

RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL

EN EL ECUADOR

ISBN: 978-9907-802-12-2

2026

Gilson Julian Pucha Amancha
Bolívar Edmundo Flores Humanante
Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez



RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL EN EL ECUADOR

AUTORES:

GILSON JULIAN PUCHA AMANCHA

BOLÍVAR EDMUNDO FLORES HUMANANTE

EDMUNDO RODRIGO CALUÑA SÁNCHEZ



Este libro ha sido debidamente examinado y valorado en la modalidad doble par ciego con fin de garantizar la calidad científica.

©Grupo Editorial BLR
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Riobamba – Ecuador
Correo: publicaciones@grupobl.com
<https://grupobl.com/libros-investig>
REPOSITORIO



Pucha, G., Flores, B., Caluña, E. (2026) Radiación ionizante natural en el Ecuador . Grupo Editorial BLR.

© Gilson Julian Pucha Amancha
Bolívar Edmundo Flores Humanante
Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez

ISBN: 978-9907-802-12-2

El copyright promueve la libertad de expresión, protege la diversidad de ideas y conocimiento, además apoya la libre expresión. Se prohíbe de manera rigurosa la producción o el almacenamiento de esta publicación, ya sea en su totalidad o en parte, está estrictamente prohibido por ley, incluyendo el diseño de la portada, así como su difusión a través de cualquiera de sus medios, ya sean electrónicos, mecánicos, ópticos, de grabación o incluso de fotocopia, sin permiso de los propietarios de los derechos de autor.

FILIACIONES DE LOS AUTORES

Gilson Julian Pucha Amancha

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: gilsonpucha@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8679-327X>

Bolívar Edmundo Flores Humanante

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: bflores0361@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-3098-3764>

Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Correo Electrónico: ecaluna2010@hotmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4793-5207>



**Escuela Superior
Politécnica de Chimborazo**



GRUPO BLR

PRÓLOGO

La radiación ionizante forma parte del entorno natural y ha estado presente desde la formación del planeta. Su origen se encuentra en los radionúclidos contenidos en la corteza terrestre, la radiación cósmica que llega desde el espacio y los elementos radiactivos incorporados al aire, el agua, los alimentos y los organismos vivos. Aunque se trata de un fenómeno cotidiano, invisible para los sentidos humanos, su estudio es indispensable para comprender las condiciones radiológicas del ambiente y valorar sus posibles implicaciones para la población y los trabajadores.

En Ecuador, la diversidad geográfica y geológica genera condiciones particulares para el estudio de la radiación ionizante natural. El amplio gradiente altitudinal, la actividad volcánica, la presencia de fallas geológicas, la variedad de formaciones rocosas y minerales, así como el desarrollo de actividades mineras, petroleras y constructivas, pueden influir en la distribución de los radionúclidos naturales y en los niveles de exposición. Estas características convierten al país en un escenario de especial interés para la física de las radiaciones, la geología, la dosimetría ambiental y la protección radiológica.

El presente libro, titulado Radiación ionizante natural en el Ecuador, constituye un esfuerzo por analizar, sistematizar y divulgar el conocimiento disponible sobre este fenómeno en el territorio nacional. Para ello, integra los fundamentos físicos de la radiación y la radiactividad con la descripción de las principales fuentes naturales de exposición, entre ellas la radiación cósmica, la radiación terrestre, el

radón y los radionúclidos primordiales, especialmente el potasio-40 y los integrantes de las series radiactivas del uranio-238 y del torio-232.

La obra también examina la presencia de materiales radiactivos de origen natural, conocidos como NORM, y de aquellos cuya concentración o disponibilidad puede incrementarse como consecuencia de procesos tecnológicos, denominados TENORM. Su análisis resulta relevante en sectores como la minería, la industria petrolera, la extracción y transformación de minerales y la fabricación de materiales de construcción.

Uno de los principales aportes del libro es la recopilación de los estudios radiométricos desarrollados en Ecuador, desde las primeras actividades de prospección de uranio y medición de la radiactividad ambiental hasta las investigaciones contemporáneas sobre radón, materiales de construcción, radiación terrestre y exposición externa. Asimismo, se presentan resultados obtenidos en la provincia de Chimborazo, territorio caracterizado por su notable variación altitudinal y por la presencia de formaciones geológicas y depósitos volcánicos que permiten examinar la influencia del entorno físico sobre la radiación natural.

El contenido no pretende establecer relaciones causales predictivas entre las variaciones de la radiación natural y la ocurrencia de fenómenos sísmicos o volcánicos. Su propósito es documentar las observaciones existentes, analizar las correlaciones reportadas y presentar los resultados disponibles dentro de un marco científico y

radiológico. De esta manera, se busca evitar interpretaciones que excedan el alcance de la evidencia experimental.

Esta obra está dirigida a estudiantes, docentes, investigadores y profesionales vinculados con la física, la geología, las ciencias ambientales, la minería, la ingeniería, la salud ocupacional y la protección radiológica. También puede servir como referencia para instituciones responsables del monitoreo ambiental y para quienes deseen comprender la presencia de la radiación ionizante natural en Ecuador.

Se espera que este libro contribuya a fortalecer la cultura científica y la protección radiológica, promueva el establecimiento de líneas base nacionales y motive el desarrollo de nuevas investigaciones. Conocer la radiación natural presente en el territorio no debe generar alarma, sino proporcionar fundamentos para medirla, interpretarla adecuadamente y adoptar decisiones sustentadas en evidencia científica.

ÍNDICE

PRÓLOGO.....	1
ÍNDICE.....	4
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO I.....	11
Radiación y radioactividad	11
1.1. Estructura de la materia.....	11
1.1.1. Ion	12
1.1.2. Átomo.....	12
1.1.3. Isotopos	15
1.1.4. Modelo estándar	16
1.2. Radioactividad y decaimiento nuclear	18
1.3. Radiación electromagnética y espectro	24
1.3.1. Radiación.....	25
1.3.2. Radiación electromagnética	25
1.3.3. Espectro electromagnético	26
1.4. Tipos de radiación ionizante	30
1.4.1. Radiación directamente ionizante	31
1.5. Interacción de la radiación con la materia.....	33
1.5.1. Efecto Compton	34
1.5.2. Efecto fotoeléctrico	35
1.5.3. Producción de pares	35
1.6. Magnitudes radiológicas	36
1.6.1. Exposición.....	37
CAPÍTULO II.....	40
Radiación ionizante natural.....	40
2.1. Radiación ionizante natural.....	41

2.2. Radiación Cósmica.....	43
2.2.1.Exposición a los rayos cósmicos.....	47
2.3. Radiación terrestre	52
2.3.1.Exposición a la radiación terrestre	57
2.4. Radón	60
2.4.1.Exposición a radón.....	60
2.5. Ingestión total	61
2.6. Materiales de construcción.....	63
2.6.1.Índices de riesgo.....	66
2.7. Material Radioactivo de Origen Natural (NORM)	68
2.8. Minería	70
2.9. Industria del petróleo y gas	70
CAPÍTULO III	72
Entorno físico y natural del Ecuador.....	72
3.1. Información geográfica de Ecuador	72
3.2. Regiones geográficas del Ecuador	74
3.3. Geología	77
3.4. Minas	81
3.5. Petróleo.....	85
CAPÍTULO IV.....	88
Exposición a la radiación ionizante en Ecuador	88
4.1. Proyecto Mapa de Áreas Favorables de Uranio	89
4.2. Cuantificación de gas radón en el Ecuador.....	93
4.3. Estudios radiométricos en materiales de construcción	99
4.4. Exposición radiológica en Pacayacu, una ciudad petrolera.....	101
4.5. Estudios sobre radón	104

CAPÍTULO V	106
Exposición a la radiación ionizante en la provincia de Chimborazo	106
5.1. Área de estudio	107
5.2. Radiación de fondo natural de la provincia de Chimborazo.....	108
5.3. Radiación terrestre de la provincia de Chimborazo	110
GLOSARIO DE TÉRMINOS	117
BIBLIOGRAFÍA	125

INTRODUCCIÓN

En Ecuador, los primeros estudios de la radiación ionizante natural fueron llevados a cabo por la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (CEAA) en el año 1966, dentro de proyectos de cooperación técnica internacional del Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) con el objetivo de fomentar principalmente el desarrollo de la energía nuclear en todo el continente y la aplicación de la tecnología nuclear en el campo de la salud, alimentación, agricultura, patrimonio, industrial, entre otros, para el desarrollo local o regional. Así mismo, se encuentran los esfuerzos de instituciones educativas para conocer, comprender y medir este fenómeno presente en el ambiente. A continuación, se describen las actividades realizadas en el campo de la radiación ionizante natural hasta la actualidad.

En 1966, el CEAA, la Escuela Politécnica Nacional (EPN) con apoyo del OIEA abordan los primeros trabajos de búsqueda de uranio en el Ecuador, en consecuencia, inician la medida de radioactividad ambiental. El proyecto involucró el monitoreo de radiación ionizante natural con detectores de centelleo medidos por vía aérea y terrestre, con el fin de delimitar zonas potencialmente favorables de uranio. El sondeo aéreo cubrió 17000 km² de la región Sierra y Costa, mientras, por vía terrestre monitorearon a lo largo de 3000 km de la red nacional de carreteras y en 1968 extendieron los estudios en 7000 km así mismo en carreteras y caminos de herradura cercanas a la Cordillera Oriental y Cuenca. Finalmente, en 1974

completaron con los análisis geoquímicos de muestras tomadas en yacimientos pórfidos de cobre en el sur del país.

Entre 1980 y 1990 la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH) en colaboración del CEAA e investigadores de la Universidad de Pavia (Italia) y Clermont (Francia) estudiaron la concentración radón a lo largo del Sistema de la Falla Geológica del Pallatanga para evaluar si el comportamiento sísmico tiene relación con la variación de la concentración de este gas radioactivo aplicando la técnica detectora de estado sólido de trazas nucleares (SSNTD). En total se implementaron 31 estaciones de medida dentro de la provincia de Chimborazo, Tungurahua, Cotopaxi y Pichincha.

El Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la ESPOCH ha retomado el estudio de la radiación ionizante natural en el país, publicando mapas radiométricos a partir del monitoreo de radiación natural de fondo y radiación terrestre en la provincia de Chimborazo, lugar ubicado en el centro del país y con un amplio rango altitudinal, además, dicho lugar es vulnerable a la deposición de ceniza por erupciones del volcán Tungurahua y Sangay, estos últimos son considerados volcanes potencialmente activos del Ecuador.

El libro tiene como propósito dar a conocer la presencia de la radiación ionizante natural en el Ecuador, así como está en todo el mundo, integrando fundamentos físicos, antecedentes históricos, estudios radiométricos y resultados recientes, con énfasis en la

exposición poblacional, materiales de construcción y actividades extractivas. Se presentan estudios que caracterizan y cuantifican las principales fuentes de radiación ionizante natural en el Ecuador como radiación cósmica, radionúclidos primordiales (^{40}K , series de ^{238}U y ^{232}Th) y radón (^{222}Rn), analizando su distribución espacial en función del contexto geológico, altitudinal y tectónico, con énfasis en regiones volcánicas andinas, como es el caso de estudio la provincia de Chimborazo.

Para cumplir con el propósito se se presenta información sistematizada de estudios históricos y contemporáneos de radiometría ambiental a nivel nacional e internacional con sus principales resultados evaluados en niveles de exposición a la radiación ionizante natural en términos de dosis efectiva anual, considerando principalmente la exposición externa en diferentes escenarios geográficos del Ecuador. Además, en el caso de Ecuador, se recalca la presencia, concentración y comportamiento radiológico de materiales NORM (Material Radioactivo de Origen Natural) y TENORM (Material Radioactivo de Origen Natural Tecnificado) asociados a actividades extractivas (minería metálica/no metálica y explotación petrolera), donde se muestra su posible impacto en trabajadores y población circundante, así como su relación con procesos tecnológicos que favorecen la concentración de radionúclidos naturales y, donde es indispensable disponer de valores de referencia (líneas base) de radiación ionizante natural, expresados en términos de tasa de dosis gamma ambiental, concentración de radionúclidos y niveles de radón, que sirvan como soporte para futuras investigaciones, con el fin de evaluar los riesgos

radiológicos y desarrollo de normativas nacionales en protección radiológica.

Este libro no pretende establecer relaciones causales predictivas entre radiación natural y eventos sísmicos o volcánicos, sino documentar observaciones, correlaciones reportadas y estudios existentes bajo un marco científico y radiológico.

CAPÍTULO I

Radiación y radioactividad

En este capítulo se establecieron las bases para comprender qué es la radiación ionizante y cómo interactúa con la materia. Se explicó la estructura del átomo y se abordaron los núcleos inestables, los cuales, mediante la desintegración radiactiva, emiten partículas alfa y beta, así como radiación gamma. Además, se analizó el espectro electromagnético y se identificó el punto a partir del cual la radiación se considera ionizante, diferenciándola de la radiación no ionizante. Se describen los principales tipos de radiación ionizante, sus propiedades físicas y mecanismos de interacción con los materiales. Se introdujeron conceptos clave como la transferencia lineal de energía (LET). Por último, se establecieron las bases para comprender la exposición radiológica, diferenciando entre exposición externa e interna. Estos fundamentos permiten abordar el análisis de la radiación ionizante natural en los capítulos siguientes.

1.1. Estructura de la materia

Es bien conocido que la materia está constituida por átomos, dentro de ellos está el núcleo conformado por protones y neutrones y, los electrones orbitando alrededor del núcleo. Esta descripción del átomo como el sistema solar donde el sol hace referencia al núcleo y los planetas a los electrones lo planteó Ernest Rutherford en 1911. Dos años después, el modelo atómico de Niels Bohr menciona los niveles de energía, donde el electrón emite o absorbe energía en la transición de

una órbita permitida a otra. Hoy en día, también se conoce que los protones, y neutrones están compuestos por una agrupación de quarks descubiertos en el siglo XX.

1.1.1. Ion

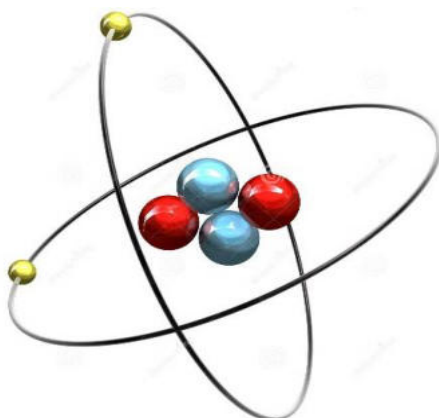
El ion puede ser una partícula, átomo o molécula que tiene carga positiva o negativa. En caso de no tener carga se le designa como neutro, pero no ion, este es el caso de los átomos que son eléctricamente neutros y están constituido del mismo número de protones (carga positiva) en el núcleo y de electrones (carga negativa) girando en los orbitales alrededor del núcleo. Para que un átomo neutro adquiriera una carga positiva se hace colisionar partículas o radiación electromagnética con suficiente energía para romper el enlace o unión de los electrones orbitando el núcleo, de tal manera, de expulsar electrones quedando el átomo con un déficit de electrones, conocido como átomo cargado positivamente (ion positivo), por el contrario, al transferir electrones a un átomo, este quedará con un exceso de electrones, conocido como átomo cargado negativamente (ion negativo). En el primer caso, el electrón desprendido del núcleo se llama electrón libre, en conjunto con ion positivo generado se conoce como la producción de un par iónico.

1.1.2. Átomo

El modelo atómico que permite comprender la constitución del átomo y el comportamiento de la radiación ionizante con la materia se recurre al modelo atómico de Bohr como aproximación conceptual. Este modelo describe al átomo como un sistema

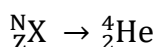
formado por un núcleo central compuesto por nucleones como protones (carga positiva) y neutrones (sin carga), alrededor del cual se distribuyen los electrones con carga negativa en niveles de energía definidos. Los electrones se mueven en órbitas discretas alrededor del núcleo, tal como se ilustra en la Figura 1.1.

Figura 1.1. Átomo del Modelo de Bohr.



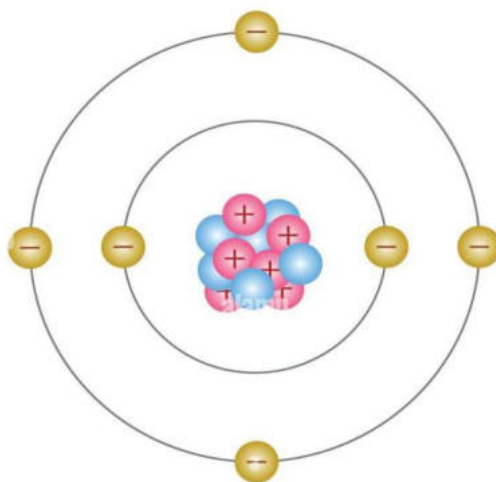
Fuente: Elaboración propia.

El átomo de la Figura 1.1 tiene un núcleo con dos protones o también llamado número atómico (Z) y dos neutrones. Estos dos tipos de partículas en el núcleo conocidos como nucleones forman parte del número másico (N) del elemento químico, en este caso es igual a 4. Esta información es importante, porque en base al número atómico 2 se deduce el lugar que se encuentra en la tabla periódica, en este caso es el segundo elemento de la tabla periódica, es un átomo de helio (He) y su representación como elemento químico (X) en el formato general de la tabla periódica es:



De esta forma se puede identificar los elementos químicos que conforman la tabla periódica, considerando que un elemento químico es una sustancia formada por átomos del mismo tipo. Por ejemplo, a partir de la siguiente figura se puede determinar que elemento químico es.

Figura 1.2. Átomo.



Fuente: Elaboración propia.

El átomo de la figura 1.2, posee 6 protones y 6 neutrones. La suma de los nucleones es igual a 12. Dicho de otra forma, el numero atómico es $Z=6$ y el numero masico es $N=12$, entonces, se puede representar de la siguiente manera:

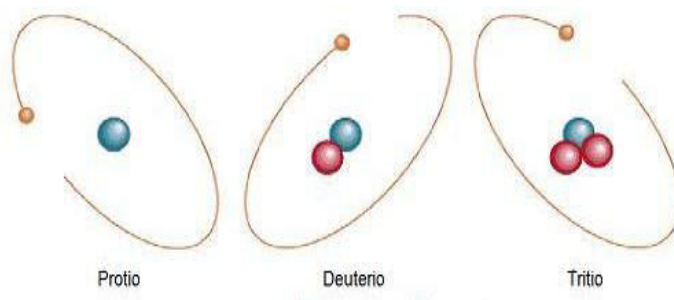


Con dicha información se puede confirmar en la tabla periódica que el elemento por identificar es el carbono (C).

1.1.3. Isotopos

En la naturaleza existen mismos elementos con el mismo número de protones, pero diferente número de neutrones se los conoce como isotopos. Un ejemplo clave es el hidrógeno (H) o conocido como protio por disponer únicamente de un protón en el núcleo, es el elemento químico más simple y es el primer elemento de la tabla periódica. El hidrógeno fue también el primer elemento en formarse tras el Big Bang, durante los primeros minutos de nucleosíntesis primordial, dando origen posteriormente al helio y a trazas de otros elementos ligeros. Su simplicidad estructural y abundancia lo convierten en un elemento fundamental o primordial para comprender tanto la estructura de la materia como los procesos astrofísicos y nucleares que rigen la evolución del universo. El hidrógeno presenta tres isótopos naturales, los cuales se diferencian por el número de neutrones en su núcleo.

