la presencia o carencia de rocas o sedimentos portadores, que al atravesar el proceso de decaimiento hasta su estado estable desprenden radiación ionizante. Los radionúclidos de origen natural se encuentran distribuidos en todo el planeta, especialmente entre la atmósfera y la litosfera, se conocen que existen alrededor de 320 isótopos en la naturaleza, de los cuales 70 poseen características radiactivas. Entre los más recurrentes se encuentra el potasio 40, el uranio-238, uranio-235, torio-232 cuyo decaimiento se realiza en forma de cadena de descendientes (Otero Pazos, 2014; Palau Miguel et al., 2019; Universidad Pública de Navarra, 2010).

2.3.2. De origen artificial

Esta característica artificial de los radionúclidos se debe a que son generados en industrias y no de forma natural. También llamados radiactividad antropogénica descubierta por Henri Becquerel en 1896, aunque, no fue hasta 1934 que la pareja de esposos Curie le darían el nombre de *radiactividad*. (Otero Pazos, 2014). En cuanto a las principales actividades que emplean o generan radionúclidos artificiales se pueden encontrar: la generación de energía eléctrica mediante reactores nucleares, operaciones en reactores de investigación, medicina, infraestructura, entre otros. Dentro de los radionúclidos ampliamente generados o empleados en estas aplicaciones se encuentran: el americio-241, bario-133, yodo-131, estroncio-90, radio-226, cesio-137, cobalto-60,

entre otros (Otero Pazos, 2014; Palau Miguel et al., 2019; Universidad Pública de Navarra, 2010).

2.4. Muestreo y preparación de muestra

Para el muestreo y preparación de muestra exclusiva en la identificación de radionúclidos, es necesario establecer los puntos de muestreo aledaños a la instalación, determinar la profundidad del muestreo y de acuerdo a la técnica de análisis empleada, revisar si es necesaria una preparación adicional a la que se realiza de forma convencional a la muestra de suelos: tamizado, secado y molido con el fin de reducir su tamaño de partícula y de allí seleccionar una porción de muestra significativa para el análisis correspondiente. Todo lo anteriormente descrito, se menciona en la norma técnica colombiana NTC 3656, la cual establece los lineamientos para la toma de muestras de suelo para determinar contaminación. (ICONTEC, 1994)

Por otro lado, es de vital importancia, conocer el radionúclido que se va a analizar ya de acuerdo a su desintegración radiactiva, bien sea alfa, beta o gamma, requieren de una preparación diferente. En el caso de la ICGDR, en la actualidad solo se identifica Radio-226, el cual es emisor gamma y alfa, sin embargo, este radionúclido posee una característica particular, para su análisis es necesario almacenarse en un recipiente de vidrio o de plástico sellado y hermético durante aproximadamente 20 días hasta que alcance el equilibrio secular; este fenómeno es el equilibrio entre los radionúclido padre Radio-226 y el radionúclido hijo (Radón-226) de vida corta derivados de la desintegración el cual tendría la misma concentración de energía del radionúclido padre, este procedimiento se realiza con el propósito de calcular la actividad de este a través de su radionúclido hijo, para el caso del Radio-226 se analiza el Radón-226. (OIEA, 2007)

Como se mencionó anteriormente, la ICGDR se basa en la normas técnicas Colombianas y en las resoluciones del Ministerio de Minas y Energía para la realización del instructivo empleado en la actualidad para la toma de muestra y preparación de las mismas titulado “MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIATIVOS”, allí plasma la metodología de muestreo que se realiza bajo el modelo zigzag con el fin de recolectar muestras a lo largo del sitio de interés al azar, sobre un espacio de dos dimensiones con un muestreo aleatorio simple. Se dividen en 4 zonas, la cuales a

su vez se subdividen en 6 y son denominadas A, B, C, D, E, F; la finalidad de esta sectorización es llevar un muestro completo de todo el terreno aledaño a través de los años, puesto que el monitoreo se realiza semestralmente en las 4 zonas y de a una subdivisión a la vez. Posteriormente, se realiza la preparación de la muestra que consiste en el secado, triturado, cuarteado y tamizado de los analitos. Seguido a esto, las muestras se disponen en recipientes de plástico aforados a 100 ml y se sellan herméticamente por 30 días hasta lograr el equilibrio secular, una vez transcurrido este periodo de tiempo, se envían las muestras a análisis por espectrometría gamma. (Servicio Geologico Colombiano, 2021)

Sin embargo, dentro de los análisis no se involucran radionúclidos como el Cs-137 o el Am-241 los cuales son susceptibles a contaminar el suelo en caso de presentarse una fuga de material radiactivo. Finalmente, el muestreo y preparación de la muestra son fundamentales para obtener un resultado representativo del material a analizar y su adecuado acoplamiento para la técnica analítica seleccionada, que para este caso es la determinación de radionúclidos en matriz de suelos aledaños a instalaciones de almacenamiento de desechos radiactivos a través de la espectrometría gamma.

2.5. Contaminación radiactiva en suelos

Se denomina contaminación del suelo cuando existe mayor presencia de un producto químico o sustancia ajena a las características normales del suelo de origen natural o antropogénico y los cuales generan efectos a la salud de cualquier organismo vivo con el que entre en contacto debido a su cualidad de ser difícilmente detectable (GTIS & FAO, 2019).

En los suelos, es posible identificar la presencia de radionúclidos de origen natural y antropogénico como el potasio 40, el uranio 238, torio 23, el cesio 137 o el estroncio 90 (Abril, 2005). Entre las principales fuentes de contaminación de suelos por vía antropogénica se encuentran: la fabricación y pruebas de armamento nuclear, accidentes nucleares, operaciones de instalaciones nucleares, instalaciones generadoras de energía eléctrica o de disposición de desechos radiactivos y nucleares. Los radionúclidos en el suelo son absorbidos a través de las plantas lo que a su vez permite el ingreso a la cadena alimenticia mediante los seres vivos que se alimentan de ellas. Así mismo, es

necesario realizar monitoreos radiológicos periódicos de las instalaciones radiactivas con el fin de evitar y controlar de forma adecuada cualquier riesgo potencial que atente contra la vida humana y el medio ambiente; entre los casos más comunes, se notan las descargas inadvertidas a ríos o alcantarillas que puedan ocasionar una contaminación a las fuentes hídricas llegando posteriormente a las viviendas o a los sistemas de riego y de alimentación de animales o cultivos. Cabe mencionar la posible filtración de contaminación radiactiva en las tierras, iniciando el círculo anteriormente mencionado de absorción de contaminantes radiactivos a través de las plantas y su incorporación en la cadena alimenticia. (ARN, 2012; GTIS & FAO, 2019)

De acuerdo con lo anteriormente descrito, en caso en que se detecte un radionúclido en los suelos analizados, esto implicaría una misión de descontaminación del terreno afectado, puesto que la forma de contención y descontaminación van de la mano con el tiempo de vida media de los radionúclidos no naturales que es de más de 30 años, afectando de forma sustancial a la población que tenga contacto estrecho con ella; bien sea en cultivos, plantaciones o edificaciones que se planeen construir, aumentando la probabilidad de ocurrencia de cáncer con el paso de los años. (FAO, 2019)

2.6. Dispositivos radiactivos empleados en la industria en Colombia

A nivel nacional, se emplean equipos con fuentes radiactivas para su aplicación en diferentes campos e industrias tales como la agrícola, la petrolera, la medicina nuclear, universidades, minería, manufacturera y demás. Por ejemplo, para la adaptación de infraestructura, se emplean los densímetros nucleares, para las industrias químicas se emplean los medidores de nivel y medidores espesor; por su parte, en la medicina se emplean los cabezales de teleterapia, entre otros. En la tabla 1, se presentan los diferentes dispositivos radiactivos empleados en las industrias anteriormente mencionadas, su uso y las características radiactivas de los mismos, los cuales al finalizar su vida útil han llegado a la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos en Colombia.

Figura 1.

Dispositivos radiactivos empleados en las industrias.

Dispositivo	Uso	Radionúclido	Vida media
Densímetro Nuclear	Medición de humedad y densidad en asfalto	Cs-137	30.08 años
		Am 241 /Be	432.6 años
Fuentes de estroncio	Fuentes de calibración	Sr90	28.79 años
Detectores de humo	Detecta incendios	Am-241	432.6 años
Pararrayos radiactivos	Atraen rayos	Am-241	432.6 años
		Ra-226	1600 años
Cabezales de Cobalto	Teleterapia	Co-60	1925.28 días
Blindajes de uranio empobrecido	Blindar fuentes radiactivas	U-emp o U-238	4.468×10^9 años
Medidores de espesor	Mide espesores de diferentes materiales	Cs-137	30.08 años
		Co-60	1925.28 días
Gammagrafía Industrial	Realiza radiografías industriales	Ir-192	
		U-emp o U-238	4.468×10^9 años

Nota. Información recopilada del inventario que se tiene en la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos del SGC.

