



**LINEAMIENTOS TÉCNICOS PARA EL PROCEDIMIENTO DE MUESTREO Y
ANÁLISIS DE LABORATORIO DE MATERIALES RADIATIVOS DE ORIGEN
NATURAL EN LOS PPII**

Versión 3

Bogotá D.C, Noviembre de 2020



SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO ©

Oscar Paredes Zapata
Director General

Hernán Olaya Dávila
Director Técnico de la Dirección de Asuntos Nucleares

Guillermo Abel Parrado
Mary Luz Peña
Coordinadores

AUTORES

Hernán Olaya Dávila
Fernando Mosos
Rubén Darío Quintero
Jorge Alejandro Galvis
Giovanni Vela
Andrés Felipe Porras
Ana María Carvajal
Oscar Sierra
Ana Milena Velásquez
Guillermo Abel Parrado

Grupo de trabajo
Grupo de Investigaciones y Aplicaciones
Nucleares y Geocronológicas

Citación: Olaya Dávila, H., Mosos, F., Quintero, R. D., Galvis, J. A., Vela, G., Porras, A. F., Carvajal, A. M., Sierra, O., Velásquez, A. M. y Parrado, G. A. (2020). *Lineamientos técnicos para el procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio de materiales radiactivos de origen natural en los PPII*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

CONTENIDO

RESUMEN		5
ABSTRACT		5
1	INTRODUCCION	6
1.1	Objetivos	7
1.2	Alcance	7
2	CONSIDERACIONES PREVIAS AL MUESTREO (ETAPA DEALISTAMIENTO)	11
2.1	Definición de objetivos de las campañas	11
2.2	Definición de áreas	12
2.3	Recopilación bibliográfica previa	12
2.4	Diseño de campañas de muestreo	13
2.4.1		¡Error! Marcador no definido.
2.4.2	Medio biótico	13
2.4.3	Medio abiótico	14
3	METODOLOGÍAS DE MUESTREO	17
3.1	Matriz sólida	17
3.1.1	Metodologías para la toma de muestras de suelos, conservación de muestra y cadena de custodia	17
3.1.2	Metodología de muestreo para la toma de sedimentos activos y de lecho, conservación y cadena de custodia	18
3.1.3	Metodologías para el muestreo en roca	18
3.1.4	Estratigrafía	19
3.2	Matriz líquida	20
3.2.1	Metodología para la toma de muestras de aguas para radiometría, conservación de muestras y cadena de custodia	20
3.2.2	Metodología para la toma de muestras de aguas para análisis de isótopos estables en agua líquida, conservación de muestras y cadena de custodia	20
3.3	Configuración geométrica de las muestras para análisis de laboratorio	22
3.4	Tratamiento de muestras y manejo de las cadenas de decaimiento radiactivo	22
4	FASE DE CAMPAÑA I (ETAPA DEALISTAMIENTO): CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA PRE-OPERACIONAL (CRP)	25
4.1	Objetivos de la fase de campaña I – CRP	25
4.2	Densidad de muestreo	25
4.3	Diseño de mallas de muestreo	26
4.4	Logística en campo	27

5	FASE DE CAMPAÑA II: (ETAPA CONCOMITANTE) MONITOREO DE LAS CONDICIONES RADIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE DESARROLLO DEL PROYECTO	29
5.1	Objetivo de la fase de campaña II	29
5.2	Selección de puntos de muestreo en función de la CRP	29
5.3	Monitoreo en la zona de procesamiento	30
5.4	Equipos y procedimientos para el monitoreo en la zona de procesamiento	30
6	FASE DE CAMPAÑA III (ETAPA DE EVALUACIÓN): MONITOREO EN LA ETAPA DE DIMENSIÓN DEL YACIMIENTO	32
6.1	Objetivos de la fase de campaña III: Caracterización del Yacimiento (CY)	32
6.2	Revisión de las mallas de muestreo vigentes en búsqueda de aumento de la radiactividad natural	32
7	FASE ANALÍTICA EN EL LABORATORIO	33
7.1	Espectrometría gamma: Laboratorios, equipos, criterios de desempeño y límites de detección	33
7.2	Técnicas radiométricas complementarias: Laboratorios, equipos y criterios de desempeño	34
7.2.1	Medición directa de Radón	35
7.2.2	Medición de los productos de decaimiento de Rn	37
7.2.3	Conteo de neutrones retardados	38
7.2.4	Espectrometría alfa y conteo por centelleo líquido	38
7.3	Isotopía de elementos estables en muestras líquidas: Laboratorios, equipos y criterios de desempeño	38
7.4	Caracterización geoquímica de las muestras: pertinencia, técnicas y características	39
8	CARTOGRAFÍA ESPECIALIZADA	42
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

RESUMEN

En el presente documento se exponen los conceptos técnicos homologados y desarrollados al interior de la Dirección Técnica de Asuntos Nucleares del Servicio Geológico Colombiano para el estudio de radionúclidos naturales que se originan en la técnica de fracturación hidráulica multietapa con perforación horizontal - FH-PH, donde se establecen los lineamientos técnicos en cuanto a los parámetros y medidas para diseñar campañas de muestreo y monitoreo buscando tanto la determinación de elementos radiactivos provenientes de fuentes naturales como las técnicas sugeridas para su investigación a partir de las experiencias y el trabajo multidisciplinar del equipo de trabajo de la Dirección Técnica.

ABSTRACT

This document sets out the technical concepts studied and developed in the Nuclear Affairs Direction of the Servicio Geológico Colombiano to study of natural radionuclides derived from the hydraulic fracturing technique (popularly known as "fracking"). The parameters presented here, show and explain various approaches for the designing of sampling and monitoring programs for the study of radioactive elements from natural sources and the techniques suggested for their research which were develop from the experiences and the multidisciplinary teamwork of the Direction.

1 INTRODUCCION

La composición de la corteza terrestre es muy compleja y a través del tiempo, debido a la geodinámica, los diversos procesos naturales facilitan la migración, cristalización y transformación de múltiples compuestos, entre los que se encuentran los materiales radiactivos, pese a existir diversos elementos que pertenecen a esta categoría, se destacan principalmente el ^{40}K y las cadenas de desintegración provenientes del ^{238}U y ^{232}Th , que se fraccionan en virtud de las condiciones del entorno donde se encuentren, finalmente llegando a superficie, donde el ser humano puede interactuar y exponerse a la radiación ionizante que emiten estos materiales.

La concentración de los materiales radiactivos naturales, pese a tener una distribución prácticamente global, no es uniforme a lo largo de la corteza terrestre. A nivel geográfico hay lugares donde puede haber mayor concentración potencial de radionúclidos de origen natural haciendo de estas zonas de interés.

Los procesos industriales y otras actividades antrópicas pueden causar un aumento en la concentración de los materiales radiactivos y por lo tanto originar mayores intensidades de radiaciones ionizantes sobre las personas. La magnitud denominada dosis equivalente permite conocer en qué grado dichas radiaciones entregan su energía a los tejidos. Uno de los productos de la desintegración del ^{238}U es el ^{222}Rn , radionúclido en estado gaseoso a temperatura ambiente e inerte que constituye el mayor aporte a la radiación natural y cuya concentración puede ser relevante actualmente en espacios residenciales y lugares de trabajo.

La dosis causada por la radiación cósmica también es de origen natural y su mayor dependencia se da por condiciones de altitud, por ejemplo: personal que labora en transporte aéreo, habitantes de ciudades de alta montaña, etc. pese a esto su contribución es mucho menor que los materiales radiactivos de origen natural (del orden del 12.5% de la dosis anual promedio).

En la industria petrolera las exposiciones que envuelven materiales de ocurrencia natural NORM son justificables y controlables a través de la optimización y las acciones protectoras para los trabajadores, el público y el medio ambiente. La exposición al radón producto de la actividad en pozo, en caso de presentarse, debe ser manejada a través de un enfoque graduado. Por lo cual, en los Proyectos Piloto de Investigación Integral -PPII sobre Yacimientos No Convencionales - YNC de hidrocarburos con la utilización de la técnica de Fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal - FH-PH que se van a realizar en Colombia, se requiere que los contratistas PPII realicen el monitoreo de las fuentes naturales de radiación teniendo en cuenta los

lineamientos técnicos expedidos por el Servicio Geológico Colombiano en el marco de lo previsto en el Decreto 328 de 2020 y la Resolución 40185 de 2020, en cuanto a los procedimientos para el muestreo y análisis de laboratorio, a fin de establecer el grado de presencia que tienen los materiales NORM antes, durante y después de los Proyectos Piloto de Investigación Integral.

1.1 Objetivos

Presentar los lineamientos técnicos para llevar a cabo los procedimientos de muestreo y de análisis de laboratorio durante el desarrollo de los Proyectos Piloto de Investigación Integral - PPII en Yacimientos no convencionales con la aplicación de la técnica de fracturamiento Hidráulico Multietapa con Perforación Horizontal - FH - PH aplicables al monitoreo de las fuentes naturales de radiación.

1.2 Alcance

Cubre las actividades previas a la campaña de muestreo, las metodologías de muestreo, la caracterización radiométrica pre-operacional, el monitoreo de las condiciones radiométricas en la zona de desarrollo del proyecto y la fase analítica en laboratorio.

Glosario de términos

Área de influencia: Conforme a lo previsto en el artículo 2.2.2.3.1.1. del Decreto 1076 de 2015, corresponde al “área en la cual se manifiestan de manera objetiva y en lo posible cuantificable, los impactos ambientales significativos ocasionados por la ejecución de un proyecto, obra o actividad, sobre los medios abiótico, biótico y socioeconómico, en cada uno de los componentes de dichos medios. Debido a que las áreas de los impactos pueden variar dependiendo del componente que se analice, el área de influencia podrá corresponder a varios polígonos distintos que se entrecrucen entre sí.

Becquerel (Bq): Unidad (SI) para radiactividad, permite expresar cantidad de decaimientos radiactivos (emisión de partículas) por unidad de tiempo, 1Bq equivale a un decaimiento radiactivo por segundo (s^{-1}).

CRP: Caracterización radiométrica preoperacional

Detector de centelleo: Son detectores que funcionan a partir de un cristal comúnmente de yoduro de sodio activado con talio (NaI:TI) o yoduro de cesio activado

con talio (CsI:TI). Este tipo de cristales al recibir un fotón gamma generan una corriente eléctrica que se amplifica e interpreta de forma integral, permitiendo determinar energías características a través de una función Gaussiana, pese a tener resolución más baja frente a detectores como los de tipo germanio hiperpuro, los detectores de centelleo son menos costosos y el procesamiento de los datos es más rápido.

Detector de semiconductores: Se trata de detectores de radiación ionizante basados en la implementación de circuitos con semiconductores cristalinos, el más utilizado es el detector de germanio hiperpuro (GeHP), el cual tiene la capacidad de detectar y definir energías típicas de diversos radionúclidos, las cuales se asemejan a un pico, cada radionúclido con capacidad de emitir fotones gamma tiene un espectro energético propio.