Figura 1.3. Isotopos de Hidrogeno.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1.3, el protio (${}^1_1\text{H}$) con el deuterio (${}^2_1\text{H}$) son átomos estables y el tritio (${}^3_1\text{H}$) es un átomo radioactivo. Al deuterio y al

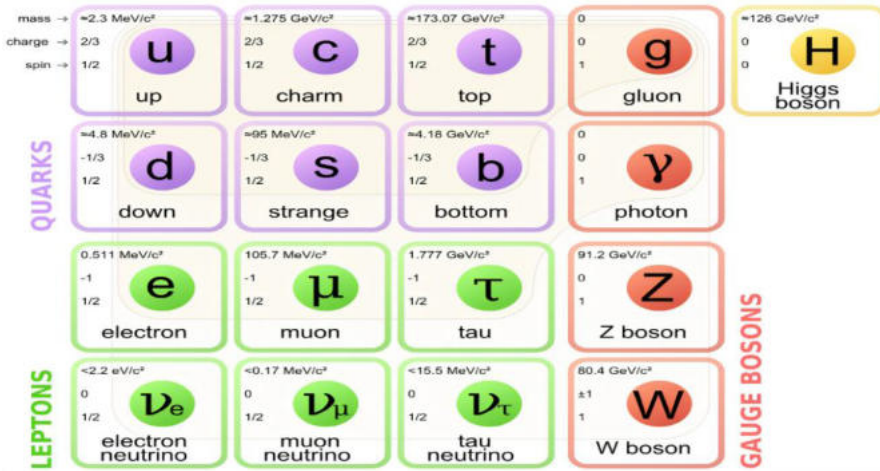
tritio se le conocen como isótopo del hidrogeno. En la misma figura se puede identificar a los átomos radioactivos o radioisótopos que se caracterizan por lo general por su mayor contenido de neutrones que protones en el núcleo, otorgándole inestabilidad, en consecuencia, emiten partículas alfa, beta y radiación gamma provenientes del núcleo para alcanzar un estado temporalmente estable o alcanzar su estabilidad total. Y así existe un sinnúmero de isótopos y radioisótopos en la naturaleza, por nombrar algunos de ellos está el $^{238}_{92}\text{U}$, $^{232}_{90}\text{Th}$, $^{40}_{19}\text{K}$, $^{14}_6\text{C}$, $^{222}_{86}\text{Rn}$, etc.

1.1.4. Modelo estándar

Se busca entender más allá del comportamiento atómico, Se debe conocer las interacciones entre partículas fundamentales de los átomos, es decir, a nivel subatómico, para conocer el origen de la emisión de partículas alfa, beta y radiación gamma del núcleo. El modelo estándar de la física de partículas es la teoría que describe las partículas fundamentales que constituyen la materia y las interacciones que actúan entre ellas. En este contexto, la materia está formada por fermiones, que incluyen quarks y leptones, las fuerzas fundamentales como la electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil que se dan en el núcleo son mediadas por partículas llamadas bosones. Entre estas se encuentran el fotón, los gluones y los bosones W^+ , W^- y Z^0 . Además, el modelo incorpora el bosón de Higgs, conocido como partícula mediadora para conferir masa a las partículas.

Con la ayuda de grandes aceleradores de partículas fue posible profundizar en el conocimiento de la estructura fundamental de la materia. A finales de la década de 1960, los experimentos realizados en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford (SLAC), mediante la dispersión inelástica profunda de electrones de alta energía sobre protones y neutrones ligados en núcleos de deuterio, proporcionaron evidencias experimentales de la existencia de los quarks. Posteriormente, se identificaron seis tipos de quarks: up, down, charm, strange, top y bottom. En 1983, los experimentos UA1 y UA2 del Super Proton Synchrotron (SPS), en el Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN), permitieron descubrir los bosones W^+ , W^- y Z^0 mediante colisiones entre protones y antiprotones. Asimismo, en 2012, los experimentos ATLAS y CMS del Gran Colisionador de Hadrones (LHC) detectaron el bosón de Higgs a partir de colisiones protón-protón. Estos descubrimientos contribuyeron a consolidar el Modelo Estándar de la física de partículas, que describe 12 partículas fundamentales de materia seis quarks y seis leptones, además de los bosones responsables de mediar las interacciones fundamentales.

Figura 1.4. Partículas fundamentales.



Fuente: (National Geographic, 2023).

La fuerza electromagnética y la fuerza débil son mediados por los bosones gauge del modelo de Glashow-Weinberg-Salam (g , $W^\pm$, Z). La fuerza fuerte se atribuye a ocho gluones de la cromodinámica cuántica (Casaus et al., 2005). Por último, está el fotón (γ) como una partícula elemental sin masa en reposo que es mediadora de la interacción electromagnética. En la figura 1.4 se identifica los quarks y los leptones que pertenecen al grupo de los fermiones y se caracterizan por poseer espín semientero, tienen masa y carga, mientras que las partículas mediadoras de la fuerza son los bosones de espín entero y tan solo el bosón Z y $W^\pm$ tiene masa.

1.2. Radioactividad y decaimiento nuclear

La radioactividad es una propiedad intrínseca de los núcleos inestables o más conocidos como radionúclidos que obedecen la ley de desintegración o decaimiento radioactivo. El decaimiento

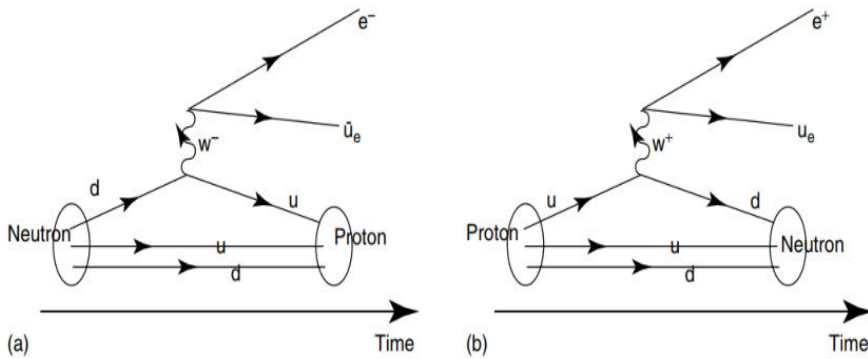
radioactivo de dichos elementos es constante en el tiempo, es decir, es la probabilidad de transmutación de un radionúclido dado en otro radionúclido o a un átomo estable en un instante de tiempo. La ecuación que describe la evolución temporal de un conjunto de radionúclidos idénticos es la siguiente:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N = \frac{\ln(2)}{T_{1/2}} N \quad (4)$$

Por definición, el número de radionúclidos dN decaen en un infinito corto de tiempo dt ; λ es la constante de decaimiento, que caracteriza la probabilidad de desintegración de un único radionucleido por unidad de tiempo; N es el número de radionucleidos iniciales en el tiempo t ; y $T_{1/2}$ se conoce como periodo de semidesintegración, es el tiempo después el cual el número de radionucleidos se reduce a la mitad del número inicial. A , es la actividad del radionúclido medida en Becquerel (Bq) (o Ci= 3.7×10^{10} Bq) que significa la ocurrencia de un decaimiento por segundo (dps).

Los radionúclidos se caracterizan por tener un número atómico (Z) alto, es decir, más protones, por tanto, requieren mayor número de neutrones para estabilizar y mantener unidas los nucleones, caso contrario, el núcleo tiende a un reordenamiento nuclear. Este último proceso está controlado por la fuerza nuclear débil, una de las fuerzas universales y su comportamiento influye en la estructura sub nuclear, es decir, el nivel de los quarks que constituyen a los protones y neutrones. A continuación, se presenta los dos tipos de decaimiento beta.

Figura 1.5. Desintegración beta negativo y positivo.

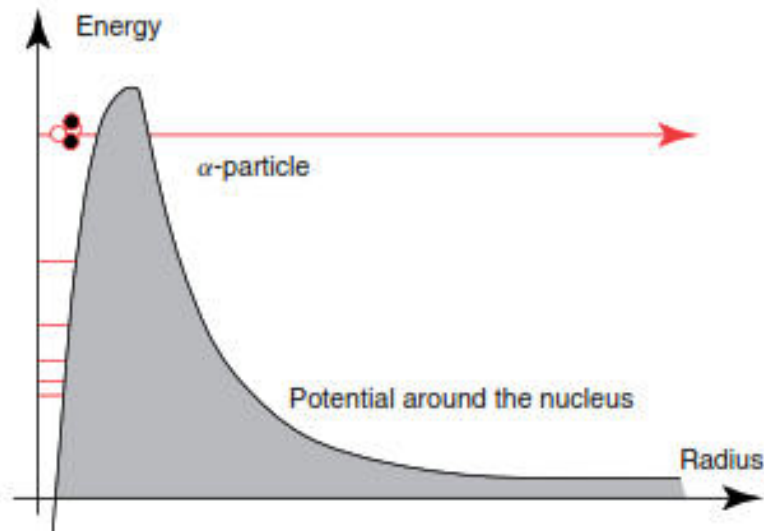


Fuente: (Lariviere & Guérin, 2010).

En la Figura 1.5 se aprecia el reordenamiento nuclear que consiste en que un quark “*up*” se convierte a un quark “*down*” y la generación de una partícula pesada y de vida ultracorta llamada bosón (W) que posteriormente decae en un electrón que es emitido del núcleo, a este proceso se denomina desintegración beta negativo (e^-), por otro lado, la trasmutación de un quark “*down*” a un quark “*up*” se genera la desintegración beta positivo (e^+ o positrón), la antimateria del electrón. Ambos procesos siempre van acompañados de la manifestación de un antineutrino y neutrino, respectivamente.

Otro proceso que se da en estructura nuclear es la desintegración alfa (α), donde es probable que se forme un clúster liviano compuesto por dos protones y dos neutrones (núcleos de helio) que a veces puede escapar del núcleo original por el proceso cuántico llamado efecto túnel. A continuación, una partícula α dentro de un núcleo escapa a través de la barrera de potencial debido al efecto túnel (ver Figura 1.6).

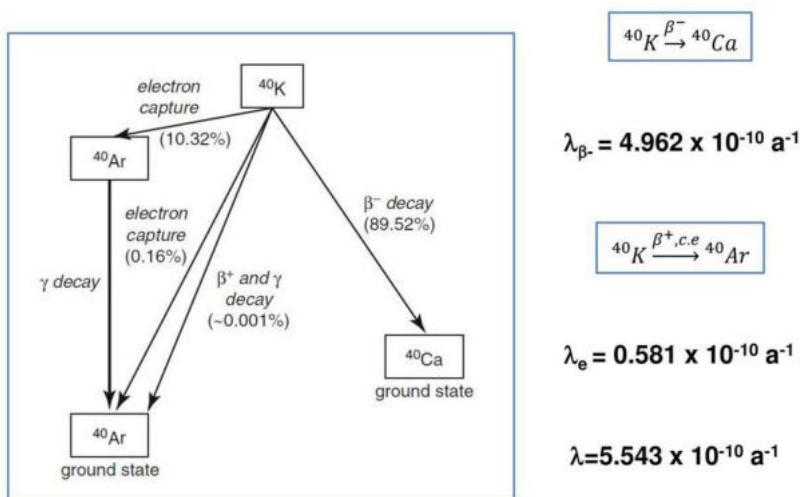
Figura 1.6. Desintegración alfa.