2.7. Normatividad Colombiana

2.7.1. Resolución 18005 de 2010

El Ministerio de Minas y Energía en el año 2010 emitió una resolución que establece “El Reglamento para la Gestión de los Desechos Radiactivos en Colombia” el cual se distribuye en once capítulos que abarcan: disposiciones generales, definiciones, clasificación de los desechos radiactivos, responsabilidades, requisitos administrativos y técnicos, fuentes selladas en desuso, dispensa y descarga de material radiactivo, disposición final de desechos, procedimientos de emergencia; para el final, se contempla la verificación y acción coercitiva. En este reglamento, se dan las pautas para la gestión de los desechos peligrosos radiactivos, aunque, las directrices operacionales de la gestión están a cargo de la entidad delegada que es el Servicio Geológico Colombiano a través de la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivo, todo lo anterior, con aval y regulación del Ministerio de Minas y Energía a través del Grupo de Energías No Convencionales y Asuntos Nucleares. (Resolución 180005 de 2010)

2.7.2. Resolución 90874 de 2014

El Ministerio de Minas y Energía en el año 2014, expide la resolución 9-0874 que establece “Los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas”. Se compone de siete títulos en donde explica las diferentes autorizaciones que se pueden formular en el territorio colombiano en función de las necesidades de instalaciones u hospitales que requieran del uso y la gestión de las fuentes radiactivas en desuso como desecho radiactivo luego de cumplir con su vida útil. Todo lo anterior, con el fin de llevar a cabo sus actividades con el fin de cumplir con una misionalidad y un servicio o producto ofrecido. (RESOLUCION 9-0874 DE 2014, 2014)

2.8. Normatividad a nivel Internacional

A nivel internacional, existe un ente regulador llamado Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el cual se encarga de actualizar la documentación existente y publicada de forma permanente con el fin de colaborar a los países miembros a delinear las normativas, decretos, leyes y resoluciones de cada país en cuanto al uso, manipulación y gestión de fuentes radiactivas y material radiactivo con fines pacíficos.

En el año 2009, el OIEA presentó una guía de normas de seguridad del OIEA para la protección de las personas y el medio ambiente No. RS-G-1.9, en donde se establecen: la clasificación de fuentes radiactivas empleadas en industrias, sectores de la salud, la agricultura, la investigación y la enseñanza. Todo lo anterior con el fin de generar directrices útiles para los países miembros que adopten esta guía y la acomoden a sus propias necesidades. (OIEA, 2009)

Seguido a esto, el OIEA en el año 2015, publicó una segunda guía dentro de la colección de normas de seguridad para la protección de las personas y el medio ambiente: la clasificación de desechos radiactivos No. GSG-1; herramienta útil a la hora de tomar decisiones acerca del procesamiento, almacenamiento y disposición final de los desechos radiactivos sólidos mencionados. Así mismo, determina pautas para el control de los mismos a los países miembros que la adopten en su legislación. (Amano, 2015)

2.9. Formas de almacenamiento de desechos radiactivos

En Colombia, la normatividad y la infraestructura se encuentran adaptadas para la gestión de desechos radiactivos, debido a la ausencia de operación reactores de potencia nuclear como fuente de obtención de energía eléctrica cuyo combustible quemado generaría desechos nucleares. A raíz de esto, el Ministerio de Minas y Energía (entidad encargada de la regulación y control de cualquier fuente radiactiva o material en desuso del país), estableció una resolución que determina una clasificación de los desechos radiactivos, los cuales se dividen en 6 según la clase, la descripción del desecho y la opción de gestión; de igual manera, instaura las responsabilidades del poseedor del material radiactivo para su gestión segura, bien sea retornándola a su país de fabricación o solicitando su almacenamiento temporal en la ICGDR. (Resolución 180005 de 2010, 2010)

Por otro lado, es importante resaltar que el país carece de la tecnología e infraestructura para realizar una disposición final de estos desechos peligrosos; en la actualidad, existe la ICGDR que opera para almacenar temporalmente fuentes radiactivas en desuso que no tengan permiso de reexportación a su país de origen o de fabricación, dicha instalación tiene una vida útil de 70 años desde su construcción en el año 2009. (Resolución 180005 de 2010, 2010)

Seguido a esto, la ICGDR, cuenta con dos almacenes temporales para fuentes radiactivas en desuso, desechos y material radiactivo, además de un contenedor anexo que amplía la capacidad de almacenamiento transitorio de la Instalación y un vehículo de transporte de material radiactivo para los usuarios. Adicionalmente, cuenta con tres servicios:

1. Caracterización in-situ de material radiactivo dentro y fuera de Bogotá: en este servicio, se llevan a cabo operaciones para determinar las características físicas y radiológicas del material en caso de desconocerse información relevante para su gestión como la actividad, la tasa de dosis y el o los radionúclidos.
2. Almacenamiento temporal de fuentes radiactivas en desuso en tránsito para reexportación: este servicio se presta por día de almacenamiento de la fuente y de forma exclusiva para aquellas que por diversas circunstancias requieren de un almacenamiento seguro mientras se puede reexportar al país de origen o de fabricación para su gestión.
3. Gestión de Fuentes Radiactivas en Desuso o Material Radiactivo: el cual haya sido autorizado previamente por la autoridad reguladora delegada y no posea el permiso de reexportación a su país de origen o de fabricación. Todo lo anteriormente mencionado, se encuentra disponible en la página web del Servicio Geológico Colombiano en la sección de servicios de la Dirección de Asuntos Nucleares.

2.10. Mecanismos de dispersión de la contaminación radiactiva en suelos

2.10.1. Caracterización suelos CAN

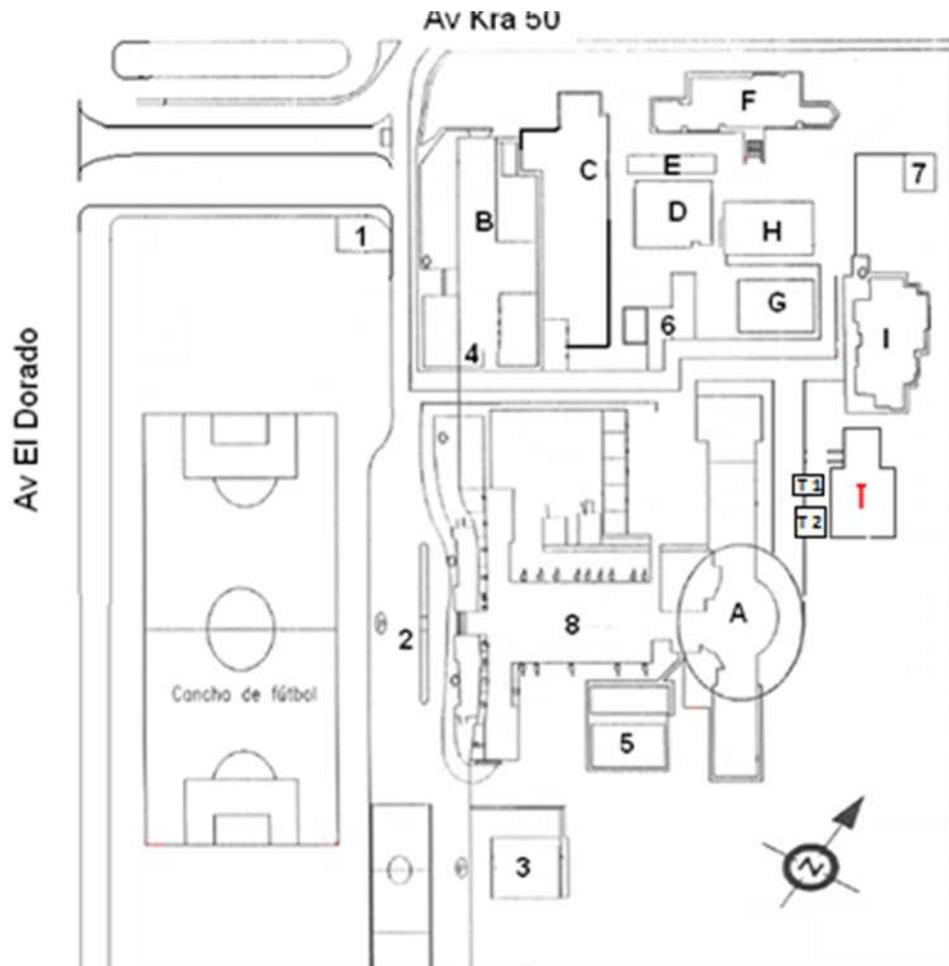
En el año 2006, el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), actualmente llamado SGC realizó una investigación titulada “Estudio de suelos y efectos locales del reactor nuclear Ingeominas CAN Bogotá” encabezado por el Doctor Jesús García, donde se determinan las características geotécnicas de los suelos y los efectos locales del reactor nuclear en los predios de la sede CAN (ver la figura 2), mediante dos fases; en la primera fase se evaluó la respuesta dinámica del depósito con el fin de utilizarlos en los análisis dinámicos de la estructura; durante la segunda fase, se realizó el cálculo de la capacidad del terreno y de los asentamientos basados en la teoría de consolidación. Como conclusión, llegaron a determinar, que los suelos cercanos al reactor nuclear el cual en la actualidad limita la norte con la ICGDR, presentan características

predominantemente arcillosas de alta plasticidad y de consistencia media-blanda hasta los 30 m de profundidad; seguidos de estratos arcillo arenosos de consistencia media-firme con secuencias de arenas limosas de compacidad alta (hasta los 176 m de profundidad), concluyendo con un estrato de arcilla de baja plasticidad y de consistencia firme hasta los 190 m de profundidad objetivo. (García, 2006)

En conclusión, el estudio realizado a los alrededores del reactor nuclear de investigación de la Sede CAN, dan una aproximación de las características de los suelos y las profundidades que se manejaron, los cuales serán de ayuda en la fase experimental puesto que se podría llegar a dar una correlación entre la profundidad y la aparición de radionúclidos de acuerdo a las características del suelo previamente caracterizado. Sin embargo, para esta fase inicial teórica de la investigación, esta información es relevante como estado del arte para relacionar lo encontrado por la FAO o por la OIEA en sus investigaciones, versus lo caracterizado específicamente al suelo de interés de la instalación que almacena de forma temporal los desechos radiactivos en Colombia contribuyendo al resultado planteado en el primer objetivo específico.