Dosis: Medida de la radiación recibida o absorbida por un blanco. Se utilizan, según el contexto, las magnitudes denominadas dosis absorbida, dosis a un órgano, dosis equivalente, dosis efectiva, dosis equivalente comprometida o dosis efectiva comprometida.

Electrón-volt (eV): Unidad de medición y expresión de energía de partículas, se define formalmente como la variación de energía que experimenta un electrón (e-) al moverse en un campo potencial.

Espectrometría: Proceso de medición de emisiones propias de un material, normalmente a través de pulsos eléctricos resultantes de una interacción física de interés, en el caso de la radiactividad, el análisis e interpretación de espectros se da gracias a la interacción entre las radiaciones ionizantes con diferentes materiales capaces de emitir pulsos eléctricos gracias a estas interacciones.

Etapa de alistamiento: Para los fines de este documento, esta etapa contempla dos ámbitos de trabajo, el primero consta de la recopilación bibliográfica del territorio a investigar incluyendo actividades económicas de interés, investigaciones previas, cartografía, manejo de recursos cartográficos complementarios entre otros. El segundo ámbito consta de la ejecución de actividades de campo de caracterización preoperacional aquí denominado también CRP, este tiene como objetivo determinar los niveles de radiactividad previo a cualquier desarrollo.

Fotón gamma (γ): Manifestación de energía lumínica de alta energía y corta longitud de onda ($\approx 1 \cdot 10^{-12}$ m) proveniente del núcleo de un átomo radiactivo, generado a partir del decaimiento de dicho elemento temporalmente inestable.

Isótopos: Grupo de elementos químicos con igual número de protones (misma identidad química) y diferente número de neutrones en sus núcleos, esto otorga variaciones de masa a cada átomo, provocando comportamientos distintivos en diversos ambientes y procesos naturales y antrópicos, ejemplos de estos son el protio ($1p^+$), el deuterio ($1p^+ + 1n^0$) y el tritio ($1p^+ + 2n^0$) todos isótopos del hidrógeno y con capacidad de constituir moléculas como el agua.

Locación: es el polígono en superficie de máximo 10 hectáreas, donde se desarrollan las actividades de perforación, completamiento, fracturamiento hidráulico en perforación horizontal FH-PH, limpieza y dimensionamiento del yacimiento con fines investigativos, sin perjuicio de las operaciones que se desarrollen en el subsuelo para las actividades de FH PH.

Neutrón (n^0): Partícula subatómica presente en el núcleo del átomo de igual masa que el protón (p^+), carente de carga eléctrica y en consecuencia de reacción inerte ante campos eléctricos y magnéticos, la variación en la cantidad de estas partículas en el núcleo del átomo genera los isótopos y su exceso o deficiencia permite la ocurrencia de la radiactividad. El neutrón puede ser expulsado del núcleo en forma de radiación ionizante cuando el núcleo se encuentra en inestabilidad.

NORM: Naturally Occurring Radioactive Material / Material Radiactivo de Origen Natural; se trata de materiales provenientes de la naturaleza que ostentan algún tipo de decaimiento radiactivo. Para los fines de este documento se utiliza la expresión “radiactividad natural” que debe entenderse como sinónimo de NORM.

Partícula alfa (α): Partícula constituida por dos protones ($2p^+$) y dos neutrones ($2n^0$) que es emitida como un fragmento de un núcleo inestable, la partícula o emisión alfa puede ser detenida con una hoja de papel y tiene un corto recorrido (cerca de 5 cm en aire) antes de interactuar con electrones del ambiente y estabilizarse como un átomo de helio.

Partícula beta (β): Partícula equivalente a un electrón (e^-) emitido desde el núcleo de un átomo inestable, puede atravesar diferentes materiales, aunque puede ser detenida por la ropa o materiales más densos, en algunos casos es capaz de penetrar la piel.

Periodo de limpieza del pozo (flow back): operación mediante la cual se induce el flujo del pozo con el fin de limpiar y/o recuperar un porcentaje del fluido de fractura y/o completamiento. El periodo de limpieza del pozo se da por terminado cuando el pozo se encuentre con caudales estables y esté produciendo fluido del yacimiento, de conformidad con los análisis fisicoquímicos de laboratorio que se desarrollen.

Radiactividad: Proceso físico que consta de la actividad de desintegración o decaimiento de átomos cuyo núcleo es inestable, la energía excedente de dicho núcleo puede liberarse a través de la emisión de partículas (α , β y n^0) o fotones (luz), cada uno de estos productos posee diversos rangos de energía.

Radionúclido: Entiéndase por elemento químico radiactivo

UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation): Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas.

2 CONSIDERACIONES PREVIAS AL MUESTREO (ETAPA DE ALISTAMIENTO)

Previo a cualquier desarrollo de actividades en el campo y el laboratorio se recomienda llevar a cabo una fase de recopilación de información bibliográfica la cual se puede considerar como una etapa contemplada en el marco del alistamiento, en esta se llevan a cabo labores de levantamiento de datos e información cartográfica que permitan acotar diversos parámetros y planificar una metodología cuidadosa con el fin de optimizar el tiempo, la cantidad de muestras, los equipos a utilizar, el personal que será destinado a dichas actividades, los vehículos y desplazamiento, condiciones de seguridad, equipos de laboratorio y campo a utilizar, los diversos patrones y procedimientos de calibración.

La recopilación debe centrarse en la adquisición de datos sobre aquellas matrices a analizar. Es posible acotar las matrices de muestras en tres grupos, el primero es la matriz sólida, constituida principalmente por rocas, suelos y sedimentos; la segunda matriz, líquida la cual se encuentra constituida principalmente por aguas de diversas procedencias (natural, artificial, residual, etc.); la tercera matriz se compone de los elementos aéreos es decir partículas suspendidas en la atmósfera con elementos radiactivos naturales, por ejemplo, el ^{210}Pb que se acumula en aerosoles de la atmósfera producto del decaimiento del ^{222}Rn incorporado en diversos tipos de suelos (García Orellana & Sánchez Cabeza, 2012).

2.1 Definición de objetivos de las campañas

Los objetivos compilan las ideas principales que constituyen el proyecto, sirven para definir la finalidad de las actividades, asimismo regirán los procedimientos a llevar a cabo; estas ideas deben basarse directamente sobre la recopilación de información bibliográfica, si bien los objetivos deben ser planteados de forma previa a cualquier tipo de actividad, a medida que la bibliografía es evaluada, el alcance, implementación, adaptación y modificación de los objetivos planteados para un muestreo serán ajustados.

Los objetivos se encuentran estructurados en dos grupos principales, el primero consta del objetivo general el cual fija un propósito global sobre el estudio planteado, el segundo grupo consta de los objetivos específicos en los cuales se exponen la finalidad relacionada con cada actividad, abordando aspectos de campo y laboratorio en relación con las matrices a muestrear, equipos y límites de detección en laboratorio. La consolidación de los objetivos es de vital importancia pues además de permitir establecer alcances concretos a cualquier proyecto también dictamina limitaciones para personal, equipos y la planeación en general. Es necesario que los objetivos se

definan a partir del enfoque multidisciplinar en donde diversas áreas del conocimiento tengan intervención en las definiciones que involucran la implementación del plan de muestreo y posteriores actividades de laboratorio, esto con el objetivo de reducir la posibilidad de ejecutar labores redundantes o innecesarias reduciendo así costos y tiempo.

2.2 Definición de áreas

El área en la cual se realizan los procedimientos de muestreo corresponde al área de influencia conforme a los términos del contrato especial de proyecto de investigación suscrito entre el contratista PPII y la Agencia Nacional de Hidrocarburos. La delimitación espacial de la zona de trabajo permite acotar la extensión de las labores en campo y en consecuencia los procedimientos a llevar a cabo en los laboratorios. Para este fin es preferible utilizar sistemas de información geográfica que permitan consolidar todos los datos en una sola plataforma.

Se debe tener en cuenta que la caracterización del área o áreas únicamente desde la información cartográfica constituye un modelo conceptual basado en datos restringidos temporalmente, es decir, es posible hallar variaciones en el campo por ejemplo, caminos nuevos o inexistentes, desplazamiento lateral de cuerpos de agua, incremento o reducción del volumen y área de cuerpos de agua estáticos (como ciénagas, lagunas, pantanos, etc.), crecimiento o reducción de cascos urbanos, zonas inaccesibles, entre otros. Es por ello que se recomienda utilizar otros sistemas de observación de la superficie terrestre que complementen la información cartográfica base, por ejemplo, información libre de misiones satelitales de diferentes naciones, cuyas imágenes son captadas periódicamente lo cual permite dilucidar cambios respecto a la cartografía base, es recomendable revisar diferentes misiones satelitales como la Landsat estadounidense (NASA/USGS) y Sentinel-2 europea (Copernicus) entre otros.

2.3 Recopilación bibliográfica previa

La recopilación de información bibliográfica es una fase crítica de cualquier proyecto, pues consta del insumo principal para la toma de decisiones a partir de la información disponible de la región de interés, esto permitirá desarrollar de forma acertada planeación y logística tanto en campo como en laboratorio. Dicha información puede obtenerse de múltiples fuentes, por ejemplo, aquella disponible por organismos estatales como el mismo Servicio Geológico Colombiano, entes de educación e investigación aplicada como lo son las universidades tanto públicas como privadas y entidades territoriales estatales como el servicio cartográfico nacional, Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2020). Dentro de los objetos de la recopilación bibliográfica está recolectar lo previsto en los lineamientos sociales para el desarrollo

de los Proyectos Piloto de Investigación Integral - PPII previstos por el Ministerio de Interior y el Ministerio de Minas y Energía, con el objetivo de familiarizarse con las poblaciones que habitan determinadas zonas y su percepción. A continuación, se sugieren diferentes frentes de recopilación bibliográfica previa a cualquier tipo de aproximación al campo.

2.4 Diseño de campañas de muestreo

Se sugiere que a partir de la recopilación de información bibliográfica se desarrolle un diseño preliminar de las campañas de muestreo, enfocando los aspectos críticos de los territorios y consignando toda la información en una base cartográfica que será objeto de modificaciones a medida que avance el proyecto. En principio, se sugiere generar un diseño global que contemple un determinado número de muestras y a partir del cual se puedan refinar parámetros de muestreo, rutas, zonas de difícil acceso, tiempos de recorrido, entre otros. Este diseño se evalúa y aplica de ser el caso para las fases de campaña I, II y III descritos en los numerales 4, 5 y 6.

-

2.4.1 Medio biótico

La recopilación bibliográfica sobre el medio biótico se divide en dos flujos de información, el primero se encuentra enfocado hacia la seguridad de los profesionales y la prevención de diferentes factores de riesgo, el segundo sobre la relación entre los habitantes del territorio (denominado en la presente guía como medio social) con los diversos agentes bióticos presentes en la zona. Respecto a la seguridad personal, se debe indagar sobre los diversos agentes bióticos tanto fauna como flora que ocupan los territorios, información que permitirá tomar precauciones al ejecutar una campaña de muestreo, teniendo en cuenta especies nativas con propiedades ponzoñosas o venenosas que representen un riesgo para los participantes, adicionalmente debe tenerse en cuenta las condiciones de salud individuales de cada uno de los participantes asignados a las campañas.