Fuente: (Lariviere & Guérin, 2010).

A menudo, el núcleo resultante después de una de las tres desintegraciones (e^- , e^+ o α), el radionucleido queda en estado excitado. Para lograr un estado fundamental temporalmente o terminante libera el exceso de energía emitiendo uno o más fotones de radiación gamma (γ). A la liberación de radiación gamma por el decaimiento de un radionúclido en otro radionúclido o átomo estable viene dado por la emisión de energías bien definidas (ver Figura 1.7) y, este último proceso se denomina desintegración gamma.

Figura 1.7 Emisión de Radiación Gamma del ^{40}K con Energía Definidas.



Fuente: (Lee, 2013).

En la figura 1.7 se observa la desintegración del ^{40}K , Este isotopo es inestable y se transforma en otros núclidos mediante tres procesos. La desintegración beta negativo con una probabilidad aproximada de 89,52 %, un neutrón del núcleo se trasforma en un protón, emitiendo un electrón y un neutrino, como resultado el ^{40}K se convierte en ^{40}Ca , este último es un núcleo estable.

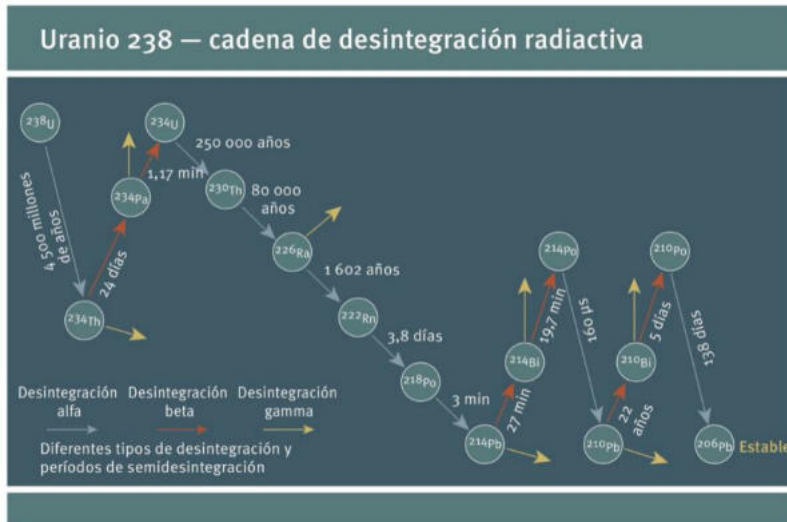
La captura electrónica (EC), tan solo con una probabilidad del 10,32 %, el núcleo captura un electrón de los orbitales internos, provocando la transformación de un protón en un neutrón y la emisión de un neutrino, resultando en ^{40}Ar , que es un radionúclido y emite posteriormente radiación gamma para alcanzar su estado fundamental. Finalmente, está la desintegración beta positiva, que

raramente sucede y consiste en la emisión de un positrón, dando lugar directamente al ^{40}Ar estable.

Existen radionúclidos que forman parte de una serie o cadena de desintegración radioactiva. Las series de desintegración radioactiva son secuencias de transformaciones nucleares en las que un radionúclido inestable se desintegra sucesivamente hasta alcanzar un núcleo estable. Estas series están compuestas por una cadena de núcleos progenitores e hijos, donde cada etapa implica la emisión de partículas alfa, beta y, acompañados de emisión de radiación gamma, como resultado de reordenamientos energéticos del núcleo.

En la naturaleza existen tres principales series de desintegración, asociadas a radionúclidos primordiales de larga vida media: la serie del uranio-238 (^{238}U) la serie del torio-232 (^{232}Th) y la serie del uranio-235 (^{235}U). Cada una de estas cadenas está compuesta por múltiples radionúclidos intermedios que, a través de procesos sucesivos de decaimiento, culminan en núcleos estables de plomo: ^{206}Pb , ^{208}Pb y ^{207}Pb , respectivamente. La figura 1.8, representa a la serie de desintegración del ^{238}U , donde se identifica las desintegraciones alfa, beta y gamma que se llevan a cabo hasta alcanzar al ^{206}Pb , este último se caracteriza como núclido estable.

Figura 1.8. Serie de Desintegración del ^{238}U .



Fuente: (PNUMA, 2016)

1.3. Radiación electromagnética y espectro

La radiación electromagnética se encuentra antes de la formación de nuestro planeta, por ejemplo, el sol, es la estrella más cercana a nosotros y tiene aproximadamente 4.6 mil millones de años, forma parte de la evolución de la vida en la Tierra con su radiación electromagnética actuando en el proceso de fotosíntesis de las plantas, ciclo del agua y formación de los demás recursos energéticos. Actualmente, por medio del astro experimentamos calor al exponernos durante el día. Las auroras boreales y australes en el Polo Norte y Sur, respectivamente, producidos por medio de la radiación solar al interactuar con moléculas de la atmosfera. Otro fenómeno, es el color azul del cielo se origina por la interacción de la radiación solar con moléculas más finas que conforma el gas

atmosférico y, la generación de la energía eléctrica por la interacción de la radiación solar con los paneles solares, por nombrar algunos.

1.3.1. Radiación

Las radiaciones están presentes en nuestra vida cotidiana, aunque, no se pueden ver, tocar y oler, se pueden identificar en base a los efectos que producen al interactuar con diferentes materiales, por ejemplo, la radiación del sol interactúa con las partículas y moléculas de la materia logrando moverlos internamente de tal forma que interactúan entre ellas y esto a su vez, genera calor. Otro claro ejemplo es, personas expuestas al sol, su efecto se aprecia por los termorreceptores de la piel después de pocos minutos. Al estar mucho tiempo expuesto, en cambio sus efectos son visibles, como eritema solar (quemaduras). Una de las aplicaciones más importantes de la radiación electromagnética en el ámbito de la salud es el radiodiagnóstico, en el cual se emplean equipos emisores de rayos X para la obtención de imágenes del interior del cuerpo humano en las conocidas placas radiográficas, aquí una parte de los rayos x es absorbida por nuestro cuerpo y otra atraviesa hasta llegar a las placas interactuando con los cristales fotosensibles. Este proceso da lugar a la formación de imágenes para diagnosticar heridas dentro del cuerpo.

1.3.2. Radiación electromagnética

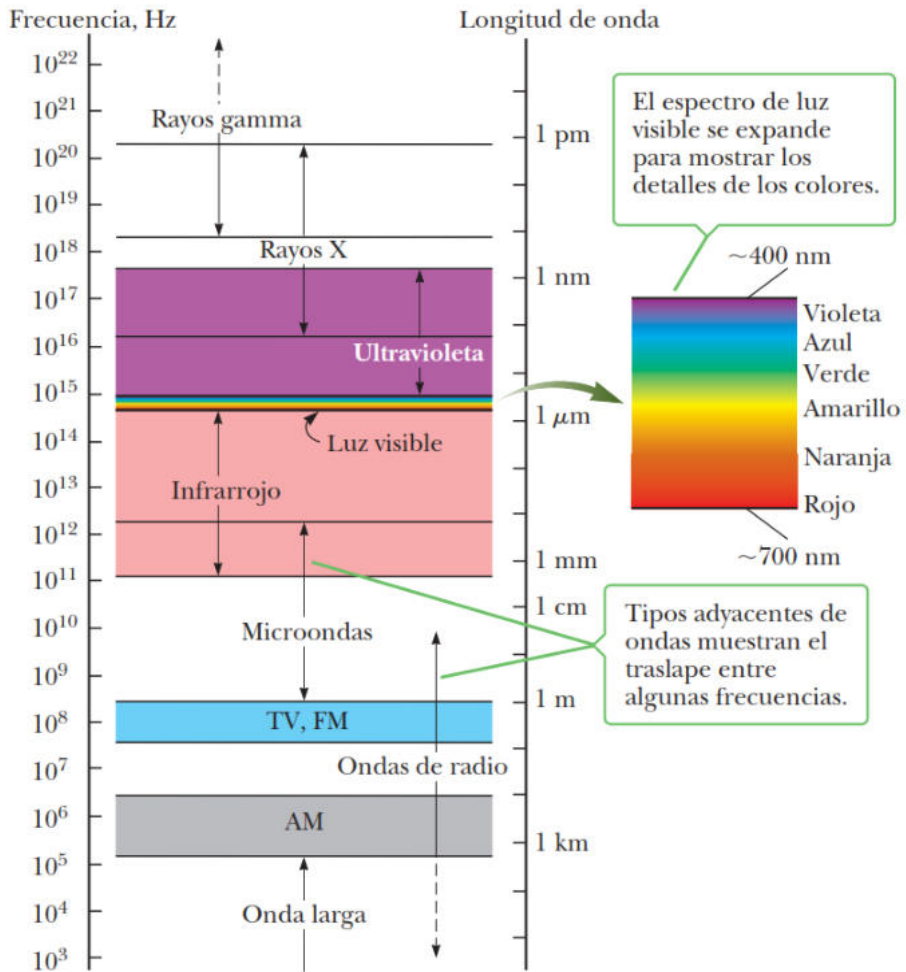
La radiación electromagnética es una forma de energía que se propaga en el espacio en forma de ondas compuestas por campos eléctricos y magnéticos perpendiculares entre sí y a la dirección de

propagación. Esta radiación no requiere un medio material para transmitirse y se desplaza a la velocidad de la luz en el vacío. Un ejemplo latente, es la radiación solar que recibimos está constituida por radiación infrarrojo (IR), UV visible (UV-VIS) y parte de la radiación ultravioleta (UV), además, del sol recibimos los rayos x (RX) y radiación gamma (RG), pero en pocas cantidades y, todos los mencionados son tipos de radiación electromagnética. Para familiarizarnos más con la radiación electromagnética, vamos a hablar acerca del espectro electromagnético.

1.3.3. Espectro electromagnético

El espectro electromagnético es el conjunto continuo de todas las radiaciones electromagnéticas ordenadas según su longitud de onda, frecuencia o energía. Para identificar los tipos de radiación electromagnética se presenta la siguiente figura 1.9 donde el espectro electromagnético está clasificado según su longitud de onda y frecuencia.