Figura 2.

Plano de la sede CAN del SGC.



Nota. Los números describen los lugares dentro de la sede CAN, 1. Portería Principal 2. Parqueadero. T. Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos radiactivos Almacén 2, T1. Ubicación normal del camión al lado del bloque T, T2. Contenedor anexo al Almacén 2, A Reactor Nuclear (encerrado con círculo). Tomado de: Ingeominas. García, J. (2006). *Estudio de suelos y efectos locales del reactor nuclear INGEOMINAS CAN.*

2.10.2. Mecanismos de dispersión de radionúclidos en suelos

La adsorción de cesio-137 en suelos depende del contenido de arcilla, el pH y la materia orgánica

propia del suelo. Adicionalmente, los microorganismos cumplen una importante función en el cambio geoquímico al catalizar las transformaciones químicas en el subsuelo producidas por los radionúclidos. Con el fin de describir el comportamiento de adsorción de un radionúclido, se revisa el coeficiente de reparto K_d , de acuerdo a los experimentos realizados y se conoce que entre más bajos sean los valores de K_d menor será la capacidad de adsorción del mismo. (GTIS & FAO, 2019)

Por otro lado, en 2019 la Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), logró determinar que el cesio se comporta similar al potasio en lo referente a la absorción; puesto que su biodisponibilidad es mayor cuando los suelos presentan una baja concentración de arcilla, pero alta de caolinita. (GTIS & FAO, 2019)

En el caso del yodo, presenta un comportamiento complejo debido a sus diversos estados de oxidación, sin embargo, la adsorción de este radionúclido es baja en suelos, siendo objeto de supervisión por parte del Organización Mundial de Salud (OMS); aun así, es posible la adsorción de este contaminante bajo condiciones ácidas. Por otro lado, el uranio, presenta una gran solubilidad si está en estado de oxidación +6, sin embargo, la adsorción de este radionúclido en suelos depende del pH. En el caso del plutonio, se une con gran facilidad al suelo ocasionando una inmovilización del radionúclido, depende del pH del suelo, se conoce que su máxima adsorción se da a un pH de 6. (GTIS & FAO, 2019)

Por otro lado, se han venido realizando investigaciones en España para usar el fosfoyeso para remediar suelos contaminados con radio-226 siempre y cuando no superen los 370 Bq Kg^{-1} de concentración y el impacto de este en los suelos agrícolas dando como resultado que la distribución de radio en estos suelos es uniforme sin importar la cantidad de tratamiento aplicado hasta una profundidad de 30 cm, haciendo casi nula la influencia de este compuesto en la afectación del público al que está expuesto. (Abril, 2005)

3. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA CUANTITATIVA

3.1. ¿Qué es caracterización radiométrica?

Se refiere a todas aquellas técnicas empleadas para identificar y cuantificar los radionúclidos presentes en materiales orgánicos e inorgánicos siempre y cuando se realice una desintegración radiactiva que puede ser de naturaleza alfa, beta o gamma, dentro del material objeto de análisis. La radiometría, por su lado, es la ciencia que se encarga de la medición de magnitudes asociadas a la radiación óptica a lo largo de todo el espectro electromagnético. (Dosimetry, 2020; Gómez González, 2006; Pons, 2011)

En este aparatado se describirán las técnicas mayormente empleadas en la identificación de radionúclidos en cualquier matriz de análisis, como la espectrometría gamma, fluorescencia de rayos X, ICP-MS, entre otras.

3.2. Espectrometría gamma

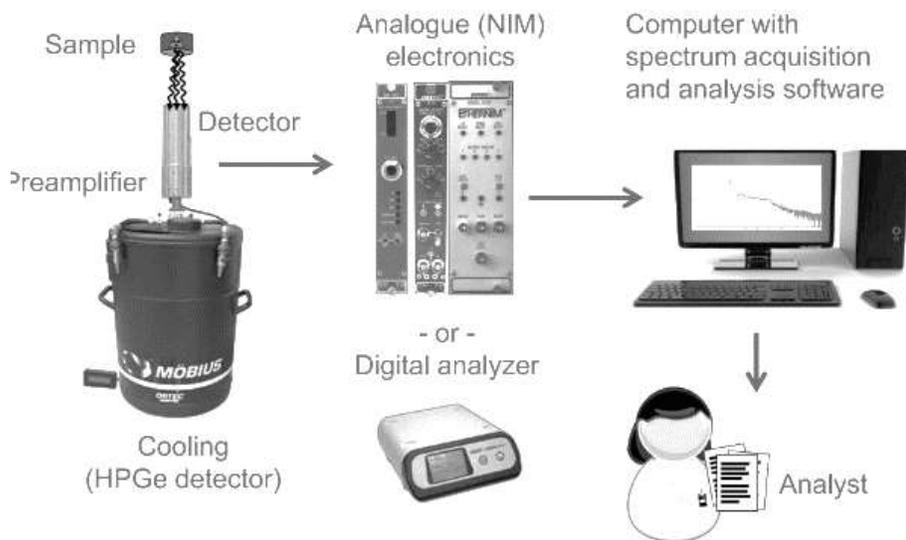
Es la técnica que identifica y mide las energías de las partículas cargadas y su desintegración que forma rayos gamma, determinando la presencia de elementos radiactivos de acuerdo con los espectros de energía emitidos por cada uno de ellos, contando la cantidad de gammas emitidos por el radionúclido en un sector energético característico. El equipo empleado para la generación de estos espectros se llama espectrómetro de rayos gamma, al cual va conectado un multicanal que es el encargado de almacenar los datos y convertirlos en espectros que serán posteriormente visualizados en el software asociado al equipo radiométrico. (Sánchez Gilberto, 2001)

El principio de funcionamiento de los espectrómetros gamma se basa en que la muestra emita rayos gamma los cuales interactúan con el cristal semiconductor del detector formando pares electrón-hueco que se mueven por la acción de un campo magnético, dichos electrones se recogen para producir un pulso eléctrico que posteriormente se capta en un amplificador en donde incrementa la intensidad del pulso el cual pasa por un convertidor análogo que lo transforma en un valor cuantitativo y lo clasifica en canales que a su vez se puede visualizar por la energía propia

de cada radionúclido, esta operación se realiza en el analizador multicanal el cual finalmente transfiere los datos al software de análisis del equipo los cuales se transmiten en forma de espectro para su análisis como lo muestra la figura 3. (JAVIER CAMACHO, 2018)

Figura 3.

Partes de un espectrómetro gamma.



Nota. Descripción gráfica de las partes de un espectrómetro gamma de laboratorio. Tomado de: Mauring, A., & Specialist, G. S. (2021b).

Webinar session 1 Gamma-ray spectrometry basics. March, 66.

Existen diferentes detectores para el sistema de espectrometría gamma, entre ellos se encuentra, el semiconductor de Germanio- Litio (Ge-Li), el detector de centelleo de yoduro de sodio (NaI) y el más robusto: el espectrómetro de germanio hiper puro (HPGe). La selección de cada detector depende de la resolución del espectro que se necesita, la geometría de análisis y el presupuesto que se tenga para la ejecución del proyecto. (Asencio, 2002)

3.3. Fluorescencia de rayos X

La Fluorescencia de rayos X o también llamada XFR, se encarga de estudiar las emisiones de fluorescencia emitidas luego de la excitación de una muestra, la cual fue sometida a una fuente de rayos X, interactuando con los átomos de la muestra desencadenando una emisión de radiación

característica denominada fluorescencia de rayos X. El fenómeno se ajusta a la ley de Bragg, que menciona que la radiación emitida incide sobre un cristal y es difractada en un ángulo θ según la longitud de onda λ . El detector empleado puede ser portátil o fijo (el principio de funcionamiento es el mismo), este detector tiene un rango de movimiento dependiendo del ángulo configurado; luego de acuerdo al ángulo empleado se mide el valor de la intensidad de la radiación para una longitud de onda específica que es función lineal de la concentración del elemento emisor incorporado en la muestra, generando un análisis cuantitativo, semicuantitativo y cualitativo de elementos con número atómico mayor que el del oxígeno. (García Rodríguez, 2017; Sánchez Gilberto, 2001)