Por otro lado se debe tener en consideración las relaciones intrínsecas entre las poblaciones y el medio biótico, es decir, cómo los diferentes agentes en una población desarrollan sus actividades a partir de la explotación de recursos biológicos, como por ejemplo aquellas poblaciones que dependen de la agricultura de ciertas especies nativas o foráneas; dichas condiciones han de tenerse en cuenta dada la capacidad de ciertos radionúclidos para incorporarse en diversas fases e interfases que se

encuentran en permanente contacto con el medio biótico (Wingteringham, 1989), (NRC, 1988), (Finkelstein & Kreiger, 1996). De esta manera la información recopilada ha de ayudar a definir las poblaciones críticas por contaminación radiactiva natural o de origen antrópico, estos datos se correlacionan directamente con la información recopilada del medio abiótico.

La información principal con la que se debería contar antes de cualquier campaña se enuncia a continuación:

- Características morfológicas evidentes de las especies consideradas como peligrosas para el ser humano o en particular para algún miembro de la actividad de campo.
- Las medidas de contingencia necesarias en caso de alguna interacción accidental con un organismo que represente un riesgo para los integrantes en general o para un miembro en particular del grupo encargado del muestreo.
- Realizar un inventario de insumos necesarios para la prevención de problemáticas relacionadas con encuentros fortuitos con fauna y flora (medicamentos, suero antiofídico, por ejemplo).

La información relacionada con el medio biótico se puede obtener principalmente de entidades estatales, locales y regionales, a través de informes de planeación, por medio de institutos de investigación públicos y privados, a través de universidades públicas y privadas y en entidades regionales encargadas del estudio de las relaciones ecológicas bajo su jurisdicción. Esta información se relaciona con los mapas de coberturas vegetales, perfiles de vegetación en zonas no intervenidas (estratos herbáceo, arbóreo y arbustivo), clasificación ecosistémica, presencia de ecosistemas frágiles (p.ej. humedales RAMSAR), inventarios faunístico y florístico, unidades ecosistémicas, etc.

- Instituto de investigación Von Humboldt: <http://www.humboldt.org.co/es/>
- Publicaciones INVEMAR: <http://www.invemar.org.co/publicaciones>

2.4.2 Medio abiótico

2.4.2.1 Sólido: roca

Se designa al material rocoso como fuente primaria de radionúclidos y sus productos de decaimiento, también como el material parental generador de suelos por procesos de meteorización. Dependiendo de la litología, se pueden esperar diversas configuraciones y proporciones entre los radionúclidos naturales. Las diferentes características de cada litología y sus relaciones hacen de cada zona de estudio, única y configuran un marco de operación diferente para cada proyecto planteado. La fuente oficial de productos de investigación y desarrollo sobre recursos relacionados con

diversas litologías es el Servicio Geológico Colombiano a través de sus diversos portales.

2.4.2.2 Sólido: suelo

El suelo es la interfaz de interacción entre los seres humanos y la litología subyacente, se trata del material derivado principalmente de la litología subyacente tras sufrir diversos procesos de degradación y transporte en superficie, los suelos varían con las formaciones que les dan origen. La interacción humanos– suelo se amplía por ser este último la fuente de compuestos inorgánicos que permiten el desarrollo de biomasa que culmina en el consumo humano, además el suelo interactúa directamente con la atmósfera, facilitando que emisiones de gases y compuestos solubles como el ^{222}Rn , ^{220}Rn y ^{226}Ra , se transporten y posteriormente haya acumulación de radionúclidos como el ^{210}Pb y ^{210}Po .

2.4.2.3 Sólido: sedimento

El sedimento consta de una mezcla no consolidada y heterogénea de materiales derivados de diversas procedencias y composiciones, son considerados representativos por tratarse de grandes volúmenes de material sólido que pueden incorporar múltiples contaminantes de origen natural y procedencia antrópica, especialmente por la interacción en la interfase líquido-sólido.

2.4.2.4 Líquido: aguas de escorrentía y aguas subterráneas

El agua es el medio de transporte de materiales naturales en superficie más relevante (conocido en geología como medio sedimentario), adicionalmente es un compuesto crítico para el desarrollo de la vida. El agua es el agente encargado de modelar el paisaje, existiendo en permanente contacto con las diversas formas de vida a todas las escalas, interactuando simultáneamente con su entorno, removiendo y formando suelos y transportando material detrítico. Teniendo en cuenta que en las cadenas de decaimiento primarias del ^{238}U y ^{232}Th , existen productos de decaimiento solubles (como el ^{222}Rn y ^{226}Ra) la interacción con el agua permitirá que varios de estos elementos radiactivos permanezcan integrados en fase líquida de forma natural y posteriormente por la dinámica de las corrientes, los subsecuentes productos de decaimiento serán depositados en diferentes partes de la cuenca hidrográfica donde se lleve a cabo el proceso, en caso de existir acuíferos que provean de agua a los habitantes de determinado territorio, se sugiere contemplar medios de acceso a dichas corrientes para estudiar la dispersión propia de este tipo de radionúclidos y sus cadenas de decaimiento en caso que allí se encuentren.

- Visor de movimientos y remoción en masa SIMMA (SGC):

Lineamientos técnicos para el procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio de materiales radiactivos de origen natural en los PPII

<http://simma.sgc.gov.co/#/>

- Banco de información petrolera:
http://srvags.sgc.gov.co/JSViewer/GEOVISOR_BIP/
- Buscador de recursos del SGC: <https://miig.sgc.gov.co/>
- Cartografía geológica de Colombia:
https://srvags.sgc.gov.co/Flexviewer/Estado_Cartografia_Geologica/
- Geoportal (IDEAM): <http://www.ideam.gov.co/geoportal>

3 METODOLOGÍAS DE MUESTREO

A nivel nacional, las entidades de control ambiental cuentan con múltiples modelos metodológicos de muestreo para las distintas matrices ambientales a diferentes escalas, todos estos, alineados a normas de calidad internacionales. Estos procedimientos establecen diferentes criterios relacionados con las técnicas de muestreo, el uso de materiales y herramientas, la delimitación del área de muestreo, protocolos para establecer el número de muestras, los requisitos para el manejo y conservación de muestras, entre otros. La referencia de metodologías de muestreo a nivel nacional son las Normas Técnicas Colombianas No NTC-ISO 4113, NTC-ISO 5667 (aguas y sedimentos), NTC 3656 y NTC-ISO 18400 (suelos).

Las metodologías aquí enunciadas pretenden asegurar que las muestras son representativas del entorno y de sus características, que éstas conservan las propiedades y parámetros de evaluación necesarios, permitiendo la obtención de información veraz y trazable. Se espera que las muestras obtenidas por estas metodologías presenten contenidos radiactivos del orden de magnitud de no contaminados o con contenidos radiactivos naturales, es decir, muestras calificables como “ambientales”.

3.1 Matriz sólida

Comprende sedimentos activos, suelos y rocas como fuentes de proveniencia de radionúclidos naturales y derivados de actividades antrópicas.

3.1.1 Metodologías para la toma de muestras de suelos, conservación de muestra y cadena de custodia

Se recomienda para la toma de muestra seguir los lineamientos descritos en documentos técnicos especializados como el reporte técnico 486 del Organismo Internacional de Energía Atómica (Barnekow, y otros, 2019) y aquellos consignados en la serie de Vigilancia Radiológica Ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear Español, procedimientos 1.1 “Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: Capa superficial” (Herranz, Jiménez, Navarro, Payeras, & Pinilla, 2003) y 1.2 “Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad” (Baeza, Alonso, & Heras, 2003), toda vez que los sistemas de gestión que la aplican, han sido calificados en excelencia técnica, garantizando la información característica y representativa de la muestra, con registros veraces y certeros de cada uno de los procesos desarrollados (denominado cadena de custodia).

3.1.2 Metodología de muestreo para la toma de sedimentos activos y de lecho, conservación y cadena de custodia

Se recomienda seguir los lineamientos descritos en la serie de Vigilancia Radiológica Ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear Español, procedimiento 1.9 “Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de sedimentos para la determinación de la radiactividad ambiental” y la norma técnica colombiana NTC-ISO 5667 “Calidad del agua. Muestreo. Parte 15. Guía para la preservación y manejo de muestras de lodos y sedimentos”, toda vez que los sistemas de gestión que la aplican han sido calificados en excelencia técnica, demostrando un nivel de madurez avanzado, en su desarrollo en lo que respecta a la medición de elementos radiactivos, garantizando la información característica y representativa de la muestra, con registros reales, veraces y certeros de cada uno de los procesos desarrollados (cadena de custodia)

3.1.3 Metodologías para el muestreo en roca

Se recomienda el enfoque de investigación en roca con el objetivo de recabar, procesar y generar información geocientífica, en este caso particular, que sirva como insumo base sobre las fuentes primarias de radionúclidos. Las formaciones geológicas con el tiempo pueden acumular gran cantidad de elementos (radiactivos incluidos), cuando se da el caso particular de exploración y explotación de recursos naturales como lo son hidrocarburos, carbón y diversos tipos de minerales la roca (madre, reservorio, sello, matriz, veta, pórfido, etc.) ocurre la movilización, acumulación y / o dispersión de los elementos contenidos en las litologías dando a lugar a la exposición de trabajadores, personas no relacionadas y medio ambiente.

La investigación en roca tiene la función de estudiar la procedencia de los radionúclidos que residen en las profundidades de la tierra en litologías de interés económico o relacionadas con actividades humanas y litologías de interés geocientífico en general. Esta información puede obtenerse de diferentes formas, a través de manifestaciones externas de la corteza donde aparecen en superficie parte de una secuencia litológica. Otra fuente consta de los registros físicos de la zona de interés a partir de pozos o núcleos de perforación.

Se sugiere que, al existir múltiples formas de estudiar material rocoso en campo, que se clarifiquen desde un principio la metodología de clasificación acorde con la bibliografía disponible sobre la materia y los insumos (diagramas triangulares, composicionales, de distribución de material particulado y bioclastos, etc.) a utilizar.

Para la evaluación de la matriz roca, en el presente documento se recomienda analizar las diversas fuentes de material rocoso utilizando técnicas analíticas portátiles

(espectrometría gamma portátil y XRF) y de laboratorio (espectrometría gamma, coregamma y técnicas complementarias) esto se puede ver ilustrado en la figura 1.