Figura 1.9. Espectro Electromagnético.



Fuente: (Serway & Vuille, 2012).

El espectro se divide en segmentos de acuerdo con un rango de longitud de onda (λ) y de la frecuencia (ν), por ejemplo, las ondas de radio se encuentran en el rango de 1 m a 10 km de longitud de onda y frecuencia de 1 Giga hertz (GHz) a 10 Mega hertz (MHz), de hecho, como se observa en la figura 1.9 es la que mayor longitud de onda (distancia entre crestas de la onda) y menor frecuencia

(número de oscilaciones que se producen en un segundo) posee. A partir de la izquierda a derecha la longitud de onda disminuye y el número de oscilaciones de las ondas electromagnéticas aumenta y, en consecuencia, aumenta la energía (E) que esta posee. Este comportamiento se puede explicar de mejor manera con la siguiente relación de ecuaciones.

$$E = h c / \lambda \quad (1)$$

$$c = \lambda \nu \quad (2)$$

Donde, c , es la velocidad de la luz, $\sim 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

Y, h , la constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

La ecuación de energía es una ecuación lineal que describe, a menor longitud de onda, mayor energía.

En el caso de las ondas de microondas tiene mayor frecuencia que las ondas de radio, seguida de la IR, UV-VIS y UV. Esta última, se clasifica en UV-A, UV-B y UV-C, así mismo, de acuerdo con su longitud de onda y frecuencia, siendo la radiación UV-C con menor longitud de onda que varía de 100-280 nm y es donde existe el punto de inflexión para que la radiación electromagnética se clasifique en radiación no ionizante y radiación ionizante, ya que a partir de energías superiores a 10 electronvoltios (eV) que corresponde a una longitud de onda de aproximadamente 124 nm, este tipo de radiación puede remover electrones de un átomo neutro. Si bien, es cierto la radiación no ionizante únicamente entrega su energía al átomo, de tal manera de mover los electrones dentro de las orbitas o

niveles de energía generando excitación, por el contrario, la interacción de la radiación ionizante va más allá de generar excitación, genera ionización, proceso que libera electrones del átomo.

El espectro electromagnético finaliza con los RX y RG, se conocen como radiación ionizante por poseer cantidad suficiente de energía para desprender electrones de los átomos, por tanto, su frecuencia es mayor cumpliéndose la proporcionalidad al remplazar la ecuación (2) y (1), quedando:

$$E = h\nu \quad (4)$$

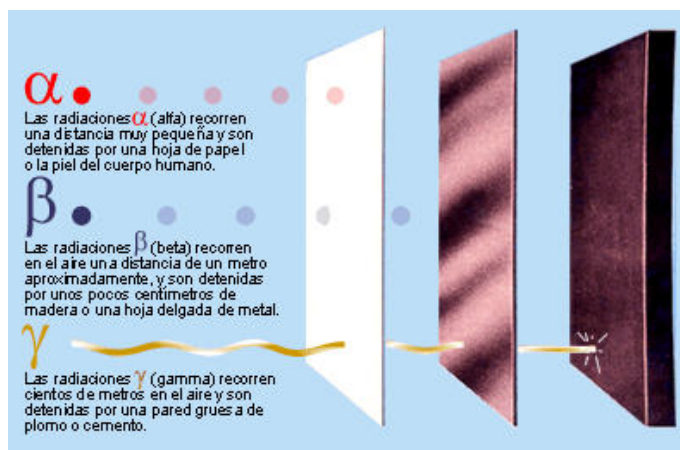
La energía es proporcional a la frecuencia o viceversa, la ecuación 4 se puede describir en otras palabras, a mayor frecuencia, mayor energía. Como se puede observar en el espectro, los RG tienen una longitud de onda menor que el tamaño de un átomo típico, que es 1 angstrom ($\text{\AA}=1 \times 10^{-10} \text{ m}$). Por tanto, este tipo de radiación interactúa a nivel atómico y nuclear.

En el grupo de radiaciones con energía ionizante también se encuentran los rayos cósmicos, los cuales están constituidos principalmente por partículas como protones, electrones y núcleos pesados (incluyendo partículas alfa). Es importante identificar que la radiación electromagnética de alta energía (rayos gamma y rayos x) y los neutrones no producen ionización directa, pero interactúan con la materia mediante procesos que forman partículas secundarias cargadas o reacciones nucleares, las cuales son responsables de la ionización efectiva en el medio.

1.4. Tipos de radiación ionizante

Como se mencionó anteriormente, la radiación ionizante posee suficiente energía para remover electrones de los átomos o moléculas, produciendo ionización en la materia. Desde el enfoque de la Física de las Radiaciones, esta radiación se clasifica en dos grandes categorías: radiación directamente ionizante, constituida por partículas cargadas como las partículas alfa y beta, que interactúan de manera continua con el medio a través de colisiones eléctricas (ver figura 1.10); y radiación indirectamente ionizante, como los neutrones, rayos x y radiación gamma que no tienen carga eléctrica, las cuales generan ionización mediante la producción de partículas secundarias cargadas.

Figura 1.10. Tipos de radiación ionizante.



Fuente: (Foro Nuclear, 2022).

1.4.1. Radiación directamente ionizante

Las partículas alfa son equivalentes a los núcleos de helio (${}^4_2\text{He}$). Así simplemente no se puede definir como radiación ionizante, es necesario un factor externo que le permita dotar de energías superiores a 10 eV. En la naturaleza ocurren fenómenos a nivel nuclear como se había mencionado anteriormente, como la radiactividad de los elementos, que consiste en transmutar de un elemento a otros elementos estables o no mediante la emisión de partículas alfa con energías que van de 4 a 10 mega electronvoltios (MeV), dependiendo del tipo de radioisótopo.

La desventaja de este tipo de partícula y para bien de la exposición externa de la población, por su pesada masa tiene un corto alcance en el aire, rápidamente interactúa con las moléculas del aire cediendo su energía o puede ser frenada con una hoja de papel, en consecuencia, no existe riesgo alguno, a excepción, si la fuente se incorpora en nuestro organismo por medio de inhalación como es el caso del radón que es un emisor de partículas alfa o ingestión de alimentos con sustancias con alto contenido radioactivo como son las nueces de Brasil con concentraciones altas de radio (Diehl, 2003).

Las partículas beta, se clasifican en beta negativo que son equivalentes a los electrones orbitales de los núcleos y beta positivos que sería la antimateria del electrón. Las partículas beta negativo y positivo de origen nuclear, tienen velocidades que pueden alcanzar hasta valores cerca de la velocidad de la luz (3.8×10^8 m/s). Aunque su energía es menor que las partículas alfa (en su mayoría no

alcanzan los 4 MeV) pero tienen un mayor alcance en el aire debido a sus velocidades obligan a tratar la radiación beta en forma relativista. El material que atenúa este tipo de radiación es una fina lamina de aluminio. Es el tipo de radiación es de mayor presencia en cualquier reacción nuclear e interacción de la radiación con la materia.

1.4.2. Radiación indirectamente ionizante

La radiación gamma provenientes del núcleo alcanza hasta 2 MeV de energía, al ser ondas electromagnéticas se transmite en el espacio, por tanto, posee mayor alcance en el aire que la radiación beta y alfa. La radiación gamma como se mencionado anteriormente se genera por la inestabilidad del núcleo después de emitir una partículas alfa o beta. En cambio, los RX se producen en los orbitales cuando existe una transición electrónica, es decir, cuando los electrones orbitales transitan de un nivel de energía a otros niveles de energía y la diferencia energética es expulsada como RX con longitud de onda característicos para cada radioisótopo (se conoce como RX característicos). La otra forma, es al pasar electrones con alta energía cerca del núcleo y por efecto de la interacción de las fuerzas de Coulomb con los protones del núcleo, el flujo de electrones es frenado y desviado, durante este proceso, el electrón pierde energía en forma de radiación electromagnética generando RX (se define como RX de frenado o *Bremsstrahlung*).

Mencionado el origen de radiación electromagnética de alta energía en el núcleo y ya conocida clasificación como indirectamente ionizante.

Su interacción con la materia mediante los tres procesos como el efecto fotoeléctrico, la dispersión Compton y la producción de pares, siempre generará electrones secundarios cargados. Estos electrones al desplazarse en el medio son los que producen la ionización. Debido a su alta energía y gran capacidad de penetración, la radiación gamma es de gran importancia en protección radiológica, así como en aplicaciones médicas e industriales.

Los neutrones son partículas subatómicas sin carga eléctrica que, debido a esta característica, presentan una alta capacidad de penetración en la materia. A diferencia de las partículas cargadas, no producen ionización directa; en cambio, interactúan mediante colisiones nucleares con los núcleos de los átomos. Estas interacciones pueden ser de tipo elástico, donde el neutrón transfiere parte de su energía cinética al núcleo, o inelástico, en cuyo caso el núcleo queda en estado excitado y posteriormente emite radiación gamma. Además, los neutrones pueden ser capturados por los núcleos, dando lugar a reacciones de captura neutrónica que generan radionúclidos y radiación secundaria. Como resultado de estos procesos, se producen partículas cargadas o fotones que son los responsables finales de la ionización en el medio. Por ello, los neutrones se clasifican como radiación indirectamente ionizante y tienen una gran relevancia en protección radiológica, reactores nucleares y estudios de radiación natural y cosmogénica.