3.4. Difracción de rayos X

Es el estudio de la difracción de los rayos X de la radiación reflejada por la muestra a través de una estructura cristalina cuando se incide sobre ella, esta técnica también se rige bajo la ley de Bragg. El equipo utilizado se llama difractómetro, el cual tiene un detector que se mueve a razón del ángulo configurado por la muestra registrando datos del haz reflejado, dando como resultado información acerca de la estructura cristalina e la muestra analizada en un espectro único. Es una técnica ampliamente utilizada gracias a que no es destructiva y sirve no solo para determinar la estructura cristalina de un material conocido sino también para un material desconocido. (ATACAMA, 2020; García Rodríguez, 2017)

Por otro lado, para el análisis de las muestras, estas deben estar posicionadas de forma horizontal y es rotada para reducir los diferentes efectos de orientación, así mismo, es necesario la utilización de un porta muestras para gramos de un milímetro de profundidad de material cristalino. Dentro de las principales aplicaciones de esta técnica, se encuentra la identificación de fases, la pureza de muestras, las medidas de tensiones, el análisis cuantitativo, la determinación de diagramas de fase, el estudio de texturas, entre otras. (UPCT, 2017)

3.5. ICP-MS

Es la unión de dos técnicas que forman el equipo: El plasma de acoplamiento inductivo o ICP que

es una fuente de ionización a presión atmosférica que en conjunto con un espectrómetro de masas o MS al vacío constituyen el equipo ICP-MS. Esta técnica requiere de una rigurosa preparación de la muestra previa al análisis, puesto que requiere ser molida, homogeneizada, calcinada, digestionada y secada. En caso de ser una muestra líquida, esta debe ser vaporizada e ionizada mediante un plasma de argón, que desprende los iones que posteriormente serán separados por el analizador del espectrómetro de masas y detectados en relación a la carga y a la masa de los mismos. Estos equipos deben ser calibrados por patrones certificados. Esta técnica presenta ventajas en cuanto a la alta presión que maneja, los bajos límites de detección que puede alcanzar y el costo económico de este puesto que es capaz de detectar los elementos e isótopos presentes en la naturaleza de forma simultánea y en cuestión de minutos. (*Espectrometría de masas*, 2017; García Rodríguez, 2017)

3.6. Espectrometría alfa

Esta es una técnica analítica nuclear o radiométrica que se caracteriza por detectar partículas alfa producto de la desintegración radiactiva de los radionúclidos, los cuales son captados por la señal electrónica que emite el analizador multicanal o MCA produciendo un espectro visible en el software asociado al equipo en energías características propias de estos emisores alfa. Se caracterizan por tener energías cinéticas elevadas por el orden de 3 y 7 MeV las cuales interactúan con la materia provocando ionización y consiguiendo una pérdida rápida de la energía. El principio de detección de esta técnica se basa en el recuento de iones, presenta un bajo nivel de fondo lo que facilita la detección de sucesos individuales, a pesar de ello, las muestras requieren una preparación exhaustiva si se busca analizar uranio. (García Rodríguez, 2017)

Al igual que la espectrometría gamma, en la espectrometría alfa se forman picos en forma de gaussiana, cuya máxima amplitud se distribuye linealmente con respecto a las energías halladas; sin embargo, requieren de una calibración tanto en energía como en resolución, la cual dependerá significativamente de parámetros como: la distancia fuente-detector, superficie y material del detector, la geometría de la fuente, entre otras. (García Rodríguez, 2017)

3.7. Espectroscopía Atómica ICP-OES

Es una técnica de espectrometría de emisiones ópticas plasmáticas acopladas inductivamente, la cual consta de 3 tubos concéntricos de cuarzo y sistemas de flujo de gas de plasma, gas auxiliar y gas de nebulizador. Posee un amplio espectro de elementos a analizar, es una técnica ideal para el análisis de elementos refractarios, es muy ágil y robusta, así mismo posee una gran tolerancia a los sólidos disueltos y medios orgánicos; la preparación de la muestra es muy sencilla, tiene pocas interferencias a nivel químico y es de fácil operación. Así mismo se tienen ciertas limitaciones como el análisis de ultratasas medioambientales y de alimentación en temas de preparación de muestra y la utilización de nebulizadores ultrasónicos; presenta interferencias espectrales, tiene altos costes operativos debido al consumo de argón, entre otras. (TECHNOLOGIES, 2018)

4. COMPARACIÓN DE TÉCNICAS

En este apartado se realizará la comparación de ventajas y desventajas entre las diferentes técnicas explicados en el numeral 3 frente a parámetros como la sensibilidad de la técnica, la preparación de muestra, la puesta en marcha, los recursos necesarios para la implementación de la técnica, el factor económico necesario para su habilitación, etc. Así mismo, se compara contra las necesidades específicas para la identificación de radionúclidos en muestras en matriz suelos de las zonas aledañas a la ICGDR.

Figura 4.

Comparación entre técnicas espectrométricas.

Técnica	Ventajas	Desventajas
Espectrometría gamma	<ul style="list-style-type: none"> - No requiere preparación de muestra - Posee Límites de detección bajos - Pueden ser portátiles o fijos - Son de fácil utilización - Los mantenimientos se pueden realizar por los mismos empleados - Identifica y cuantifica actividad de radionúclidos - Técnica no destructiva 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo aplica para radionúclidos emisores gamma - Su efectividad depende de la geometría de la muestra, la preparación de muestra previa en caso de identificar radionúclidos de origen natural o Ra-226 artificial - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se debe calibrar con regularidad
Fluorescencia de rayos X	<ul style="list-style-type: none"> - Pueden ser portátiles o de fijos - Son de fácil utilización - Identifica y cuantifica el % de cada elemento presente en el material analizado - No requiere de preparación de muestra 	<ul style="list-style-type: none"> - No cuantifica radionúclidos - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se debe calibrar con regularidad - Los límites de detección son altos

Técnica	Ventajas	Desventajas
<p>Difracción de rayos X</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Técnica no destructiva - Identifica estructuras cristalinas - Reconoce materiales desconocidos - Se puede emplear para diversos estudios 	<ul style="list-style-type: none"> - No cuantifica radionúclidos - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se debe calibrar con regularidad - Los límites de detección son altos - La muestra necesita una preparación - Durante el análisis debe ser rotada en diferentes ángulos.
<p>ICP-MS</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Técnica no destructiva - Posee una alta presión. - Posee bajos límites de detección. - El costo es económico - Es capaz de detectar los elementos e isotopos presentes en la naturaleza de forma simultánea y en cuestión de minutos 	<ul style="list-style-type: none"> - Requiere una rigurosa preparación - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se deben ser calibrados por patrones certificados.
<p>Espectrometría alfa</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Son ampliamente utilizados para la identificación y cuantificación de radionúclidos de origen natural - Son de fácil utilización - Los mantenimientos se pueden realizar por los mismos empleados - Identifica y cuantifica 	<ul style="list-style-type: none"> - Solo aplica para radionúclidos emisores alfa - Requiere de preparación de muestra - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se debe calibrar con regularidad - Su efectividad depende de la

Técnica	Ventajas	Desventajas
	actividad de radionúclidos - Técnica no destructiva	geometría de la muestra, la fuente etc.
ICP-OES	- Técnica no destructiva - Posee un amplio espectro de elementos a analizar. - Es una técnica ideal para el análisis de elementos refractarios. - Es muy ágil y robusta, así mismo maneja una precisión superior al 1%. - Posee una gran tolerancia a los sólidos disueltos y medios orgánicos. - La preparación de la muestra es muy sencilla. - Tiene pocas interferencias a nivel químico. - Es de fácil operación.	- Tiene ciertas limitaciones como el análisis de ultratasas medioambientales y de alimentación en temas. - Utiliza nebulizadores ultrasónicos - Presenta interferencias espectrales - Tiene altos costes operativos debido al consumo de argón. - No identifica radionúclidos. - Se deben comprar fuera del país - Requiere de expertos para su instalación - Se debe calibrar con regularidad

Nota. Se realiza la comparación entre las técnicas anteriormente vistas y los criterios de selección analizados de cada una de ellas.

Figura 5.

Criterios necesarios para la identificación de radionúclidos artificiales por medio de técnicas espectrométricas.

Criterio	SI	NO	Observaciones
Se requiere tamizado de la muestra	X		
Se requiere realizar proceso de molienda	X		
Se requiere secado de la muestra	X		
Se requiere establecer el equilibrio secular		X	Si se requiere si se analiza Ra-226

Nota. Datos tomados del Instructivo de Muestreo de aguas y suelos empleado en la ICGDR. (ver anexo 1).

Los criterios empleados en la figura 5, son tomados del instructivo vigente de la instalación (ver anexo 1), en la actualidad se esta revisando la pertinencia de la ampliación o corrección de los mismos.