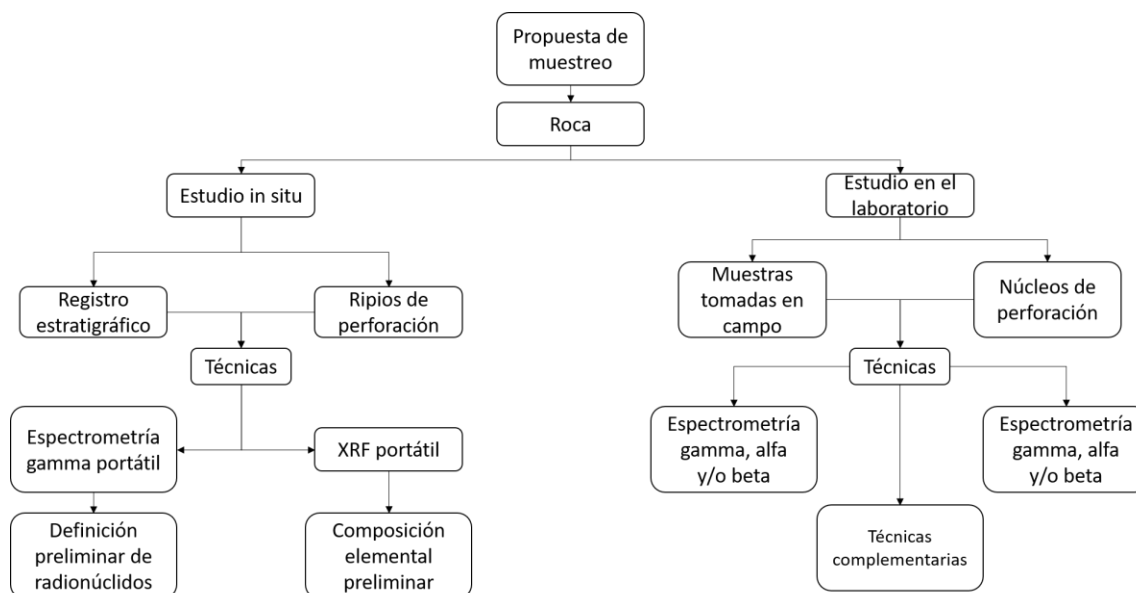


Figura 1. Propuesta de muestreo en matriz roca

Fuente: Autores

3.1.4 Estratigrafía

La estratigrafía constituye una herramienta esencial en las ciencias de la tierra, esta permite ubicar un evento o una serie de eventos en forma de estratos, formaciones o grupos, en investigación es un sistema de referencia que permite saber:

- Estimar el intervalo temporal tiene un conjunto litológico.
- Las poblaciones biológicas que lo habitaban.
- Los eventos geoquímicos que se dieron en aquellos momentos.
- Acotar espacialmente la ubicación de los eventos en el registro.
- Realizar reconstrucciones de eventos, paisajes y proceso que ocurrieron en determinado tiempo geológico.
- Investigar la evolución de las especies.
- Estudiar yacimientos de interés económico (hidrocarburos, metales, cerámicos, materiales de construcción, carbón, etc.).
- Realizar cartografía geológica.
- Conocer las relaciones espaciales entre diferentes litologías a lo largo de una región o cuenca.

De esta forma, la estratigrafía es un complemento de suma importancia para la búsqueda de anomalías geoquímicas como elementos radiactivos naturales asociados a eventos geológicos, se recomienda para su estudio aprovechar los lineamientos descritos en manuales clásicos y modernos como (Folk, 1974), (Mason, 1990), (Philpotts, 1990), (Fry, 1991), (Nichols, 2009), (Gill, 2010), (Jerram & Petford, 2011) & (Tucker, 2011) entre otros.

3.2 Matriz líquida

La matriz líquida constituye uno de los materiales de muestreo más importantes, dado que puede considerarse como el medio de transporte con mayor actividad en la superficie terrestre, es también el más susceptible a sufrir contaminación dadas sus propiedades intrínsecas, por ello las muestras y análisis en líquidos se bifurcan en dos procesos, el primero es la radiometría a través de análisis de espectrometría con el fin de determinar la actividad de diferentes radionúclidos disueltos. Por otro lado, se busca implementar la técnica de isotopía en muestras líquidas con elementos estables para obtener un registro composicional (llamado también huella isotópica) que permita comprender el comportamiento hidrológico de los cuerpos de agua a estudiar sean dinámicos o estacionarios y de forma simultánea monitorear posibles mezclas de líquidos debido a contaminación fortuita. La huella isotópica deberá realizarse acorde a lo descrito en el numeral 6.1.5 Hidrogeología de los Términos de Referencia para la Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental, expedidos mediante Resolución 821 de 2020 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

3.2.1 Metodología para la toma de muestras de aguas para radiometría, conservación de muestras y cadena de custodia

Se recomienda seguir los lineamientos descritos en la serie de Vigilancia Radiológica Ambiental del Consejo de Seguridad Nuclear Español, procedimiento 1.15 “Procedimiento para el muestreo, recepción y conservación de muestras de agua para la determinación de la radiactividad ambiental”, toda vez que los sistemas de gestión que la aplican, han sido calificados en excelencia técnica, demostrando un nivel de madurez avanzado, en su desarrollo en lo que respecta a la medición de elementos radiactivos, garantizando la información característica y representativa de la muestra, con registros reales, veraces y certeros de cada uno de los procesos desarrollados (cadena de custodia).

3.2.2 Metodología para la toma de muestras de aguas para análisis de isótopos estables en agua líquida, conservación de muestras y cadena de custodia

El método de isotopía de elementos estables en aguas busca realizar monitoreos a partir del fraccionamiento isotópico del ^1H , ^2H , ^{16}O y ^{18}O en aguas tanto superficiales

como subterráneas, para el caso de monitoreo con hidrología isotópica el contratista PPII deberá ceñirse a los estipulado en los Términos de Referencia de Licenciamiento ambiental numeral 6.1.5.

La toma de muestras para los análisis de isótopos estables en agua líquida se basa en los lineamientos de las siguientes guías emitidas por el Organismo Internacional de Energía Atómica:

- Sampling Procedures for Isotope Hydrology, disponible en: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/Sampling%20booklet%20web.pdf>
- Groundwater Sampling Procedures for Isotope Hydrology, disponible en: <http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/other/2014%20ENG%20Gw%20Sampling%20booklet%20-%20separate%20pages.pdf> track
- Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle Principles and Applications Water Resources Programme International Atomic Energy Agency and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Vol. 1. , (Mook, 2000) disponible en: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/documents/global_cycle/Environmental%20Isotopes%20in%20the%20Hydrological%20Cycle%20Vol%201.pdf

Se deben diferenciar las muestras que deberán ser destiladas con anterioridad al análisis isotópico.

- Para aguas que superen los 4 g/L de salinidad se debe realizar el muestreo en recipientes de 250 mL de volumen en recipientes de Polietileno de Alta Densidad y llenar completamente la capacidad del recipiente.

Para aguas que no superen los 4 g/L de salinidad se debe realizar el muestreo en recipientes de 10 a 50 mL de volumen en recipientes de Polietileno de Alta Densidad o de vidrio de color ámbar y llenar completamente la capacidad del recipiente. Usar contratapa.

3.3 Matriz aire

Este tipo de muestreo debe enfocarse en la cuantificación de la cantidad de ^{222}Rn que es exhalado o emanado de diferentes puntos dentro del área de influencia, dichos puntos se basan en la malla de muestreo estipulada para la medición de radiactividad natural en el área. La ejecución del muestreo puede basarse en la utilización de un equipo de monitoreo continuo que implemente bien sea cámara de ionización o sistemas de detección por semiconductores con capacidad de análisis in situ. Alternativamente se puede recurrir a muestreo para análisis de laboratorio, en cuyo caso es necesario considerar los tiempos de referencia descritos en la tabla 1 y la toma

de muestra en condiciones que se garantice la no pérdida de ^{222}Rn en el mencionado tiempo.

3.4 Configuración geométrica de las muestras para análisis de laboratorio

La determinación de emisores gamma en muestras ambientales se realiza por la técnica de espectrometría gamma. Esta técnica requiere de la selección de una geometría apropiada, para cada matriz, que permita asegurar la calidad y confiabilidad de los resultados.

La geometría recomendada para usar durante el proceso analítico, para las diferentes matrices (líquida y sólida) es cilíndrica de material plástico, con diámetro de 2 pulgadas, altura de 2 pulgadas, una capacidad comprendida entre 100 mL y 120 mL, con paredes delgadas y rígidas y que se cierre herméticamente, como lo ilustra la figura 2.



Figura 2. Ilustración de la geometría recomendada para contenedores de plástico
Fuente: Autores

3.5 Tratamiento de muestras y manejo de las cadenas de decaimiento radiactivo

Se recomienda tener como fecha y hora de referencia (fecha a la cual se refiere el resultado analítico) la fecha y hora del muestreo. Mediante el uso de las ecuaciones que describen el decaimiento radiactivo del radionúclido de interés, se realizan los cálculos matemáticos correspondientes para a partir del resultado de laboratorio

determinar el valor en la fecha y hora de referencia. El tiempo de referencia es el transcurrido entre el momento del muestreo y el inicio del análisis espectrométrico. Debido a las características de decaimiento de las cadenas naturales del ^{232}Th y ^{238}U , los radionúclidos objetivo-analíticos (hijas), requieren de unas consideraciones analíticas (operacionales) especiales las cuales inciden directamente en el cumplimiento de criterios analíticos y de calidad.

El proceso analítico se realiza por medio de la identificación y cuantificación de una de las hijas características para cada serie natural, asegurando previamente un equilibrio radiactivo, ver tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de radionúclidos utilizando espectrometría gamma sobre las secuencias de decaimiento

Serie	Detector - NaI		Detector - GeHp	
	Regiones de interés	Radionúclido objetivo (tiempo de referencia)	Fotopicos	Radionúclido objetivo (tiempo de referencia)
Serie ^{232}Th	^{208}Tl (2614 KeV)	^{224}Ra , ^{220}Rn (2días-4días) ^{228}Th , (>25 días)	^{228}Ac (911 KeV) ^{212}Pb (239 KeV)	^{228}Ra (>2 días) ^{224}Ra , ^{220}Rn (2días-4días) ^{228}Th , (>25 días)
Serie ^{238}U	^{214}Bi (1765 KeV)	^{222}Rn (4h-48h) ^{226}Ra (>25 días)	^{214}Pb (352 KeV) ^{210}Pb (46 KeV)	^{222}Rn (4h-48h) ^{226}Ra (>25 días) ^{210}Pb (cualquiera)

Fuente: Autores

En la tabla 1 se presentan los dos tipos de detectores de radiación gamma más utilizados, sin embargo, existen otras alternativas para el tipo de detector (CsI:TI, GAGG, BGO, LYSO, YAG, YAP, CdWo4, CdTe, CZT entre otros) cuyas posibilidades de detectar los isótopos de interés estará determinada por la resolución en energía del mismo. Sin embargo, los detectores e GeHP son los que mejor resolución ofrecen.

Con el fin de asegurar una cuantificación correcta del contenido de actividad del radionúclido objetivo en la fecha y hora de referencia (muestreo) se recomienda realizar mediciones analíticas a tiempos de referencia diferente y cuidadosamente escogidos considerando siempre los esquemas de decaimiento en serie de las familias del uranio y el torio mediante la solución de las ecuaciones de Bateman.

4 FASE DE CAMPAÑA I (ETAPA DEALISTAMIENTO): CARACTERIZACIÓN RADIOMÉTRICA PRE-OPERACIONAL (CRP)

Esta fase del proyecto busca ejecutar estudios in situ del área de influencia durante la elaboración del estudio de impacto ambiental, de forma previa al proceso de estimulación hidráulica, con el objetivo de tener datos de radiometría con los cuales comparar la radiactividad a medida que se desarrolla el proceso de estimulación. En todo caso, se podrá continuar obteniendo información en el proceso de evaluación de la licencia ambiental. Esta fase del proyecto tiene la mayor extensión, y las actividades planeadas se llevan a cabo en 2 espacios, área de influencia y locación.