1.5. Interacción de la radiación con la materia

En la naturaleza se han observado cinco tipos de interacciones de la radiación electromagnética de alta energía con la materia. El efecto

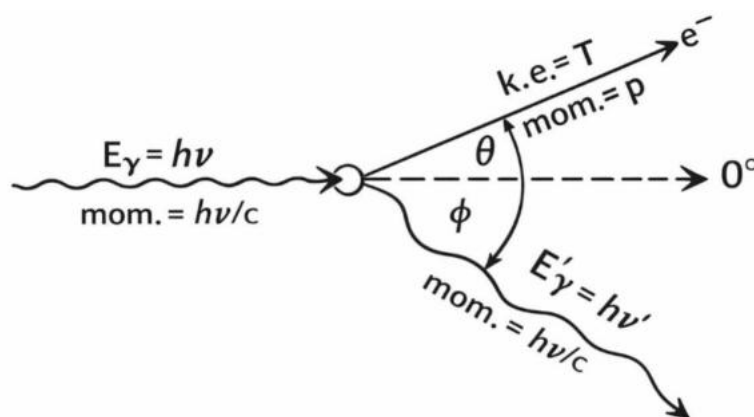
Compton y Fotoeléctrico, producción de pares, dispersión Rayleigh y la interacción fotonuclear. Para entender el funcionamiento de los equipos detectores y fines del presente libro se describe la cinemática de las tres primeras interacciones

1.5.1. Efecto Compton

En la figura 1.11 un fotón de energía $E = h\nu$ incide sobre un electrón débilmente ligado al átomo (capas externas del núcleo) y es expulsado con un ángulo θ respecto a la dirección del fotón incidente y con energía cinética T . El fotón al no ceder toda la energía al electrón es dispersado en un ángulo ϕ en el lado opuesto a la dirección original con energía $E' = h\nu'$. Mencionada interacción está basada en la conservación de la energía y momento, donde la conservación de la energía cumple:

$$T = h\nu - h\nu'$$

Figura 1.11. Efecto Compton.

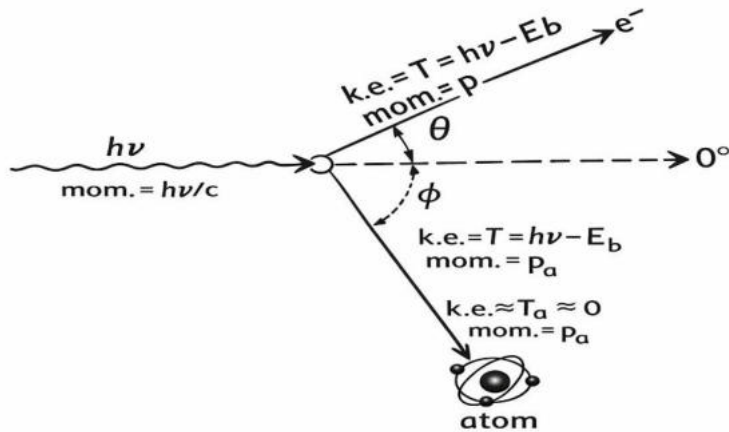


Fuente: (Attix, 1986)

1.5.2. Efecto fotoeléctrico

A diferencia del caso anterior, en la interacción el fotón cede toda su energía $E = h\nu$ a un electrón fuertemente ligado al átomo (capas internas del núcleo) con energía de ligadura (E_b). En la figura 1.12 se observa la energía cinética T del electrón después de la colisión que se aleja con un ángulo θ respecto a la dirección del fotón incidente. El efecto fotoeléctrico es más importante para fotones de baja energía y especialmente se da en átomos con un número atómico elevado.

Figura 1.12. Efecto Fotoeléctrico.



Fuente: (Attix, 1986).

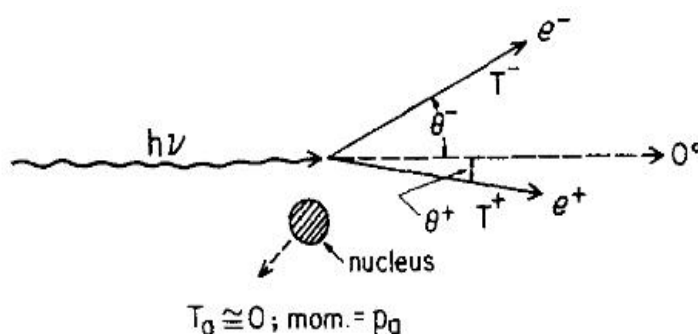
1.5.3. Producción de pares

La producción de pares es un proceso de absorción donde un fotón desaparece en regiones cercanas al núcleo y da como resultado la emisión de un electrón y positrón. En la figura 1.13 se ilustra el proceso

en el campo nuclear donde el fotón incidente da toda su energía $E = h\nu$ en la creación del par electrón-positrón con energía cinética T^- y T^+ . La ecuación de la conservación de la energía ignorando la energía cinética infinitesimalmente pequeña que se le da al núcleo es:

$$E = 2m_0c^2 + T^- + T^+$$

Figura 1.13. Producción de pares



Fuente: (Attix, 1986).

1.6. *Magnitudes radiológicas*

Las magnitudes radiológicas son la base cuantitativa para describir, medir y evaluar los efectos de la radiación ionizante sobre los seres vivos. Su implementación ha permitido establecer criterios internacionales de protección radiológica, así como procedimientos estandarizados para el monitoreo ambiental, ocupacional y médico de las radiaciones. Debido a que la radiación ionizante interactúa continuamente con los tejidos biológicos, resulta indispensable disponer de magnitudes físicas capaces de representar fenómenos como la energía depositada, la exposición y el riesgo biológico asociado. En el Sistema Internacional de Unidades (SI) están las

unidades el gray (Gy) para la dosis absorbida y el sievert (Sv) para la dosis equivalente y efectiva. La comprensión adecuada de las magnitudes y unidades radiológicas es fundamental en campos como la medicina nuclear, radioterapia, protección radiológica, geología, monitoreo ambiental y estudios de radiación natural. En el contexto de la radiación ionizante natural, estas magnitudes permiten evaluar los niveles de exposición provenientes de radionucleidos presentes en el suelo, rocas, materiales de construcción, agua y atmósfera, contribuyendo así al análisis de riesgos y al establecimiento de medidas de seguridad para la población.

1.6.1. Exposición

Primero es importante conocer definiciones como la Transferencia Lineal de Energía (LET, en sus siglas en inglés), es la cantidad de energía depositada de la radiación ionizante a un material por unidad de longitud. El término “exposición externa” significa la radiación que interactúa con nosotros desde fuera de nuestro cuerpo y, en cambio, la “exposición interna” es la radiación que se encuentra dentro de nuestro organismo interactuando con nuestros órganos y tejidos.

La LET de las partículas alfa es alta, por ende, tiene menor alcance en el aire en comparación a las partículas beta y radiación gamma, representa un riesgo alto a la exposición interna al ingresar una fuente dentro de nuestro organismo. En cambio, la radiación gamma por su bajo LET tiene mayor alcance en el aire que las partículas alfa

y beta, por tanto, el material radioactivo en el suelo o mineral genera un campo de radiación electromagnética en la interfaz suelo-aire, consecuentemente, una exposición externa al público (Belyaeva et al., 2021).

Dicha exposición es definida por la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) como la carga total de iones de un mismo signo producidos cuando los electrones y positrones liberados o creados por la radiación gamma incidentes en una masa de aire seco son completamente frenados en el aire, en otras palabras, es la ionización indirecta producida en el aire por la radiación gamma, su unidad es Coulomb por kilogramo (C/kg) o en Roentgen ($R = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$),

Bajo la Condición de Equilibrio Electrónico (CEE), la exposición puede ser convertido a dosis absorbida (D_a) en el aire, este último es la cantidad de energía impartida por la radiación ionizante por unidad de masa de un material, medido en Gray (Gy) que equivale a un julio por kilogramo (J/kg) de material. Considerando, W_{aire} , como la energía promedio necesaria para formar un par iónico en el aire seco es casi constante para todas las energías de electrones y tiene un valor de 33.97 eV/par iónico y, e es la carga del electrón que es de $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$, entonces;

$$\frac{W_{aire}}{e} (5)$$

La ecuación (5), es energía promedio requerida por unidad de carga de ionización producida, por tanto, la expresión de la exposición puede escribirse como:

$$X(R) = \frac{D_{aire}}{W_{aire}} e = D_{aire} \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{33,97 \text{ eV}} = D_{aire} \frac{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}}{33,97 * 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}$$

La ecuación anterior resulta

$$X(R) * 2.58 \times 10^{-4} \frac{\text{C/kg}}{\text{R}} * 33,97 \frac{\text{J}}{\text{C}} = D_{aire}$$

$$D_{aire} = 8.76 \times 10^{-3} \frac{\text{J/kg}}{\text{R}} * X(R) \quad (6)$$

Así, podemos deducir que la dosis absorbida es directamente proporcional a la exposición en un factor $\frac{D_{aire}}{e}$, y como se mencionó antes, este factor es aproximadamente constante para los electrones en el aire.

CAPÍTULO II

Radiación ionizante natural

En la formación de la Tierra hace 4.5 mil millones de años, la gravedad junto con los elementos radioactivos jugó un rol importante en compactar y fundir el núcleo del planeta. La radiación alfa y beta, pero principalmente la radiación gamma emitido por el decaimiento radioactivo de los elementos inestables es una de las fuentes internas de calor de la Tierra. Además, estos tres tipos de radiación natural son encontrados en la superficie por la presencia del uranio (U), torio (Th) y potasio (K) en minerales que ascendieron por fenómenos de meteorización, este último, es un proceso de fragmentación de la roca en contacto con la atmosfera, hidrosfera y la biosfera. Por lo descrito anteriormente, se puede concluir que nuestro planeta, y los seres vivos se han desarrollado en un medioambiente radioactivo, el cual anteriormente tenía niveles más altos de radiación que los encontrados actualmente, donde nuestro planeta primitivo se encontraba en proceso de la formación del gas atmosférico, por tanto, existía fácil penetración de rayos cósmicos a la superficie terrestre, a esto se suma la mayor actividad volcánica tiende a alterar los niveles de radiación de fondo. La radiación ionizante natural es conocido como radiación de fondo o *background* y ha sido cuantificada en diferentes partes de mundo confirmando que es inevitable y que dependen de factores como la altitud, latitud, geografía, actividades naturales y antropogénicas, etc.

2.1. Radiación ionizante natural

La radiación ionizante natural es una forma de energía presente de manera continua en el ambiente. Esta radiación forma parte del entorno habitual del ser humano y contribuye de manera significativa a la dosis de exposición anual, variando según factores geológicos y altitud. Los seres humanos hemos vivimos expuestos a la radiación ionizante proveniente del espacio exterior como es la radiación cósmica y la radiación terrestre originada por los radionúclidos en el suelo. El Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) ha evaluado durante décadas estudios radiométricos a nivel mundial y mostrando los promedios mundiales a los niveles de exposición externa e interna a la radiación ionizante natural en unidad de “mSv/año”, magnitud física asociada a la tasa de dosis de radiación recibida por una persona durante un año. Dicha magnitud dosimétrica se denomina dosis efectiva anual y se usa para evaluar su posible impacto en la salud humana

Tabla 2.1. Fuentes de Exposición a la Radiación Ionizante Natural.