De acuerdo con lo presentado en las figuras 4 y 5, las técnicas para la identificación de radionúclidos artificiales en matriz suelos seleccionados por su versatilidad y fácil adaptación son la espectrometría gamma y la espectrometría alfa. Sin embargo, el ICP-OES promete ser una técnica aún más robusta que las dos anteriores y de la cual se puede complementar el análisis de suelos para una mejor comprensión de la dinámica de los radionúclidos en suelos, aunque su fuerte no sea la identificación y cuantificación de radionúclidos. (TECHNOLOGIES, 2018; García Rodríguez, 2017;g JAVIER CAMACHO, 2018)

En cuanto a la preparación de la muestra, va a depender del radionúclido a identificar, para el caso de espectrometría gamma; como bien se vio anteriormente los radionúclidos Cs-137, Am-241 y Ra-226 presentan emisores gamma, lo que hace ideal la utilización de esta técnica. Aun así, para el caso de Ra-226 se requiere de una preparación adicional, al tener que esperar a que se cumpla el equilibrio secular para facilitar su identificación. (ICONTEC, 1994)

Asimismo, para el caso de Am-241, es posible emplear tanto el espectrómetro alfa como gamma puesto que es un doble emisor.

En conclusión, ser la única instalación autorizada para la gestión de desechos radiactivos en Colombia desde apenas una década, el no contar con investigaciones locales similares en temas de contaminación radiactiva en suelos y la insuficiente literatura hallada para estudios de caso afines, ha dificultado la comparación con estudios de caso nacionales e internacionales. Se encontró mayor información enfocada principalmente hacia instalaciones de generación de energía nucleoelectrónica a través de la fisión de uranio. (CCHEN, 2019)

5. VIABILIDAD TÉCNICO-AMBIENTAL DE LA TÉCNICA

En Colombia, la regulación y el conocimiento de las entidades ambientales con respecto a las fuentes radiactivas en desuso o material radiactivo y su relación con el medio ambiente y el público es bajo, por lo cual, se han venido adoptando lineamientos internacionales que son proveídos por el Organismo Internacional de Energía Atómica, quien dictamina guías para todos los países miembros que son de consulta libre y así se puedan nutrir las regulaciones nacionales en temas radiactivos y nucleares.

A efectos de este trabajo, se realizó una revisión de la normativa a nivel nacional con respecto a la contaminación radiactiva en suelos, la cual solo arrojó las resoluciones vistas en el numeral 2.7 de este trabajo y la ley 1252 de 2008 del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, *"Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones."* Donde se incluye el término "residuo nuclear" y se mencionan las obligaciones, responsabilidades y sanciones que tienen los generadores de residuos peligrosos en el país, sin embargo, en la ley no se contempla la contaminación radiactiva en suelos. (Ley 1252 de 2008, 2008)

De acuerdo a lo anterior, la OIEA establece una guía en el año 2005 para el monitoreo ambiental y de fuentes con propósitos de radio protección, donde describe los diversos tipos de monitoreo tanto al medio ambiente como al ser humano, en cada etapa del periodo en desuso de una fuente radiactiva. Allí establece que, para el seguimiento y monitoreo de los desechos radiactivos posteriormente acondicionados en las facilidades, se debe monitorear tanto la superficie cercana de la instalación, como en lo profundo de las facilidades que tengan almacenamiento subterráneo, con el fin de controlar y revisar la migración de radionúclidos que puede efectuarse años después del almacenamiento o clausura de la instalación. Estas mediciones ambientales se deben efectuar al aire, al agua, al suelo, los sedimentos, la vegetación, los animales o los centros de provisiones de alimentos cercanos a la instalación a través de programas de monitoreo ambiental. (IAEA, 2005)

Adicionalmente, aporta las herramientas necesarias para el muestreo en todas las matrices ambientales requeridas y los métodos de análisis de acuerdo a cada una de ellas; para el caso de la determinación de la actividad en suelos, sugiere la espectrometría gamma in situ, técnica que fue seleccionada por su versatilidad, facilidad en la preparación de la muestra y en el análisis de la misma como se mencionó en el apartado 4 del presente trabajo.

Siguiendo con la revisión bibliográfica, en el 2012, el Environmental Protección Agency de los Estados Unidos o EPA, desarrolló una guía para el análisis de muestras de radionúclidos en suelos para los laboratorios radiológicos, donde se detalla el procedimiento a seguir para el muestreo en suelos en caso de requerirse una detección de radionúclidos, así mismo, describe las técnicas de análisis empleadas de acuerdo a cada necesidad, entre ellas están la fluorescencia de rayos X, Microscopía electrónica y la espectrometría gamma; se enfoca en la última técnica relacionada anteriormente, donde asegura que para un análisis riguroso, la muestra requiere de una homogenización para que sea más fácil la identificación de radionúclidos en los puntos calientes de rayos gamma emitidos. (EPA, 2012)

Gracias a la literatura relacionada anteriormente, es posible establecer con certeza que la técnica ambientalmente favorable para la determinación de radionúclidos presentes en suelos a causa del almacenamiento de fuentes radiactivas en desuso y material radiactivo en instalaciones es la espectrometría gamma, debido a su amplio rango de detección, puesto que la mayoría de radionúclidos que son susceptibles de migración son los emisores gamma, siempre y cuando se establezca un protocolo de muestreo que asegure la homogeneidad de la muestra y en caso de requerirse asegurar el equilibrio secular de la misma. Por otro lado, se ve la necesidad de ampliar la librería de análisis de las muestras en la ICGDR que en la actualidad analiza radio-226, para que se adicione el análisis y la determinación de Cesio-137 y de Americio-241 de acuerdo a lo descrito en la guía de la EPA. (EPA, 2012; ARN, 2012; GTIS & FAO, 2019)

Por último, la ICGDR cuenta con un Plan de Manejo Ambiental el cual es supervisado por la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá donde se establecen las medidas de prevención, mitigación y acciones correctivas para evitar una contaminación radiactiva en el medio ambiente y al público, derivada de las actividades y operaciones realizadas en la instalación; al continuar los

análisis de estas muestras bajo la técnica de espectrometría gamma, es posible dar cumplimiento a lo establecido en la ley 1252 de 2008 con respecto a las obligaciones de los gestores de residuos peligrosos y también lo establecido en la Resolución 180005 de 2010 del MME para la Gestión de Desechos Radiactivos en Colombia. (Resolución 180005 de 2010, 2010)

Como se mencionó a lo largo de la investigación, al ser la única instalación autorizada para la gestión de desechos radiactivos en Colombia, es difícil realizar una comparación con estudios de caso nacionales e internacionales, puesto que la literatura se guía más hacia instalaciones de generación nucleoelectrónica, etapa que no está contemplada ni en ejecución en este país. Sin embargo, en este apartado se menciona la normatividad colombiana aplicable y el vacío que aún existe para ciertos temas radiactivos a causa de la escasa investigación en el tema. Así mismo, se describen las recomendaciones desde la parte teórica que son viables, aun así, la forma más adecuada de conocer a fondo su pertinencia es realizar pruebas experimentales.

6. CONCLUSIONES

La técnica seleccionada para el muestreo de suelos en zonas aledañas a instalaciones de gestión de desechos radiactivos es la espectrometría gamma para emisores gamma y la espectrometría alfa para dichos emisores, sin embargo, no se descarta la viabilidad de implementación de la técnica ICP-OS o ICP-MS gracias a su alta sensibilidad.

Se identificaron y se seleccionaron seis técnicas cuantitativas de caracterización radiométrica que son empleadas en Colombia para la identificación de radionúclidos artificiales en suelos, así mismo, se realizó una revisión de las especificaciones técnicas de cada una de ellas en cuanto a sensibilidad, preparación de muestras, entre otros.

Se comprobó la viabilidad técnica- ambiental de la técnica de espectrometría gamma mediante lo relacionado por el Organismo Internacional de Energía Atómica y la Agencia de Protección Ambiental referente al análisis de muestras de suelos para la determinación de radionúclidos de origen artificial.

Gracias a la técnica de espectrometría gamma es posible cumplir con lo requerido en la regulación colombiana y en el Plan de Manejo Ambiental de la instalación para la prevención de contaminación radiactiva en suelos aledaños a la ICGDR a causa de las operaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Abril, J. M, Periañez R, García-León. M y García Tenorio. R, (2005) Manjón. G. *Mecanismos de transferencia de radionucleidos en el medio ambiente*. En: Vas Jornadas de Investigación y desarrollo en Gestión de Residuos Radiactivos. Sesión Protección Radiológico y Restauración Ambiental.
<https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/23497/Ponencia%20Mecanismos%20de%20transferencia%20de%20radionucleidos%20en%20el%20medio%20ambiente%20Garcia%20Leon.pdf>
- Autoridad Regulatoria Nuclear de Argentina. (2012). *La ARN y la vigilancia radiológica ambiental en Argentina*. [arn-5 vigilancia radiologica ocupacional y ambiental ia-1999.pdf \(argentina.gob.ar\)](#)
- Comisión Chilena de Energía Nuclear. (2019). *Ley de Decaimiento Radiactivo Ley de decaimiento radiactivo*. <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-de-valparaiso/radiologia/ley-de-decaimiento-radiactivo/4207963>
- Dosimetry, R. (2020). *¿Qué es la datación radiométrica?* Radiation Dosimetry. <https://www.radiation-dosimetry.org/es/que-es-la-datacion-radiometrica/>
- Environmental Protection Agency. (2012). *EPA 402-R-12-006. Radiological Laboratory Sample Analysis Guide for Incident Response - Radionuclides in Soil*. https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/402-r-12-006_soil_guide_sept_2012.pdf
- García Rodríguez, R. (2017). *Radionucleidos en suelos: caracterización y contenido*. (Trabajo de grado). Universidad de Valladolid. Repositorio Institucional. <https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/24361/TFG-I->

[623.pdf;sequence=1](#)

Gómez González, E. (2006). *GUÍA BÁSICA DE CONCEPTOS DE RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA v.1.0*. Universidad de Sevilla. <http://laplace.us.es/campos/optica/general/opt-guia2.pdf>

GTIS, & FAO. (2019). La Contaminación Del Suelo: Una Realidad Oculta. In *Organizacion de las Naciones Unidas para la alimentacion y la agricultura FAO*. <http://www.fao.org/3/I9183ES/i9183es.pdf>

IAEA. (2005). Environmental and source monitoring for purposes of radiation protection Safety. In *PLoS ONE* (Vol. 12, Issue 1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0171100>

ICONTEC. (1994). NTC-3656 *Toma de muestras de suelo para determinar contaminación* (p. 10).