En la locación se enfatizan las medidas de protección radiológica y monitoreo, por ser la potencial fuente de radionúclidos liberados artificialmente.

4.1 Objetivos de la fase de campaña I – CRP

Recabar información del terreno, población, tramitar permisos con autoridades locales, evaluar rutas, evaluar las condiciones o existencia de puntos de muestreo estimados en apartados teóricos, identificar afloramientos rocosos, realizar registros de niveles de radiación y vías de forma preliminar, posteriormente y teniendo en cuenta los factores evaluados con anterioridad, se busca recabar datos en zonas relativas a los Proyectos Piloto de Investigación Integral - (PPII).

4.2 Densidad de muestreo

La densidad de muestreo puede definirse como el número de muestras por unidad de área que se toman en la fase de campo y que serán posteriormente procesadas, analizadas e interpretadas. La definición de la densidad de muestreo se determina a partir de la integración de información bibliográfica y cartográfica sobre el área de interés, de manera tal que se asignen prioridades respecto a ciertas unidades hidrogeológicas, geológicas o forestales en función de las actividades de las poblaciones locales y la ubicación de las comunidades circundantes al proyecto, esta priorización se sugiere se realice a partir de las mallas de muestreo propuestas a partir del compilado cartográfico, se recomienda para las diferentes etapas del diseño de muestreo, cronogramas y presupuestos, contemplar los lineamientos estipulados en los documentos técnicos y normativos IAEA-TRS486 (Barnekow, y otros, 2019) sobre lineamientos de muestreo en suelo y vegetación para radiometría y las normas técnicas ISO 18400-101:2017 (Framework for the preparation and application of a sampling plan) , ISO 18400-102:2017 (Selection and application of sampling techniques) e ISO 18400-104:2017 (Strategies).

4.3 Diseño de mallas de muestreo

El contratista PPII debe de formular diseños de mallas de muestreo, en aras de mantener una base sobre la cual trabajar y modificar a medida que evolucione el proyecto, el proceso sugerido se describe en la figura 3.

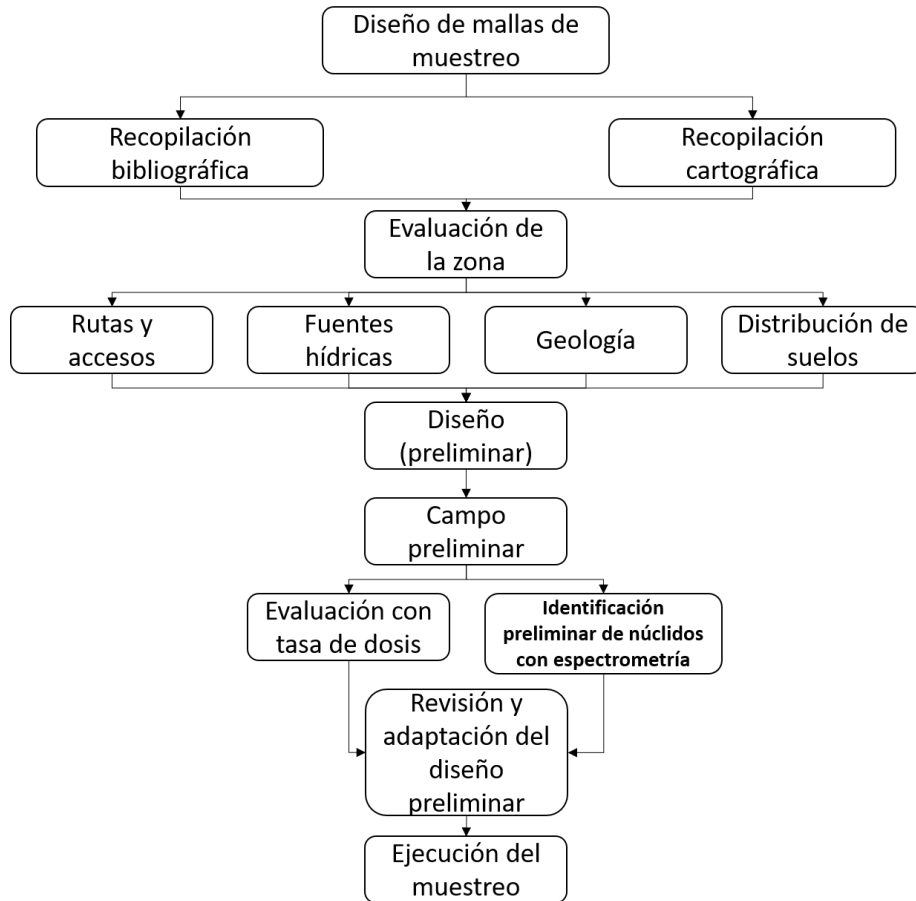


Figura 3. Diseño de mallas de muestreo

Fuente: Autores

Tal como indica la figura, las mallas que determinan los puntos de muestreo se construyen en primera instancia a partir de la información teórica obtenida de la base cartográfica en conjunto con los sensores remotos disponibles, esta primera propuesta sirve como base sobre la cual refinar el número final de muestras tomadas en campo que serán procesadas en el laboratorio, tiempos de desplazamiento y rutas de acceso, posteriormente, este proceso debería consolidarse a partir del uso de radiometría en campo o mediciones de tasa de dosis principalmente a través de un procedimiento de obtención de datos puntuales, estos datos dispersos formarán una nube de puntos que

luego podrá ser analizada a través de métodos de interpolación, el procedimiento estipulado por el OIEA para cartografía de radionúclidos es krigging (IAEA, 2003), (IAEA, 2010). Una parte importante de la consolidación de la base cartográfica es reconocer caminos a través de los cuales se pueda transitar bien sea en vehículo o bien sea a pie para realizar el proceso de medición de la radiactividad, este paso de suprema importancia pues permite recolectar datos para ejecutar el proceso de interpolación que permita distinguir zonas con mayor cuantía de radiactividad o tasa de dosis, modificando así la malla de muestreo que se estipula en un primer momento.

4.4 Logística en campo

Desde la perspectiva técnica, se debe tener en cuenta que uno de los factores críticos para el desarrollo de cualquier proyecto, es el estudio de las fuentes hídricas superficiales y subterráneas, se sugiere para tener un mejor registro isotópico y radiométrico de los cuerpos de agua y las matrices relacionadas, se realicen campañas de muestreo segmentadas por temporadas estacionales, cuando sea posible, dado que las tasas de evaporación varían con la temperatura atmosférica - superficial. Con el Estudio de Impacto Ambiental deberá entregarse la información de una campaña de monitoreo por temporada estacional, y se podrá complementar durante la fase de evaluación de licencia, siempre y cuando sea previa al inicio de las intervenciones en el área de influencia por parte del PPII.

El fraccionamiento de los isótopos estables ^2H y ^{18}O se dará de diferente manera dependiendo de las variaciones térmicas y el aporte de agua lluvia, por otro lado, el aumento de la escorrentía puede influir en la movilización de radionúclidos a partir de las matrices sólidas por meteorización o erosión tanto de roca como de suelos.

Una vez estipuladas las ubicaciones de muestreo en el marco de la CRP, se procede a ejecutar la primera fase de campaña la cual se recomienda sea realizada en dos etapas: la primera de estas consta del reconocimiento, donde se busque acercar el proyecto a las comunidades y explicar los conceptos técnicos en lenguaje sencillo y conciso, es decir una presentación del equipo y conceptos que busque ser divulgativa a las poblaciones aledañas que muestren interés, adicionalmente esta fase debe buscar realizar el reconocimiento presencial de la zona de campo, identificar rutas, puntos de acceso, zonas restringidas y de libre tránsito.

El número de integrantes del equipo de campo va a depender de la extensión del terreno, el número de comunidades y la extensión de la ruta de radiometría planteada, es imperioso que estos equipos de trabajo en campo sean de mínimo 2 personas, por motivos de seguridad en ninguna circunstancia deben ir a campo integrantes del

proyecto en solitario. La distribución de dichos grupos de trabajo y su asignación a determinadas zonas de campo ha de tener en cuenta los parámetros de salud y seguridad evaluados en este mismo ítem.

De forma simultánea con el acercamiento a las comunidades ha de realizarse un barrido en el área con equipos detectores de radiación gamma de alta sensibilidad con capacidad de medir tasas de dosis del orden de algunas decenas de nSv/h (nanoSievert por hora), los datos deben estar anclados a registros GPS, la información puede ser tomada de forma puntual o a lo largo de un recorrido a velocidad constante donde se utilicen los equipos con los ajustes instrumentales de medición de tasa de dosis (unidad: Sv/h), este barrido preliminar permitirá llevar a cabo cartografía a partir de los criterios de interpolación descritos en los documentos TECDOC-1363 "Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data" (IAEA, 2003) y NF-T-1.3 "Radioelement mapping" (IAEA, 2010).

Una vez realizado la etapa de reconocimiento, se procede a la segunda etapa, se sugiere en un intervalo temporal suficiente llevar a cabo la ejecución del proceso de interpolación con el fin de generar mapas indicativos que permitan refinar el diseño original de la malla de muestreo (IAEA, 2010), (IAEA, 2003) este intervalo va a depender de la extensión de la zona a estudiar; una vez realizado el ajuste se procede a la campaña de muestreo, aprovechando el personal disponible para que se distribuya en las zonas de influencia del proyecto, áreas definidas con anterioridad, dependiendo de la distribución y densidad de los puntos seleccionados, se deberán distribuir los vehículos, estimando los tiempos que tomaría las tomas de muestra y desplazamiento entre puntos.

5 FASE DE CAMPAÑA II: (ETAPA CONCOMITANTE) MONITOREO DE LAS CONDICIONES RADIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE DESARROLLO DEL PROYECTO

Una vez culminada la fase CRP y contando con los insumos para cotejar la información a recabar, se procede a la fase II, que se enfoca en monitorear las condiciones radiométricas en la zona de desarrollo del proyecto, en esta fase se sugiere enfocar los muestreos entorno a la locación, sin dejar de lado la toma de muestras en el área de influencia, conforme con la evaluación de impactos ambientales y análisis de riesgos contemplados en el Estudio de Impacto Ambiental.

5.1 Objetivo de la fase de campaña II

Se busca estudiar la potencial emisión de radionúclidos durante el proceso de fracturación hidráulica, realizando la divulgación sobre parámetros básicos de protección radiológica, asimismo, estudiar si ocurre algún tipo de dispersión de materiales radiactivos y corroborar si está relacionada con la actividad a ejecutar.