Fuentes de exposición		Dosis efectiva anual (mSv)	
		Promedio	Rango típico
Radiación cósmica	Componente directamente ionizante y fotónica	0,28	
	Componente neutrón	0,1	
	Radionucleidos cosmogénicos	0,01	
	Cósmica y cosmogénicos total	0,39	0,3-1,0
Radiación terrestre externa	Lugares abiertos (<i>Outdoors</i>)	0,07	
	Lugares cerrados (<i>Indoors</i>)	0,41	
	Radiación terrestre externa total	0,48	0,3-0,6
Inhalación	Series de ^{238}U y ^{232}Th	0,006	
	Radón (^{222}Rn)	1,15	
	Torón (^{220}Rn)	0,1	
	Inhalación total	1,26	0,2-10
Ingestión	^{40}K	0,17	
	Series de ^{238}U y ^{232}Th	0,12	
	Exposición ingestión total	0,29	0,2-0,8
Total		2,4	1,0-13

Fuente: (UNSCEAR, 2000).

En la tabla 2.1 se aprecia que la contribución de la radiación cósmica es aproximadamente 0.39 mSv durante un año, y la contribución a la radiación terrestre es mayor, siendo de 0,48 mSv. Aquí ambas

contribuciones aportan a la exposición externa. La exposición interna por ingestión de material radioactivo es el que menor contribuye con un 0,29mSv al año, y por inhalación de material radioactivo es un factor importante para considerar, en especial, al radón que contribuye más del 50% a la exposición por radiación natural que es de 2.4 mSv al año.

A continuación, se describe cada una de las fuentes de radiación ionizante natural, de que factores depende los niveles de radiación, recopilación de algunos estudios a nivel mundial e identificación de lugares con altos niveles de radiación

2.2. Radiación Cósmica

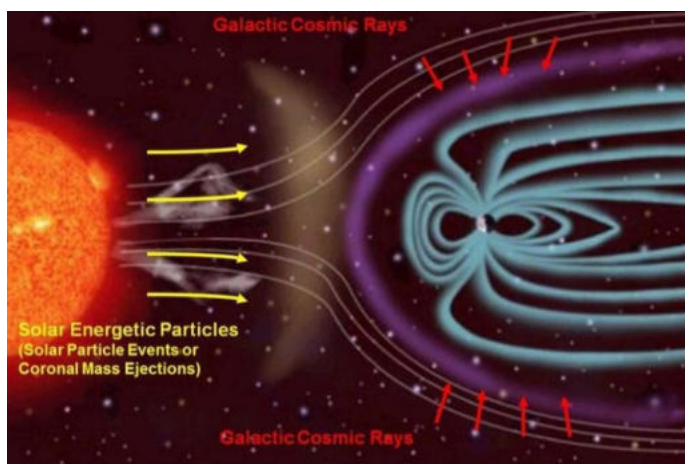
La Teoría del Big Bang es una de las teorías más aceptada por la comunidad científica con respecto al origen y la expansión del Universo es un hecho real y forma parte de la cosmología moderna, respaldado por las observaciones del alejamiento de estrellas, realizadas por Edwin Hubble en 1920, la observación de la abundancia de elementos ligeros en el Universo por Cecilia Payne en 1925 y el descubrimiento de la radiación de fondo por Arno Penzias y Robert Woodrow Wilson en 1965. Se sabe que las partículas cargadas están presentes después de la explosión del Big Bang, los primeros núcleos son los de hidrógeno (protones), después los núcleos de helio acelerados, el cual se formó por la fusión de dos protones y dos neutrones (partículas α), así también, además, están los electrones (partículas e^-) que viajaban por el espacio hasta

adherirse a los núcleos primordiales del Universo tal como el hidrógeno y helio.

El planeta Tierra está constantemente bombardeado por rayos cósmicos provenientes del espacio exterior; los rayos cósmicos generados del sol son denominado como Rayos Cósmicos Solares (RCS) y están constituidos por 98% de protones y 2% de partículas alfa, por otro lado, están los Rayos Cósmicos Galácticos (RCG) provenientes fuera del sistema solar y están constituido por el ~87% de protones, ~11% de partículas alfa y ~1% de núcleos de número atómico entre 4 y 26) y solo el 1% de electrones (Ramachandran, 2011; UNSCEAR, 2000).

En general, los RCS y los RCG son partículas cargadas que son atenuadas en la atmosfera disminuyendo el flujo directo de los rayos cósmicos que llegan a la superficie de la Tierra (UNSCEAR, 2008), por tanto, depende de la altitud, existiendo mayor flujo en zonas montañosas donde existe menor capa atmosférica que cerca del nivel del mar, donde la capa atmosférica actúa como blindaje, en consecuencia, solo existe el 10% de contribución de rayos cósmicos a la exposición externa del total (UNSCEAR, 2008). También el campo magnético de la Tierra es un factor importante que considerar cuando hablamos de rayos cósmicos. Los rayos cósmicos al ser partículas cargadas son desviados por el campo magnético hacia los polos, por tanto, existe mayor flujo de rayos cósmicos en latitudes mayores que en la región ecuatorial (ver figura 2.1).

Figura 2.1. Interacción de los rayos cósmicos en el campo magnético de la Tierra.



Fuente: (NASA, 2013)

Al interactuar las partículas cósmicas de alta energía con los gases y las partículas de las capas altas de la atmosfera se origina la espalación, un proceso en el cual al interactuar las partículas cósmicas con los núcleos se divide en varios núcleos más ligeros (protón, neutrón y muon), produciendo una variedad de radioisótopos cosmogénicos como el ^3H , ^7Be , ^{10}Be , ^{14}C ^{22}Na , entre otros (Lariviere & Guérin, 2010). Además, comúnmente la generación de una cascada de partículas secundarias, en efecto interactúan con otros núcleos produciendo adicionalmente núclidos cosmogénicos por la captura de neutrones o captura de muones lentos cerca de la superficie de la Tierra.

Tabla 2.2 Procesos nucleares liderados en la producción de radionucleidos cosmogénicos.

Modo de producción	Reacción típica nuclear	Notación compacta
Espalación	${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_1\text{p} \rightarrow {}^{26}_{14}\text{Si} + 2({}^1_0\text{n})$ $\rightarrow {}^{26}_{13}\text{Al}$ $+ {}^0_1\beta^+$	${}^{27}\text{Al}(\text{p},2\text{n}){}^{26}\text{Si}(\beta^+){}^{26}\text{Al}$
Captura de neutrón	${}^{14}_7\text{N} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{15}_7\text{N}^*$ $\rightarrow {}^{14}_6\text{C} + {}^1_1\text{p}$	${}^{14}\text{N}(\text{n},\text{p}){}^{14}\text{C}$
Captura de muon	${}^{40}_{20}\text{Ca} + {}^0_{-1}\mu \rightarrow {}^{40}_{19}\text{K}^* + {}^0_0\nu_\mu$ $\rightarrow {}^{36}_{17}\text{Cl} + {}^4_2\alpha$	${}^{40}\text{Ca}(\mu^-, \alpha){}^{36}\text{Cl}$

Fuente: (Lariviere & Guérin, 2010)

En la tabla 2.2 se puede observar que los neutrones se originan en el proceso de espalación, al interactuar la radiación cósmica primaria con átomos de la atmosfera, después forman parte de las demás interacciones creando una lluvia de partículas subatómicas o a su vez pueden llegar a la superficie si no interaccionan con nadie. Un claro ejemplo es al incidir un protón en el átomo de Aluminio-27 (${}^{27}\text{Al}$) se transforma a Silicio-26 (${}^{26}\text{Si}$) con la emisión de dos neutrones, posterior, el 26Si sufre un decaimiento beta positivo transformándose finalmente a ${}^{26}\text{Al}$. Por otro lado, está la captura del neutrón en átomos de Nitrogeno-14 (${}^{14}\text{Ni}$) dando como resultado el ${}^{15}\text{Ni}$ metaestable que decae en ${}^{14}\text{C}$ acompañado de la emisión de un protón. Finalmente, el ejemplo del proceso de captura del muon consiste en un muon es atrapado por un átomo de ${}^{40}\text{Ca}$, se transmuta

en ^{40}K meta estable, y posterior se convierte en un átomo de ^{36}Cl y se emite una partícula alfa.

2.2.1. Exposición a los rayos cósmicos

Son pocas las partículas cargadas con altísima energía que alcanzan la superficie terrestre, por ejemplo, a nivel del mar los muones predominan con energías de 1 hasta 20 *Gigaelectronvolts* (GeV) (Durante & Manti, 2008), por lo demás, son partículas cargadas secundarias que se originan en la atmosfera por la reacción en cadena o la denominada cascada cósmica. La tasa de dosis media para el componente ionizante (partículas cargadas) y fotones es aproximadamente 0.28 mSv (Ver Tabla 2.1).

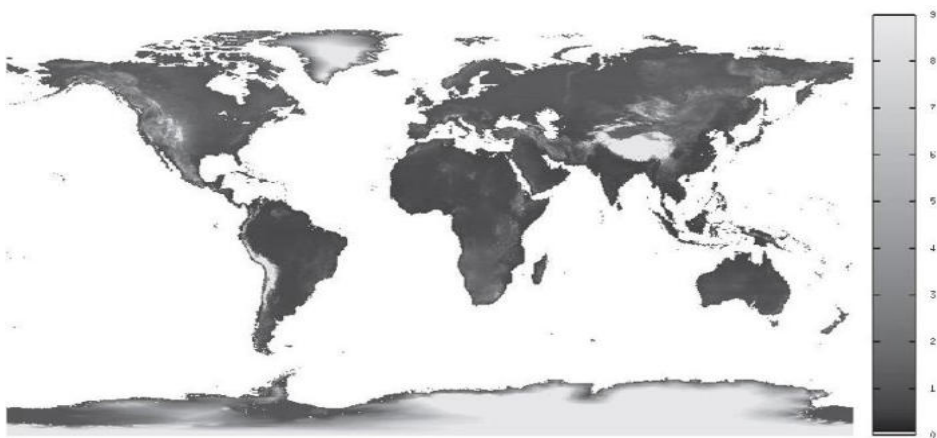
El UNSCEAR estima que la dosis efectiva anual equivalente a los rayos cósmicos a nivel del mar del componente ionizante es 0.24 mSv. Un componente adicional de la exposición a los rayos cósmicos proviene de los neutrones y su dosis efectiva anual equivalente al nivel del mar se estima es 0.2 mSv, menos del 10% del componente ionizante. Sin embargo, la dosis de neutrones aumenta más rápidamente con la altitud, y es el componente dominante de las exposiciones por encima de los 6 km de altitud (IAEA, 1993). A una latitud magnética de 50° , la dosis de neutrones cósmicos a 12500 msnm es aproximadamente 20 mSv/año, mientras que a nivel del suelo y a la misma latitud magnética, la dosis de neutrones de rayos cósmicos es de aproximadamente 0.063 mSv/año (Shahbazi-Gahrouei et al., 2013).