Ingeominas. García, J. (2006). *Estudio de suelos y efectos locales del reactor nuclear INGEOMINAS CAN*.

Camacho, J. P. (2018). *Escuela Superior Politécnica De Chimborazo Presentes En El Suelo De La Provincia De Chimborazo* ” (Trabajo de grado). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/8970>

Mauring, A., & Specialist, G. S. (2021a). *Efficiency calibration of HPGe detectors*. May, 59.

Mauring, A., & Specialist, G. S. (2021b). *Webinar session 1 Gamma-ray spectrometry basics*. March, 66.

Museo Nacional de Ciencias Naturales. (2017) *Espectrometría de masas*. https://www.mncn.csic.es/docs/repositorio/es_ES/investigacion/cromatografia/espectrometría_de_masas.pdf

Ley 1252 de 2008, Por la cual se dictan normas prohibitivas en materia ambiental, referentes a los

residuos y desechos peligrosos y se dictan otras disposiciones. 27 de noviembre de 2008.

Resolución 180005 de 2010, [Ministerio de Minas y Energía]. Por la cual se adopta el reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia. 5 de enero de 2010

Resolucion 9-0874 DE 2014, [Ministerio de Minas y Energía]. Por medio de la cual se establecen los requisitos y procedimientos para la expedición de autorizaciones para el empleo de fuentes radiactivas y de las inspecciones de las instalaciones radiactivas. 12 de agosto de 2014.

OIEA. (2007). *Glosario de Seguridad*. <http://www-ns.iaea.org/standards/>

OIEA. (2015). *Seguridad mediante las normas internacionales “Los Gobiernos, órganos reguladores y explotadores de todo el mundo deben velar por que los materiales nucleares y las fuentes de radiación se utilicen con fines benéficos y de manera segura y ética. Las normas de seguridad del OIEA están concebidas para facilitar esa tarea, y aliento a todos los Estados Miembros a hacer uso de ellas.”* <http://www-ns.iaea.org/standards/>

OIEA. (2009). *Normas de seguridad del OIEA. Clasificación de Fuentes Radiactivas*. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1227s_web.pdf

Otero Pazos, A. (2014). *(Tesis Doctoral). Estudio de la radiactividad ambiental en suelos de la costa norte de A Coruña y Lugo. Universidade da Coruña*. https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/11928/OteroPazos_Alberto_TD_2014.pdf?sequence=2

Palau Miguel, M., González Muñoz, S., Alvares Cortiñas, M., & García Nieto, A. (2019). Ministerio de Snidad, Consumo y Bienestar Social. Análisis de los riesgos derivados de la exposición de la población a las sustancias radiactivas en el agua de consumo humano. https://www.sanidad.gob.es/profesionales/saludPublica/docs/RADIATIVIDAD_EN_ACH_V2.pdf

- Pons, J. C. A. (2011). *Radiometría y fotometría: Magnitudes y leyes básicas / e-medida*. E-Medida.
<https://www.e-medida.es/numero-9/radiometria-y-fotometria-magnitudes-y-leyes-basicas/>
- Sánchez Gilberto y Gonzalez Lenin. (2001). *Caracterización geoquímica y radiométrica de dos secciones estratigráficas de la formación La Luna , en el estado Táchira. (Trabajo de Grado)* Universidad Central de Venezuela.
- Servicio Geológico Colombiano (2020). Lineamientos técnicos para el procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio de materiales radiactivos de origen natural en los PPII.
<https://www.minenergia.gov.co/documents/10192/24282138/Lineamientos+Tecnicos+An%C3%A1lisis+de+Materiales+Radioactivos+SGC.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2021). *Muestreo y preparación de aguas y suelos en la zona aledaña al almacén 2 de desechos radiactivos* (p. 11). Anexo 1 de la monografía.
- Sibello Hernández. R.Y, Alonso. Hernández M.C, Díaz Asencio. M y Cartas Águila. H (2002). AGRICULTURAL PRODUCTS OF THE CENTER-SOUTH REGION OF CUBA. Revista Nucleus. 31(31), pp.27-33.
https://www.researchgate.net/publication/263160972_Caracterizaci%27on_radiactiva_de_los_suelos_y_productos_agr%27icolos_de_la_regi%27on_centro_sur_de_Cuba
- Technologies. (2018). *Espectroscopía atómica ICP-OES* (p. 31).
- Univesidad de Atacama. (2020). *Difracción de rayos x [Dispositiva de power point]. Repositorio Universidad de Atacama.* <https://www.fceia.unr.edu.ar/~matcon/apuntes/cap02.pdf>
- Universidad Pública de Navarra. (2010). *Clasificación de radiaciones ionizantes : Naturaleza de la radiación.*
- Universidad Politécnica de Cartagena. (2017). *Difracción de rayos X.*
https://www.upct.es/~minaees/difraccion_rayosx.pdf

ANEXO 1

INSTRUCTIVO DE MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Página 1 de 11

1. OBJETIVO

Definir las instrucciones necesarias para el muestreo y la preparación de muestras de aguas y suelos para análisis radiométricos.

2. ALCANCE

Este documento aplica solamente para el muestreo y preparación de muestras de aguas y suelos en la zona aledaña a la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos - Almacén 2 en la Sede CAN del Servicio Geológico Colombiano.

3. BASE LEGAL

- Resolución 3326 de 2007 de la Secretaría Distrital de Ambiente. “Por la cual se establece el Plan de Manejo Ambiental - PMA”, para el proyecto “Ampliación de las Facilidades de Almacenamiento Temporal de Fuentes Radiactivas en Desuso.
- Resolución 18 0005 de 2010 del Ministerio de Minas y Energía, “Por la cual se adopta el Reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia”.
- Resolución 18 1434 de 2002 del Ministerio de Minas y Energía, “Por la cual se adopta el Reglamento para la gestión de los desechos radiactivos en Colombia”.
- Resolución 0062 de 2007 del Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales IDEAM, “Por la cual se adoptan los protocolos de muestreo y análisis de laboratorio para la caracterización fisicoquímica de los residuos o desechos peligrosos en el país”.
- Norma Técnica Colombiana NTC 3656. Gestión Ambiental. Suelo. Toma de muestras de suelo para determinar contaminación.
- Norma Técnica Colombiana NTC 5667-1. Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Muestreo. Directrices para el diseño de programas de muestreo.
- Norma Técnica Colombiana NTC 5667-2 Gestión Ambiental. Calidad del Agua. Técnicas generales de Muestreo.
- Norma Técnica Colombiana NTC 5667-3 Calidad del Agua. Muestreo. Parte 3: Directrices para la preservación y manejo de las muestras.

4. DEFINICIONES

- **Contaminación:** Presencia de material radiactivo dentro de un material o en su superficie o dentro del cuerpo humano o en otro lugar que no sean deseables y que puedan ser nocivas.
- **Geometría III¹:** Recipiente de polietileno cilíndrico aforado de 100 ml en donde se almacena la muestra de aguas o de suelos y se sella para su posterior análisis en el laboratorio una vez alcance el equilibrio secular.
- **Material Radiactivo:** Cualquier material que presente un nivel de radiación o actividad específica por encima de los límites establecidos.

¹ Radiometría norma.

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 2 de 11

- **Muestra:** Porción de elementos tomada de forma aleatoria de una población con el propósito de evaluar sus características.
- **Muestra de agua:** Porción representativa de una masa de agua con el propósito de examinar diversas características.
- **Muestra de suelo:** Pequeña porción de suelo que representa el volumen que éste ocupa en el campo, en un área y profundidad determinada, uniforme en pendiente, vegetación, material parental, clima, tipo y grado de erosión, uso y manejo.
- **Muestreo:** El proceso de sacar una porción, procurando que sea representativa, de una masa de agua o suelo con el propósito de examinar diversas características definidas.
- **Radionúclido:** Núcleo de un átomo con propiedades de desintegración espontánea.
- **Suelo:** Sistema natural desarrollado o desarrollándose a partir de una mezcla de minerales y restos orgánicos, bajo la influencia del clima y del medio biológico; es un sistema de tres fases (sólida, líquida y gaseosa), que se diferencia en horizontes y sirve como medio natural para el crecimiento de las plantas.
- **Suelo contaminado:** es aquel que por acción natural y principalmente antrópica recibe sustancias extrañas de tipo sólido, líquido o gaseoso, que limitan, o pueden limitar, el crecimiento de las plantas y afectan desfavorablemente la biota edáfica, la vida animal y la salud humana.