5.2 Selección de puntos de muestreo en función de la CRP

Una vez se obtengan los datos que permitan llevar a cabo la comparación de los niveles de radiactividad a lo largo de la zona de investigación, se sugiere que se utilicen las ubicaciones exactas de muestreos de la CRP como referencia para realizar mediciones con el objeto de monitorear estos niveles a medida que el proceso avanza. Conservando la densidad de los puntos de muestreo en las mallas que se consideren pertinentes. Se recomienda llevar a cabo los monitoreos empleando equipos portátiles de medición de radiactividad en las zonas aledañas a las plataformas y posteriormente ejecutar la toma de muestras de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos, en esta fase se sugiere emplear hidrología con isótopos estables para buscar indicios de mezclas de aguas derivadas del proceso a llevar a cabo.

Teniendo en cuenta que el fluido de retorno puede contener radionúclidos, junto con otros compuestos, se sugiere hacer un muestreo periódico adicional que tenga en cuenta las etapas del proceso de estimulación hidráulica especialmente en el periodo de limpieza de pozo (flowback) donde el fluido llega a superficie a través de la tubería del pozo, evaluando la composición isotópica y la radiactividad de dichos flujos y así tener registros del fraccionamiento isotópico a medida que evoluciona el proceso, generando así más insumos de comparación para estudiar posible contaminación de cuerpos de agua y acuíferos durante la ejecución de la estimulación hidráulica.

5.3 Monitoreo en la zona de procesamiento

El monitoreo en la zona de procesamiento puede dividirse en cuatro fases, la primera durante la perforación donde se extraen fragmentos de roca a la superficie; la segunda el completamiento, donde se realizan los revestimientos y termina la estructura interna del pozo; el tercero es la estimulación hidráulica; y la cuarta la llegada del fluido de retorno. Investigaciones recientes sugieren que durante la cuarta, hay un aumento de la radiactividad dado que ocurren interacciones geoquímicas tanto en las formaciones como en las tuberías que facilitan la movilización de elementos tales como el radio, el uranio, el potasio y el plomo los cuales pueden llegar a la superficie en forma de solución en conjunto con el resto de compuestos asociados al proceso de estimulación hidráulica, o bien pueden cristalizar en las tuberías en forma de radiobarita (EPA, 2019), (Landis, Sharma, Renock, & Niu, 2018), (Almond, Clancy, Davies, & Worrall, 2014).

El cumplimiento del plan de monitoreo enfocado en las variables radiométricas ayudará a comprender la composición química del fluido de retorno. Lo anterior es fundamental para evaluar si podrían tener algún impacto en la salud humana o en el medio ambiente en general.

Para la fase II de campo se recomienda realizar una etapa de monitoreo utilizando equipos de espectrometría gamma portátil, disminuyendo en consecuencia el muestreo físico y aumentando la cantidad de mediciones de radiactividad en la zona que pueda ser de alto impacto y en relación con los datos obtenidos en la fase CRP, llevar a cabo muestreos en diferentes puntos críticos de la zona de trabajo en la plataforma, aplicando también durante la llegada del fluido de retorno los Criterios de vigilancia radiológica que establezca el Ministerio de Minas y Energía. Se plantea realizar controles adicionales ejecutando mediciones de isótopos estables en líquidos para registrar el fraccionamiento ^2H y ^{18}O contemplando posibles mezclas con aguas de escorrentía o subterráneas.

5.4 Puntos de interés para el monitoreo en la zona de procesamiento

Una vez las actividades de perforación y estimulación inicien, el contratista PPII deberá realizar la evaluación de su proceso, estudiando el almacenamiento y transporte de corrientes y determinando puntos de interés radiológico donde se puedan presentar anomalías en los niveles de radiactividad natural. Se recomienda que el monitoreo de los puntos de interés incluya la determinación de niveles de radiactividad natural de las corrientes en estado sólido, líquido y gaseoso y además, que se complemente el monitoreo con el seguimiento de niveles de radiación gamma en dichos puntos utilizando equipos de medición portátil suficientemente sensibles como para evidenciar aumentos significativos en el fondo natural de radiación causados por concentraciones y acumulaciones de elementos radiactivos. La actividad de monitoreo

en zona de procesamiento ha de incluir registros periódicos de las condiciones radiométricas en zonas de residencia, almacenamiento de insumos y generación de residuos.

Se sugiere como puntos de interés dentro de la plataforma para llevar a cabo estas mediciones:

- Campamentos donde residan los operarios
- Unidades de laboratorios donde se estudien las propiedades de hidrocarburos, rocas, residuos, etc.
- Zonas de procesamiento de hidrocarburos (si aplica).
- Depósitos de material residual (periodo de limpieza del pozo “flowback”, residuos rocosos, aguas de formación, tuberías en desuso, etc.)
- Tuberías de transporte de material residual
- Boca de pozo
- Depósitos y tanques de secado
- Depósitos de propante, aditivos y barita
- Chimeneas (Téas) donde se quemen excedentes de metano.

Cualquier otro que considere el contratista PPII

6 FASE DE CAMPAÑA III (ETAPA DE EVALUACIÓN): MONITOREO EN LA ETAPA DE DIMENSIÓN DEL YACIMIENTO

Esta fase corresponde a la culminación del proyecto, se propone realizar estudios sobre los niveles de radiactividad resultantes del proceso tanto en la locación como en el área de influencia, nuevamente, es clave utilizar como referencia los puntos de muestreo planteados al principio del proyecto (fase CRP) para ejecutar los monitoreos y usar igualmente la herramienta de espectrometría portátil para estudiar la zona de forma eficiente y reducir el número de muestras a procesar.

Durante esta fase, a nivel operativo surgen las aguas e hidrocarburos de la perforación del pozo cuya fracturación hidráulica ha culminado, estos son también objeto de estudio con el fin de caracterizar los radionúclidos y su concentración, buscando así continuar los estudios en protección radiológica del personal involucrado en su extracción. Se deben aplicar los Criterios de vigilancia radiológica que establezca el Ministerio de Minas y Energía.

Finalmente se busca concluir si efectivamente existe injerencia del proceso de estimulación hidráulica en la distribución de radionúclidos de origen natural.

6.1 Objetivos de la fase de campaña III: Caracterización del Yacimiento (CY)

El objetivo es realizar la validación de métodos y resultados a través de la obtención de muestras de control y mediciones en la zona y matrices mencionadas, similar a la fase II, se busca realizar monitoreos en el área de influencia y el procesamiento del grueso de la información obtenida en campo y laboratorio a lo largo de la investigación, buscando evidenciar las fluctuaciones en radionúclidos que se movilizaron producto del proceso de estimulación hidráulica. Esta última fase busca responder en dónde hubo mayor concentración de radionúclidos; si hay radionúclidos en qué fase temporal del proyecto se manifestaron en demasía y si sus valores superan los recomendables en términos de protección radiológica.

6.2 Revisión de las mallas de muestreo vigentes en búsqueda de aumento de la radiactividad natural

Teniendo en cuenta que esta fase es aquella que concluye el proyecto de investigación en radiactividad natural asociada a estimulación hidráulica (YNC) se plantea realizar una comparación entre la radiactividad inicial determinada en el CRP con la fase de CY buscando posibles incrementos en el área de influencia y en la locación en función de la distribución de puntos de toma de muestras estipuladas originalmente.

7 FASE ANALÍTICA EN EL LABORATORIO

A continuación, se presenta la propuesta de radionúclidos de interés para la determinación radiométrica en las muestras remitidas al laboratorio, agrupado por tipo de matriz tal como se ilustra la figura 4.

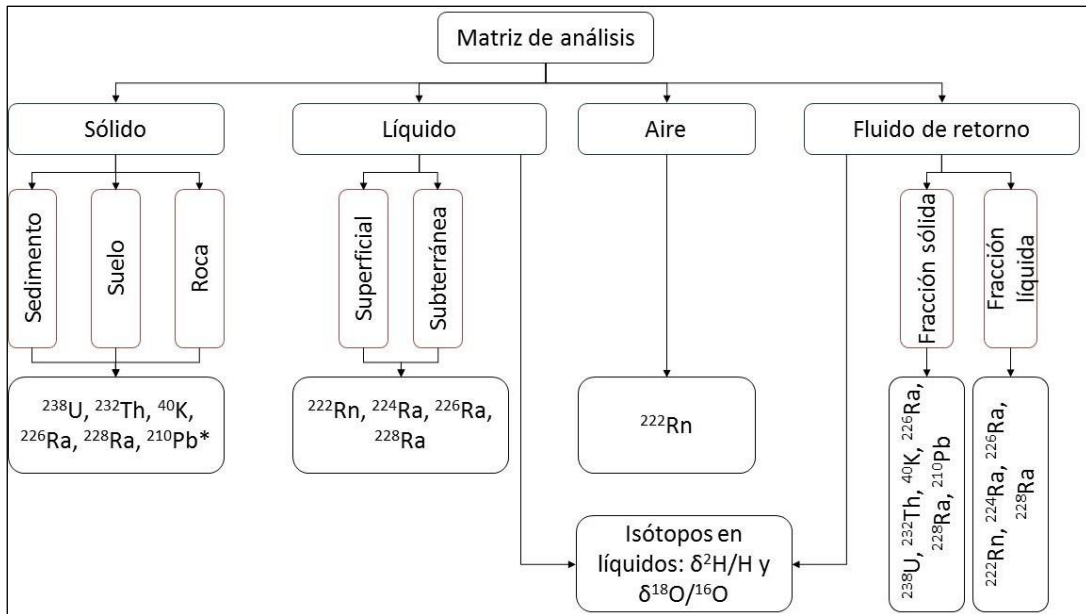


Figura 4. Matriz de análisis

Fuente: Autores

7.1 Espectrometría gamma: Laboratorios, equipos, criterios de desempeño y límites de detección

La espectrometría de rayos gamma es la técnica analítica preferente para determinar las concentraciones de radionúclidos naturales y artificiales en muestras ambientales. Permite obtener una distribución energética (espectro de energía) de las radiaciones gamma emitidas por una muestra. Es una técnica no destructiva, que tiene la ventaja de no requerir una laboriosa preparación de las muestras.

Es necesario que quien preste el servicio de caracterización cuente con una infraestructura técnica suficiente, para que sus sistemas de detección (semiconductores, centelleo) aseguren eficiencias altas, que permitan lograr así, límites de detección que den cumplimiento a las características necesarias de muestras ambientales (LID bajos).

De igual forma, se recomienda que la estructura organizacional del prestador de servicio de caracterización, este fundamentada en estándares reconocidos

internacionalmente (por ejemplo, la implementación de la norma ISO/IEC 17025 y las buenas prácticas de laboratorio). Su sistema de gestión debe demostrar un nivel de madurez, que permita evidenciar, a través de las calificaciones y logros de los ejercicios de intercomparación, con el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) por ejemplo. Estos ejercicios son el eje fundamental de calificación y aseguramiento de la calidad analítica en la confiabilidad de los resultados, de los laboratorios, en materia de radiometría ambiental. Así mismo, deben demostrar y cumplir con las actividades propias del proceso de Aseguramiento de la Calidad (Entrenamientos y calificación técnica de su personal, calificación idónea de equipos, seguimiento y desarrollo de controles internos y de calidad, uso de materiales de referencia certificados, trazabilidad en la información, compromiso de la alta dirección de la entidad, entre otros).