5. CONDICIONES GENERALES

El análisis de muestras de aguas y suelos en la zona aledaña a la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos hace parte del programa de vigilancia radiológica y del seguimiento al Plan de Manejo Ambiental de la Instalación.

Las muestras de suelo se realizan a una profundidad representativa para realizar el análisis radiométrico, con respecto a la profundidad de los fosos de almacenamiento temporal, y poder asegurar que no se tiene el suelo contaminado. En este caso, la toma se realiza a \approx entre 0,5 m a 1 m de profundidad.

Las muestras de agua se toman a la profundidad máxima posible, eso dependiendo del nivel de los pozos de los cuales se toman las muestras.

5.1 Tipo de muestreo

5.1.1 Suelos

Para suelos se realiza muestreo al azar en zig zag, este método consiste recorrer las zonas de muestreo en zig zag y recolectando las muestras en sitios al azar. O muestreo sobre Espacio dos dimensiones con muestreo aleatorio simple.

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 3 de 11

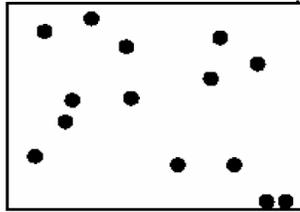


Figura 1. Muestreo aleatorio simple.

5.1.2 Aguas

Para aguas se realiza un muestreo manual, debido a que son pocos puntos de muestreo, se debe utilizar el equipo de muestreo o una bomba para extraer la muestra.

5.2 Localización de los puntos de muestreo de Aguas y las zonas de muestreo de Suelos

Tomando como punto fijo el almacén 2, se debe realizar un muestreo en el orden numérico que se estableció para cada punto, donde los puntos de muestreo se exponen en el plano de ubicación (ver Figura 3), los cuales están definidos a continuación:

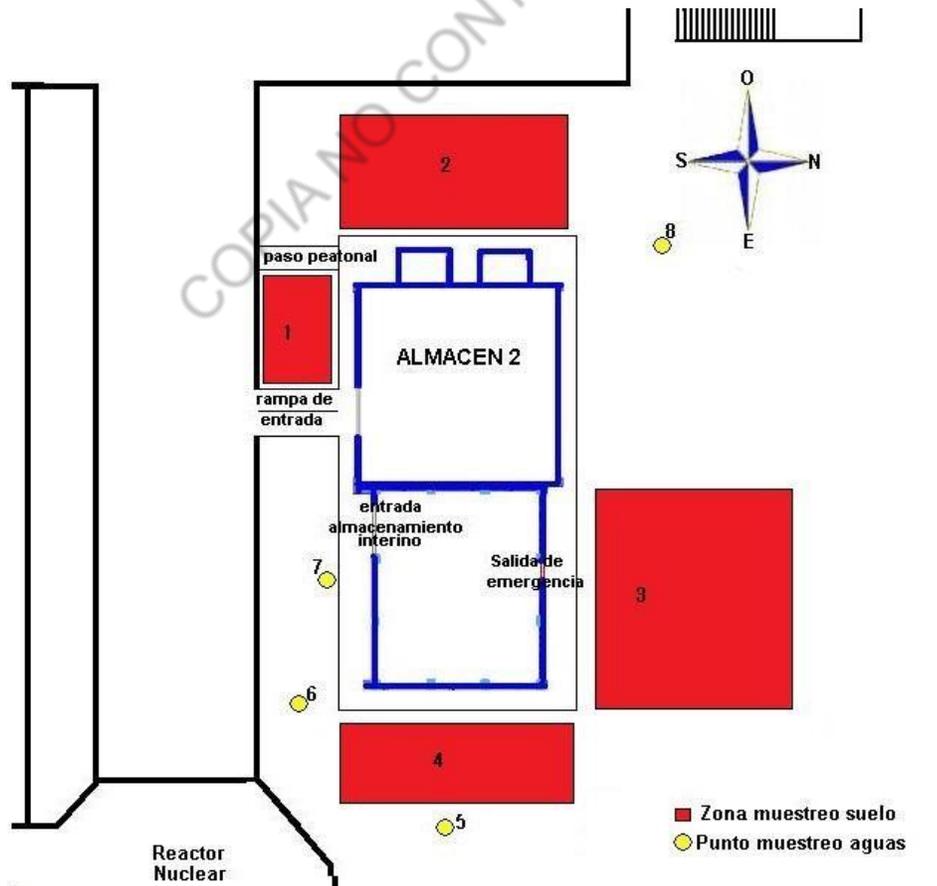


Figura 2. Localización puntos y zonas de muestreo alrededor del Almacén 2

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 4 de 11

5.2.1 Suelos

- **Zona 1:** A 5 metros de la pared Sur, entre la entrada peatonal y la rampa.
- **Zona 2:** A 10 metros de la pared Occidental, frente a la puerta de ingreso.
- **Zona 3:** A 10 metros de la pared Norte, frente a la salida de emergencia.
- **Zona 4:** Frente a la pared oriental, a 6 metros de esta.

5.2.2 Aguas

- **Punto 5:** Piezómetro: Ubicado a 8 metros de la pared oriental del almacén 2, este pozo se emplea para tomar muestras de aguas freáticas.
- **Punto 6:** Pozo de desagüe del filtro del almacén 2: Se halla 3 metros al sur de la esquina sur oriental del almacén 2, a este pozo llegan las aguas provenientes del filtro ubicado en la parte externa de la zona de fosos del almacén.
- **Punto 7:** Pozo de muestreo. Ubicado a 2 metros de la entrada a la zona de almacenamiento temporal, a este pozo llegan las aguas provenientes de la zona de operaciones y de los fosos de almacenamiento (en el caso de inundación).
- **Punto 8:** Pozo profundo: Ubicado a 4 metros al norte de la esquina noroccidental del almacén 2, este pozo tiene más de 100 metros de profundidad.

5.3 Plan de muestreo de suelos

De acuerdo con el tipo de muestreo y las zonas, se determinan los puntos donde se toman las muestras; las cuales harán parte del plan de muestreo con el fin de que se analice toda la zona con el transcurrir del tiempo.

5.3.1 Puntos de muestreo

Zona 1.

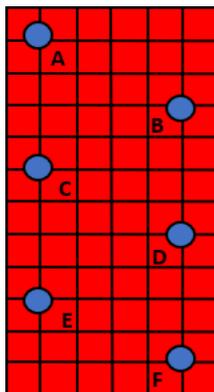


Figura 3. Puntos de muestreo Zona 1

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 5 de 11

Zona 2.

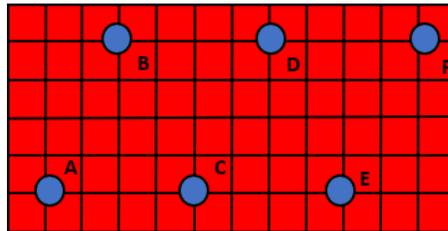


Figura 4. Puntos de muestreo Zona 2

Zona 3.

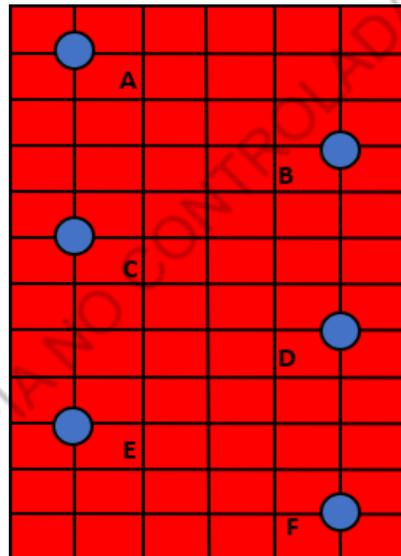


Figura 5. Puntos de muestreo Zona 3

Zona 4.

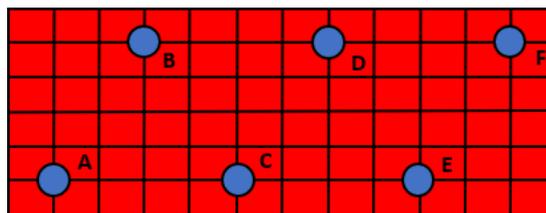


Figura 6. Puntos de muestreo Zona 4

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 6 de 11

5.3.2 Plan de muestreo

Año	Semestre	Puntos de muestreo
1	1	1A, 2A, 3A y 4A
	2	1B, 2B, 3B y 4B
2	1	1C, 2C, 3C y 4C
	2	1D, 2D, 3D y 4D
3	1	1E, 2E, 3E y 4E
	2	1F, 2F, 3F y 4F

Tabla 1. Plan de muestreo de suelos.

Una vez se complete el ciclo en el año 3, se reinicia al siguiente año con los puntos 1A, 2A, 3A y 4A.

5.4 Materiales

5.4.1 Suelos

- Pala
- Barra
- Muestreador
- Equipo de limpieza
- Cepillo de mano o Brocha
- Bolsas plásticas de grueso calibre
- Cinta adhesiva gruesa
- Metro
- Guantes de cuero
- Overol
- Etiquetas para identificar las muestras
- Marcador permanente
- Recipiente geometría III.