Como marco referencial para el cálculo y definición de los Límites de Detección (LID), los cuales se estiman y establecen, en función de variables analíticas como cantidad de muestra y tiempo analítico, y en función a la información característica propia del área evaluada, se toman los valores promedio mundiales establecidos por UNSCEAR 2000, valores expuestos en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de actividad por unidad de masa acorde con la referencia del UNSCEAR

Referencia	²³² Th	²³⁸ U	⁴⁰ K
UNSCEAR (2000)	0,045 Bq/g	0,033 Bq/g	0,412 Bq/g

Fuente: Autores

Es necesario que a partir de las mediciones de la fase de campaña I, se adopten los valores de límite de detección, en función de los resultados en el área evaluada y que sean una fracción razonable del criterio inicial orientativo descrito aquí. (p. ej. LID < 0,3 UNSCEAR).

Es importante aclarar que los valores de LID no tienen relación directa con los valores de dispensa definidos en los Criterios de vigilancia radiológica que establezca el Ministerio de Minas y Energía. El LID debe entenderse como la cantidad mínima de concentración que están en capacidad de detectar los equipos de espectrometría, los cuales, están muy por debajo de los criterios de dispensa y son más cercanos a las concentraciones típicas de la naturaleza.

7.2 Técnicas radiométricas complementarias: Laboratorios, equipos y criterios de desempeño

En este apartado, se presenta a manera de ilustración un conjunto de técnicas radiométricas que complementan la técnica de espectrometría gamma, su uso dependerá de las características propias del proyecto en donde se identifique la necesidad de obtener información adicional a la que entrega dicha técnica.

7.2.1 Medición directa de Radón

Diferentes estudios conectan la proximidad de explotación petrolera en yacimientos no convencionales, con mayores concentraciones de radón en el ambiente (Yanqing Xu, 2019). El radón, que no se puede oler ni ver, comienza como el uranio que se encuentra naturalmente en el suelo, el agua y las rocas, pero se transforma en gas a medida que se descompone. La fracturación o la perforación de la formación rocosa mediante fracturación hidráulica, estimula el flujo de gas natural con lo cual se hace necesario el monitoreo de Rn cuando se lleva a cabo una explotación petrolera.

La tecnología utilizada en varios tipos de detectores de radón, así como la metodología, es diversa, y la elección dependerá de si se requiere realizar un análisis preliminar de Rn, evaluar la exposición o realizar análisis para remediación; sin embargo, independientemente de esta, las mediciones de radón a menudo se clasifican en mediciones a corto o largo plazo. A continuación, se presentan de manera general algunas de las metodologías y equipos que pueden utilizarse en la evaluación de radón (Field, R.W., et al, 2011) se expone un resumen de estas metodologías en las tablas 3 y 4.

- Pasiva:

Tabla 3. Metodologías pasivas para detección y medición de radón

Equipos		Metodología
Contenedores de carbón activado	Charcoal filler container (ACD-CC)	Adsorción sobre el carbón activado y análisis por espectroscopia gamma de los productos de decaimiento: ^{214}Pb y ^{214}Bi .
	Charcoal liquid Scitillation (ACD-LS)	Adsorción sobre carbón activado, transferencia del AC a un contenedor con líquido de centelleo y uso de un tubo fotomultiplicador que detecta los centelleos causados por partículas alfa de Rn, ^{214}Po , ^{218}Po y partículas beta de ^{214}Pb y ^{214}Bi .
Detector rastro alfa (ATD)		Las áreas dañadas sobre un polímero luego de la exposición a Rn se visualizan con un microscopio óptico o automáticamente utilizando una computadora para escanear el plástico.

Lineamientos técnicos para el procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio de materiales radiactivos de origen natural en los PPII

Cámara de iones permanentemente polarizada (EIC)	Se mide el potencial eléctrico en el electret antes y después de la exposición utilizando un lector electret.
--	---

Fuente: Autores

- Activa:

Tabla 4. Metodologías activas para la detección y medición de radón

Equipos		Metodología
Monitor continuo de Rn (CMR)	Celda de centelleo y tubo fotomultiplicador	Las partículas alfa de Rn, ^{218}Po y ^{214}Po golpean una celda recubierta ZnS, se produce centelleo que detecta un tubo fotomultiplicador.
	Cámara de pulso de iones	Dos electrodos con una diferencia de potencial entre ellos; cuando el Rn o uno de sus productos de decaimiento (^{218}Po y ^{214}Po) emiten partículas alfa, el aire en el camino de la partícula alfa se ioniza. Los iones se recogen en los electrodos como un pulso eléctrico.
	Detector de estado sólido	El radón se difunde en una cámara con una diferencia de potencial entre esta y el detector, las partículas alfa de Rn y los productos de descomposición ^{218}Po y ^{214}Po , golpean el detector y crean pulsos eléctricos.
Dispositivo de Integración Electrónica (EID)		Un detector de estado sólido contenido dentro de un pequeño recinto, en el que el Rn se difunde. Las partículas alfa emitidas por Rn y por sus productos de decaimiento ^{218}Po y ^{214}Po golpean el detector de estado sólido generando pulsos eléctricos.
Grab Radón		Los productos de decaimiento del Rn (^{218}Po y ^{214}Po) entran en equilibrio con el Rn. Las partículas alfa que emiten, impactan la celda recubierta de ZnCl_2 produciendo centelleo que detecta un tubo fotomultiplicador conectado a un sistema de conteo de partículas alfa.

Fuente: Autores

7.2.2 Medición de los productos de decaimiento de Rn

A continuación, se presentan equipos y metodologías asociadas para realizar la medición de los productos de decaimiento, ver tabla 5.

Tabla 5. Equipos y metodologías para la medición de los productos de decaimiento de Rn

Equipos	Metodología
Dispositivo de medición de Rn continuo Integrado	Usado en la evaluación de la exposición a la radiación en salud ocupacional, está diseñado para realizar la recolección del Rn sobre un filtro que se analiza simultánea o posteriormente utilizando: Detector de yodos semiconductores, Centelladores de plástico, Detectores proporcionales de partículas beta (hogares), Detector alfa de estado sólido cerca del filtro o IEC modificado con portafiltro en la cámara
Grab Radon Decay product	Generalmente se recolecta bombeando aire a través de una membrana o filtro de fibra de vidrio y analizado por conteo alfa bruto utilizando un centellador ZnS y un tubo fotomultiplicador.

Fuente: Autores

7.2.3 Conteo de neutrones retardados

El conteo de neutrones retardados (CNR) es una técnica de activación con neutrones térmicos/epitérmicos provenientes de un reactor nuclear de investigación, en la que se producen neutrones emitidos (llamados neutrones retardados) por el decaimiento beta (-) de algunos productos de fisión del uranio (^{235}U y ^{238}U) y el torio (^{232}Th) presentes en la muestra IAEA-TECDOC 564(Alfassi 1994). La técnica de CNR ha sido ampliamente utilizada para la determinación rápida y específica de uranio y torio en muestras de tipo geológico como suelos, rocas y sedimentos, entre otras (IAEA-TECDOC 1715). Es de carácter no destructiva, independiente de los efectos de matriz, rápida (~ 5 minutos por muestra), emplea cantidades de muestra de 1 gramo, tiene un rango de detección de 0.5 a 5.000 mg/kg de uranio y la muestra no requiere de tratamiento químico previo (Kunzendorf 1980, Porras Ríos 2016, Rosenberg 1980).

7.2.4 Espectrometría alfa y conteo por centelleo líquido

La técnica de espectrometría alfa permite la determinación de U, Th, Am, Ra, Pu y Po presentes en un depósito delgado y homogéneo mediante la cuantificación de sus emisiones alfa (L'Annunziata 2012). Por otro lado, la técnica de conteo por centelleo líquido (LSC) es usada para determinar principalmente Sr, tritio, alfa y beta total, Rn y ^{14}C en una matriz líquida, mediante la cuantificación de fotones producidos en un centellador por las partículas beta y alfa procedentes de estos elementos (ISO 13160, CSN 2014). Las técnicas alfa-beta se usan comúnmente para monitorear muestras ambientales acuosas, son de carácter destructivas, dependientes de los efectos de matriz, las muestras requieren de tratamiento químico previo, apropiadas para la determinación de bajas concentraciones y con límites de detección tan bajos como 1 mBq por muestra en espectrometría alfa y hasta 15 Bq/m³ para el ^{89}Sr en LSC.

7.3 Isotopía de elementos estables en muestras líquidas: Laboratorios, equipos y criterios de desempeño

Esta técnica permite analizar los isótopos de hidrógeno y oxígeno en muestras de agua para la caracterización de muestras determinando las relaciones isotópicas de Oxígeno ($\delta^{18}\text{O}$) e Hidrógeno ($\delta^2\text{H}$) por medio de espectroscopia de absorción láser; para así obtener información acerca de la procedencia y naturaleza de las aguas que son objeto de investigación mediante su huella isotópica.

El laboratorio de isotopía debe contar con materiales de referencia secundarios calibrados con los estándares primarios que cubran todo el intervalo de relaciones isotópicas posibles de aguas naturales en las áreas bajo estudio.

7.4 Caracterización geoquímica de las muestras: pertinencia, técnicas y características

La implementación del estudio de tierras raras (TR) funge como un parámetro netamente investigativo y se deberá aplicar de acuerdo con el plan que cada contratista considere en su PPII, de tal forma que contribuya al conocimiento y caracterización geoquímica y geológica del piloto y su entorno. Este tipo de análisis busca correlacionar los elementos que constituyen la lista de LREE (Light Rare Earth Elements: La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu & Gd) y las HREE (Heavy Rare Earth Elements: Yb, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Lu, Sc, e Y) con la ocurrencia de radionúclidos tales como el U y Th (Burns, 1999), (Gerasimovsky, 1959), en fases de roca, suelo, sedimento e hidrocarburos. Los datos recabados sirven adicionalmente para estudios posteriores netamente investigativos de proveniencia y procesos geoquímicos en diferentes condiciones fisicoquímicas, relacionado con la diferenciación geoquímica de la TR y su partición en diversas fases minerales (Lecumberri-Sánchez, Bouabdellah, & Zemri, 2018), (Zhao, y otros, 2017), (McIntire, y otros, 2014).

Respecto de la caracterización de los materiales existen diversas metodologías instrumentales que pueden ser utilizadas en la determinación de las características geoquímicas que sean de interés. En términos generales estas metodologías pueden clasificarse dependiendo del objetivo del análisis en: determinación de concentración, determinación de relación isotópica y determinación de especiación de elementos en soluciones, fases minerales o materia orgánica.

En relación con los métodos para la determinación de concentraciones elementales la tabla 6 que se muestra a continuación, expone las técnicas principales usadas en geoquímica, se muestra adicionalmente las características de estas metodologías.