5.4.2 Aguas

- Bomba de succión
- Equipo para muestreo
- Recipiente geometría III para recolección de la muestra
- Guantes de látex

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 7 de 11

- Cuerdas delgadas (más de 10 metros)
- Etiquetas para identificar las muestras
- Cinta transparente
- Marcador permanente
- Ácido Nítrico 65% o Ácido Clorhídrico 1 N.
- pH metro o elementos para determinar pH.

6. DESARROLLO

6.1 Muestreo de suelo

6.1.1 Toma de muestra

Teniendo en cuenta las zonas de muestreo de suelos y la clase de muestreo al azar en zig zag o muestreo aleatorio simple se determina un punto de muestreo para cada zona, esta actividad se realiza cada vez que se realice el muestreo.

Una vez identificado el punto de muestreo se procede a medir un área de 1 m² con centro en el punto seleccionado; como se observa en la figura 7.

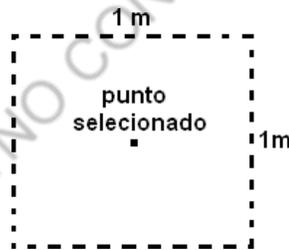


Figura 7. Esquema del punto de muestreo.

Se remueve la vegetación a una profundidad mínima de 2 cm de la superficie del suelo. Posteriormente se realiza la recolección de la muestra, colectando entre 1 y 2 kg de muestra hasta una profundidad de 50 cm en bolsas plásticas resistentes para su posterior preparación. Una vez terminado el muestreo en cada punto, se debe llenar el agujero de donde se extrajo la muestra con el material que no se incluyó en la misma y se coloca la vegetación removida para restaurar el sitio de muestreo.

Etiquetar la muestra tomada registrando la información requerida como se muestra en la figura 9. Se registra la información de las muestras en el formato F-NUC-GDR-063.

6.1.2 Preparación de la muestra

Cada una de las muestras tomadas debe pasar por las siguientes etapas:

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 8 de 11

- a. Secado: actividad la cual consiste en esparcir la muestra de forma homogénea sobre una bandeja en un lugar protegido de la lluvia.
- b. Triturado o molienda: esta actividad se realiza en un molino de dientes con el fin de reducir el tamaño de partícula.
- c. Cuartear: la muestra se divide a la mitad con el fin de que las muestras sean representativas y lo más homogéneas posible.
- d. Tamizado: las muestras se pasan a través de un tamiz N° 35 (500 μm) para obtener un tamaño de partícula uniforme.

La preparación de las muestras de suelos, se realizan en la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano, posterior a la solicitud de servicio.

Una vez retornen las muestras preparadas a la instalación, estas se deben transferir a un recipiente para análisis radiométrico denominado geometría III, llenando este hasta una línea de aforo establecida en 100 ml² (ver Figura 8); envase en el cual se entregará para el análisis. Antes de la entrega al laboratorio de Radiometría Ambiental (LRA) del Servicio Geológico Colombiano para el respectivo análisis por espectrometría gamma; la muestra debe ser etiquetada y dejada en reposo durante 30 días, con el fin de asegurar que los radionúclidos presentes en la muestra alcancen el equilibrio secular, para el radón/polonio (Rn/Po). Adicionalmente, el recipiente debe estar sellado a la tapa con silicona.



Figura 8. Recipiente geometría III.

Además de la muestra que será analizada, se debe dejar preparada una contramuestra debidamente marcada, sellada y etiquetada.

6.2 Muestreo de Aguas

6.2.1 Toma de muestra

Para cada punto de muestreo observado en la Figura 2, se debe coleccionar la muestra en el recipiente geometría III llenándolo hasta la línea de aforo de 100 ml (ver figura 8), empleando el equipo de

² Radiometría norma

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 9 de 11

muestreo o la bomba de succión. El recipiente para la muestra debe ser purgado de dos a tres veces con el agua del punto de muestreo.

Etiquetar la muestra tomada registrando la información requerida como se muestra en la figura 9. Se registra la información de las muestras en el formato F-NUC-GDR-063.

6.2.2 Preparación de la Muestra

Cada una de las muestras tomadas debe pasar por las siguientes etapas:

- a) Envase en la geometría III de análisis en el LRA.
- b) Etiquetado: de acuerdo con la figura 9 y 10.
- c) Acidulado: la muestra se acidifica con HNO₃ al 65% o HCl 1 N, hasta que la muestra quede en un pH ≤ 2.
- d) Reposo: se conserva la muestra mínimo por 30 días, con para asegurar que los radionúclidos presentes en la muestra alcancen el equilibrio secular. Radón/polonio (Rn/Po).

Una vez pasados 30 días se envían las muestras para análisis por espectrometría gamma.

6.3 Etiquetado de Muestra

Cada una de las muestras, tanto de suelos como de aguas se etiquetan una vez tomadas como se indica en la siguiente figura:

ESTUDIO RADIOMÉTRICO AMBIENTAL ALREDEDOR DEL ALMACÉN 2

Fecha:

Tipo de muestra: Agua Suelo

Punto de muestreo N°:

Profundidad:

Color:

Características:

Observaciones:

Figura 9. Etiqueta para el muestreo.

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 10 de 11

Una vez preparadas las muestras estas se etiquetan de acuerdo a lo establecido por el Laboratorio de Radiometría Ambiental del Servicio Geológico Colombiano.

6.4 Frecuencia de muestreo

Se tiene establecido para el muestreo de aguas y suelos una frecuencia semestral; un muestreo finalizando el primer trimestre o iniciando el segundo del año, y el segundo semestre finalizando el tercer trimestre e iniciando el cuarto trimestre.

La frecuencia de dos muestreos en el año se establece en el Manual de Protección Radiológica de la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos. (MO-NUC-GDR-003)

7. DOCUMENTACIÓN COMPLEMENTARIA

Servicio Geológico Colombiano, Manual de Protección Radiológica de la Instalación Centralizada para la Gestión de Desechos Radiactivos. Código MO-NUC-GDR-003.

DELGADO, C. VILLAREAL, M. *Estudio Radiométrico Ambiental Alrededor de las Instalaciones del Reactor IAN-R1.* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, 2008

INTERNATIONAL STANDARD. *ISO 18589-1, Measurement of Radioactivity in the Environment. Soil part 1,* 2004.

8. HISTORIAL DE VERSIONES

Versión	Fecha	Descripción
1	29/03/2011	Complementación de la información de las referencias, al añadir el código de cada una y asociarlas al texto.
2	24/08/2011	En el numeral 2. Alcance se cambia almacén 2 de desechos radiactivos por la Instalación centralizada para la gestión de desechos radiactivos- Almacén 2, y de “Ingeominas” por “Servicio Geológico Colombiano”. En la figura 1 y 3 se cambia almacén 2 de desechos radiactivos por Almacén 2. En todo el documento donde decía almacén se completa con almacén 2. Cambio en palabras del punto 8 de poso a pozo y de más a más. Cambio en el numeral 5 documentos de referencia, la palabra Ingeominas por Servicio Geológico Colombiano.
3	14/12/2014	Se ajusta la estructura del instructivo de acuerdo a la plantilla dentro del Sistema de Gestión Institucional. Se ajusta el objetivo. Se adiciona la base legal. Se adicionan definiciones en el numeral 4.

	INSTRUCTIVO	VERSIÓN 4
	MUESTREO Y PREPARACIÓN DE AGUAS Y SUELOS EN LA ZONA ALEDAÑA AL ALMACÉN 2 DE DESECHOS RADIACTIVOS	IN-NUC-GDR-008
		Pagina 11 de 11

		<p>Se elimina el recipiente Marinelli por recipiente geometría III, la cual es la geometría validada por el LRA para el análisis de estas muestras.</p> <p>Se re enumeran y actualizan las figuras. Se incluye la figura Tipo muestreo.</p> <p>Se cambian los puntos de muestreo de suelos como zonas de muestreo.</p> <p>Se modifica y se renombra la figura Localización puntos de muestreo alrededor del Almacén 2 por Localización puntos y zonas de muestreo alrededor del Almacén 2.</p> <p>Se determinan los puntos de muestreo de suelos. Se establece un plan de muestreo.</p> <p>Se cambia la figura del recipiente Marinelli por el de recipiente geometría III. Se incluye que se debe etiquetar para envío a análisis radiométrico.</p> <p>Se incluye frecuencia de muestreo.</p> <p>Se ajusta el historial de versiones.</p>
--	--	--

COPIA NO CONTROLADA

ANEXO 2

RECOMENDACIONES

Se sugiere realizar un análisis de las muestras de suelos en todas las técnicas anteriormente mencionadas con el fin de corroborar de forma experimental la viabilidad de la técnica seleccionada.

Adicionalmente, es necesario ampliar la investigación en una segunda fase, que incluya el protocolo de muestreo para suelos, la preparación de la muestra para la identificación de los radionúclidos de interés, así como los resultados de las muestras analizadas y su comparación entre técnicas.

Se sugiere actualizar el instructivo de toma de muestras de suelos y aguas de la ICGDR añadiendo los radionúclidos Americio-241 y Cesio-137 en sus análisis.