Tabla 6. Técnicas complementarias para determinación elemental de radionúclidos y elementos asociados

Método	Sensibilidad	Principio	Elementos target	Desventajas
Espectrometría de masas con plasma inductivo acoplado (ICP-MS)	µg/kg, mg/kg y mayores niveles de %	Ionización mediante plasma de la muestra disuelta por ataque multi ácido con detección por espectrometría de masas	Hasta 42 elementos. Ej. Au, Ce, Eu, Ga, Ho, La, Mo, Nb, Nd, Sc, Ta, Th, Ti, Tl, U, Y, Yb. Metodología optimizable para RRE.	Dilución multi ácida de la muestra, efecto matriz, Drift instrumental. Minerales refractarios no se disuelven
Espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en longitud de onda	Nivel de %	Ignición de la muestra seguida de fusión con tetraborato de litio, excitación con radiación X y medición de los fotones emitidos.	Hasta 10 elementos mayores al nivel de % Ej. Si, Al, Fe, Mg, Ca, Na, K, P, Mn, Ti.	Efectos de matriz disminuidos por fusión con fundentes adecuados
Espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersiva en energía	Nivel de mg/kg para la mayoría de los elementos	Empastillado en copa de Mylar con capa de polipropileno, bombardeo con rayos X y medición de los fotones X emitidos por la muestra	Hasta 30 elementos Ej. V, Cr, Ni, Cu, Ga, Ge, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, La, Ce, Nd, W, Pb, Bi, Th, U.	Superposición de señales en muestras complejas, efectos de tamaño de partícula y efectos mineralógicos. Efectos corregidos por software.
Análisis por activación Neutrónica Instrumental	mg/kg para la mayoría de los elementos,	Activación con neutrones seguida de la medición de la actividad inducida	Hasta 43 elementos. Excelente	Concentraciones de U > 100 mg/kg causan interferencias por productos de fisión. Sensibilidad que

Lineamientos técnicos para el procedimiento de muestreo y análisis de laboratorio de materiales radiactivos de origen natural en los PPII

Método	Sensibilidad	Principio	Elementos target	Desventajas
	ug/kg para facilidades de irradiación con flujos de neutrones elevados (10^{13} - 10^{14} n*cm ⁻² *s ⁻¹)	mediante espectrometría gamma con detectores semiconductores.	sensibilidad a RRE. Ej. Sm, La, Eu, Gd, Ce, Dy, Lu, Nd, Sc, Yb.	depende del flujo de neutrones disponible para el ensayo.

Fuente: Autores

8 CARTOGRAFÍA ESPECIALIZADA

Una vez obtenidos los resultados se deberá desarrollar cartografía que permita dilucidar la distribución de los radionúclidos en el terreno, así mismo que sirva como referencia para mostrar los resultados del estudio en las diversas matrices de muestreo, para ello se sugiere utilizar como referencia los documentos técnicos del OIEA NFT-1.3 “radioelement mapping” y el TECDOC 1363 “Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data”.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfassi, Z. (1994). *Instrumental neutron activation analysis (INAA)*. Boca Ratón: CRC Press, Inc.,
- Almond, S., Clancy, R., Davies, J., & Worrall, F. (2014). The flux of radionuclides in flowback fluid from shale gas exploitation. *Environmental science and pollution research international*, 21 (21) 12316-12324.
- Baeza, A., Alonso, A., & Heras, M. (2003). *Procedimiento para la conservación y preparación de muestras de suelo para la determinación de la radiactividad, Procedimiento 1.2*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear de España.
- Barnekow, U., Fesenko, S., Kashparov, V., Kis-Benedek, G., Matisoff, G., Onda, Y., . . . Varga, B. (2019). *TRS 486: Guidelines on Soil and Vegetation Sampling for Radiological Monitoring*. Vienna: IAEA.
- Burns, P. C. (1999). The crystal chemistry of uranium. En P. Burns, & R. Finch, *Uranium: Mineralogy, Geochemistry and the environment* (págs. 23-90). Washington: Mineralogical Society of America.
- Consejo de Seguridad Nuclear (CSN). (2014). *Procedimiento para la determinación de los índices de actividad alfa total y beta total en aguas potables mediante el método de concentración y detección por centelleo líquido. Colección Informes Técnicos 11.2014 Serie Vigilancia Radiológica Ambiental Procedimiento 1.18*. Madrid: CSN.
- EPA. (2019, marzo 1). *United States Environmental Protection Agency*. Retrieved from Radioactive Waste Material From Oil and Gas Drilling: <https://www.epa.gov/radtown/radioactive-waste-material-oil-and-gas-drilling>
- Field, R. W., P. Jenkins, and D. Steck. "Radon Measurement." (2011): 754-767.
- Finkelstein, M. M., & Kreiger, M. M. (1996). *Radium in drinking water and risk of bone cancer in Ontario youths: a second study and combined analysis. Occupational and Environmental Medicine*, 53(5).305-311.
- Folk, R. (1974). *Petrology of sedimentary rocks*. Austin: Hemphill Publishing Company.
- Fry, N. (1991). *The field description of metamorphic rocks*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- García Orellana, J., & Sánchez Cabeza, J. (2012). EL Pb-210 como trazador de procesos ambientales. En J. Sánchez Cabeza, M. Díaz Ascencio, & A. Ruíz Fernández, *Radiocronología de sedimentos costeros utilizando Pb-210: Modelos, validación y aplicaciones*. (págs. 4-7). Vienna: Organismo Internacional de Energía Atómica.
- Gerasimovsky, V. I. (1959). Geochemistry of rare earth elements. *International Geology Review*, 1 (12), 72-79.

- Gill, R. (2010). *Igneous Rocks and Processes a practical guide*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- GOBCO. (2020). Datos abiertos. Obtenido de Datos de eventos de minas antipersonales en Colombia: <https://www.datos.gov.co/Inclusi-n-Social-y-Reconciliaci-n/Eventos-Minas-Antipersonal-en-Colombia/sgp4-3e6k/data>
- Herranz, M., Jiménez, R., Navarro, E., Payeras, J., & Pinilla, J. (2003). *Procedimiento de toma de muestras para la determinación de la radiactividad en suelos: capa superficial*. Madrid: Consejo de Seguridad Nuclear de España.
- IAEA. (1 de enero de 2020). International Atomic Energy Agency webpage. Obtenido de International Conference on the Management of Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) in Industry: <https://www.iaea.org/events/norm-2020>
- IAEA. (2003). *TEC-DOC-1363 Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data*. Vienna: IAEA.
- IAEA. (2010). *Radioelement mapping*. Vienna: IAEA.
- IGAC. (2020). GEOPORTAL. Obtenido de Datos Abiertos IGAC: <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-igac>
- International Atomic Energy Agency. *Commercial products and services of research reactors. IAEA-TECDOC 1715*, IAEA. Vienna, 2010.
- International Atomic Energy Agency. *Practical Aspects of Operating a Neutron Activation Analysis Laboratory. IAEA-TECDOC 564*, IAEA. Vienna, 1990, p. 197.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 13160 - Water quality - Strontium 90 and Strontium 89 - Test methods using liquid scintillation counting or proportional counting*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization. (2012). *ISO 13160 - Water quality - Strontium 90 and Strontium 89 - Test methods using liquid scintillation counting or proportional counting*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization. (2017). *ISO 18400 – Soil quality – Sampling*. Ginebra: ISO.
- International Organization for Standardization. (2016). *ISO 5667 – Water quality – Sampling*. Ginebra: ISO.
- Jerram, D., & Petford, N. (2011). *Field description of igneous rocks*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- Kunzendorf, H., Løvborg, L. and Christiansen, E. (1980). *Automated Uranium Analysis by Delayed-Neutron Counting*. Dinamarca: Risø National Laboratory.
- L'Annunziata, M. F. (2012). *Handbook of radioactivity analysis. Third edition*, Cambridge: Academic Press.
- Landis, J., Sharma, M., Renock, D., & Niu, D. (2018). Rapid desorption of radium isotopes from black shale during hydraulic fracturing 1. Source phases that control the release of Ra from Marcellus Shale. *Chemical Geology*, 486 1-13.
- Lecumberri-Sánchez, P., Bouabdellah, M., & Zemri, O. (2018). Transport of rare earth elements by hydrocarbon-bearing brines: Implications for ore deposition and

- the use of REEs as fluid source tracers. *Chemical Geology*, 479 204-215.
- Mason, R. (1990). *Petrology of metamorphic rocks*. Londres: Unwin Hyman.
- Mook, W. (2000). *Environmental Isotopes In The Hydrological Cycle Principles and Applications Volume 1: Theory, Methods, Review*. Gronnigen: IAEA .
- McIntire, M., Chaudhuri, S., Totten, M., Clauer, N., Sandlin, G., Kirkwood, S., Boutin, R. (2014). Rare Earth Elements (REEs) in Crude Oils in the Lansing-Kansas City Formations in Central Kansas: Potential Indication about Sources of the Oils, Locally Derived or Long-Distance Derived. *AAPG: Search and Discovery*, 1:26.
- Nichols, G. (2009). *Sedimentology and Stratigraphy-2nd edition*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- NRC. (1988). *Health Risks of Radon and other internally deposited alpha emitters*. Washington: National Research Council.
- NRC. (1988). Radium. En NRC, *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters* (pp. 176-244). Washington D.C.: National Academies Press.
- Philpotts, A. (1990). *Petrography of igneous and metamorphic rocks*. Connecticut: CBS Publishers and Distributors.
- Repositorio UNAL. Porras Ríos A. F. (2016). *Importancia de la adecuación de un laboratorio de neutrones retardados en Colombia para la exploración de uranio y protección radiológica en su manipulación y análisis*. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia - Sede Bogotá.
- Rosenberg, J. A. (1980). Simple method for the determination of uranium and thorium by delayed neutron counting. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. 62, (2), 145-149.
- Tucker, M. (2011). *Sedimentary rocks in the field*. Chichester: Wiley-Blackwell.
- UNSCEAR (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Volume I: Sources*: United Nations
- UNSCEAR (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation, Volume II: Effects*: United Nations
- Wingteringham, F. (1989). *Radioactive fallout in soils, crops and food*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Yanqing Xu, Mounika Sajja, Ashok Kumar. (2019). Impacto de la fractura hidráulica en las concentraciones de radón en interiores en Ohio: un enfoque de modelado multinivel. *Frontiers in Public Health*. 7 (76). DOI: 10.3389 / fpubh.2019.00076
- Zhao, Y., Liu, C., Niu, H., Zhao, X., Zhan, D., Yiang, D., & Deng, H. (2017). Trace and rare earth element geochemistry of crude oils and their coexisting water from the Jiyuan Area of the Ordos Basin, N China. *Geological Journal*, (53:6).

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Propuesta de muestreo en matriz roca	19
Figura 2. Ilustración de la geometría recomendada para contenedores de plástico	22
Figura 3. Diseño de mallas de muestreo	26
Figura 4. Matriz de análisis	331

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Caracterización de radionúclidos utilizando espectrometría gamma sobre las secuencias de decaimiento	24
Tabla 2. Valores de actividad por unidad de masa acorde con la referencia del UNSCEAR	342
Tabla 3. Metodologías pasivas para detección y medición de radón	353
Tabla 4. Metodologías activas para la detección y medición de radón	374
Tabla 5. Tabla 5. Equipos y metodologías para la medición de los productos de decaimiento de Rn	374
Tabla 6. Técnicas complementarias para determinación elemental de radionúclidos y elementos asociados	407