Las formas de los espectros de energía de neutrones en el suelo para diferentes altitudes y latitudes geomagnéticas son similares y

generalmente tienen tres picos anchos prominentes. Hay un pico de alrededor de 100 MeV causado por la producción de neutrones en la cascada cósmica, un pico de alrededor de 1 MeV causado por el proceso de evaporación y un pico en la región de energía térmica debido a la termalización de neutrones a través de la atmósfera y la retrodispersión desde la tierra (Nakamura, 2008).

Dirk et al., 2003, determinó el flujo de neutrones térmicos ambientales a nivel del mar están en el rango de 1 a 4 $\text{n}/\text{cm}^2\text{h}$. El autor Bertou, 2014, estableció un mapa global del flujo de neutrones relativos a nivel del mar promediado al Ecuador, donde el flujo de neutrones al igual que el flujo de rayos cósmicos energéticos incidentes dependen de la altitud y la latitud geomagnética del lugar. El resultado en la Figura 2.2, muestra el flujo de neutrones aumenta desde 0 $\text{n}/\text{cm}^2\text{h}$, en el polo sur, hasta 9 $\text{n}/\text{cm}^2\text{h}$ en el polo norte, con un rango de 4-5 $\text{n}/\text{cm}^2\text{h}$ en la región ecuatorial.

Figura 2.2. Flujo de neutrones relativo a nivel del mar promediado al Ecuador.



Fuente: (Bertou, 2014).

Los rayos cósmicos contribuyen aproximadamente un tercio de los niveles de radiación natural a la que estamos expuestos externamente en un año. Los resultados de exposición de radiación de fondo se interpretan en término de “dosis efectiva anual” como habíamos mencionado y que en ciertos casos incluye la suma de la dosis interna y externa y, comúnmente reportada en milisieverts al año (mSv/a).

La tasa de dosis absorbida en aire es la principal cantidad usada para caracterizar el campo de exposición externa debido a fuentes naturales y es medida en nanograys por hora (nGy/h). El UNSCEAR describe el factor de conversión aplicado a la dosis absorbida en aire para transformar en dosis efectiva para adultos no es la misma para infantes, niños y adultos. Siendo 0.7 Sv/Gy para adultos y el más utilizado para reportar los resultados de estudios radiométricos. Otros parámetros como el tiempo en horas durante el año (8760) se debe considerar para transformar de dosis absorbida a dosis efectiva

Como mencionamos anteriormente, a medida que aumenta la altura aumenta el flujo de rayos cósmicos, por tanto, incrementa la dosis absorbida. En la Tabla 2.3 se muestra la tasa de dosis aproximadamente se duplica con el aumento de 1524 msnm (Patterson & Thomas, 1972).

Tabla 2.3. Intensidades del rayo cósmico en varias altitudes.

Altitud (msnm)	Dosis absorbida de rayos cósmicos (μGy/h)
Nivel del mar	0.040
304.8	0.047
609.8	0.054
914.4	0.062
1219.2	0.071
1524	0.081
1828.8	0.091
2438.4	0.117
3048	0.146
3657.6	0.180
4267.2	0.210

Fuente: (Patterson & Thomas, 1972).

La mayoría de la población mundial vive en altitudes cercanas al nivel del mar, sin embargo, hay grandes ciudades ubicadas en mesetas elevadas donde las exposiciones a los rayos cósmicos son mucho más altas (Tabla 2.4), por ejemplo en La Paz, Bolivia (6.3 veces más), Quito, Ecuador (3.5 veces más), Ciudad de México (2.6 veces más), Denver, Colorado (1.8 veces mayor), y Teherán, Irán (1.5 veces mayor) (IAEA, 1993).

Tabla 2.4. Dosis efectiva anual de rayos cósmicos.

Ciudad	Altitud (m)	Dosis efectiva anual (mSv/a)
La Paz, Bolivia	3900	1.64
Lhasa, China	3600	1.4
Quito, Ecuador	2840	0.93
México City, México	2240	0.68
Nairobi, Kenia	1660	0.49
Denver, USA	1610	0.48
Teherán, Irán	1180	0.28
Ciudades a nivel del mar.	0	0.26

Fuente: (IAEA, 1993)

De la Tabla 2.4 se encuentra que la población de Quito recibe una dosis de 0.930 mSv/ año por exposición a la radiación cósmica, siendo 3.5 veces mayor a la radiación que recibe la población a nivel del mar.

El UNSCEAR es una entidad internacional que evalúa y reporta mediante la recopilación, análisis y publicación de datos sobre la exposición a la radiación ionizante en todo el mundo. En el documento titulado Fuentes y Efectos de la Radiación Ionizante: Informe 2008, Volumen I, Anexo B, presenta una ecuación para estimar la tasa de dosis de rayos cósmicos a elevaciones sobre el nivel del mar publicado por Bouville y Lowder:

$$\dot{E}_1(z) = \dot{E}_1(0)[0.21e^{-1.649z} + 0.79e^{-0.4528z}] \quad (7)$$

Donde, $\dot{E}_1(0)$ es la tasa de dosis a nivel del mar y z , es la altitud en kilómetros (km).

Esta ecuación se utiliza para poder realizar una estimación de la dosis efectiva por radiación cósmica únicamente conociendo la altitud del lugar, dado que la tasa de dosis a nivel es similar en todas partes del mundo.

2.3. Radiación terrestre

La radiación terrestre es la radiación gamma emitido por los radioisótopos presentes en el suelo y sus niveles tienden a variar principalmente con la geología y geografía. Los radionucleidos naturales en el suelo, en efecto son las series de decaimiento y los radionucleidos primordiales que se encuentran en la corteza terrestre desde el origen del Planeta. Con respecto a las series de desintegración el ^{237}Np ya no existe en la actualidad y el ^{235}U utilizado como combustible fisionable solo tiene alrededor del 0,72 % de todo el uranio natural, en cambio, el isótopo ^{238}U , que es padre de la cadena de desintegración forma parte del 99,2 % del uranio. Por otro lado, está el ^{232}Th , también padre de una cadena de desintegración que constituye el 99,9% del torio. También se encuentra el ^{40}K en el ambiente como parte de los principales radionucleidos primordiales, y la presencia de los radionucleidos cosmogénicos ^3H , ^7Be , ^{14}C y ^{22}Na depositados en el suelo es insignificante (Lariviere & Guérin, 2010). Por lo tanto, la radiación terrestre es cuantificada principalmente por la radiación gamma emitida por ^{40}K y las series de ^{238}U , ^{232}Th .

Como se dijo anteriormente, su distribución depende principalmente de las condiciones geológicas y geografías de cada región, además,

los procesos eruptivos, donde material piroclástico puede alterar las concentraciones de radionucleidos en el suelo. A continuación, en la tabla 2.5, se presenta la radioactividad de rocas volcánicas.

Tabla 2.5. Concentración de actividad de radionucleidos en rocas volcánicas.

Rocas volcánicas	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Fuente
Rocas ígneas	166.80	134.40	1782.00	(Belyaeva et al., 2021)
Toba volcánica	234	306	1855	(Capaccioni et al., 2012)
Lava	394	487	2443	
Todas las rocas	7-60	7-60	70-1400	
Flujo de lava obsidiana	220	212	1593	(Lanzo et al., 2010)
Pómez	204	213	1474	
Lava	193	191	1561	
Toba de ceniza	132	116	1364	

Fuente: Elaboración propia.

También pueden alterar su distribución en el ambiente la acción humana en procedimientos que transforman los recursos naturales que contienen materiales radiactivos de origen natural (NORM) y los transforman en materiales radioactivos naturales tecnológicamente mejorados (TENORM), por ejemplo, las actividades extractivas como la industria petrolera y minera. Como evidencias se tiene la provincia Gauteng ubicado al Sur de África a 70 km oeste de Johannesburg, existe la cuenca minera de U y Au más grande del mundo, Witwatersrand. Se ha estimado que 600000

toneladas de U son contenidos en los relaves mineros de oro (Winde, F., 2010) y las personas cerca de este sitio están expuestos externamente a niveles de radiación gamma más altos que en otros lugares sin actividad extractiva y, a la exposición interna por ingestión, inhalación y absorción de metales radioactivos por la piel. El uranio es extraído para producir combustible nuclear y ser utilizadas en bombas atómicas, centrales térmicas nucleares y en aeronaves por generar grandes cantidades de energía a partir de reacciones nucleares

El uranio y sus productos de decaimiento, incluyendo el ^{226}Ra se han acumulado en los sedimentos, suelo, polvo, inclusive en el agua de esta región. El contenido radioactivo en relaves mineros ha sido estimados y reportados: 785.3, 43.9 y 427 Bq/kg para el ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente (Kamunda et al., 2016), mismos sobrepasan los límites de seguridad recomendado. El ^{238}U y sus productos hijos son emisores de partículas alfa y beta, causan daño a los tejidos, por ejemplo, la ingestión de uranio conduce a la destrucción de los riñones, afecta el sistema neurológico que causa ceguera, parálisis y pérdida de coordinación, causa aberraciones cromosómicas en los espermatozoides y provoca enfermedades de la sangre y otros tejidos conectivos, cambio en el sistema inmune y sistemas endocrinos y prevalencia de enfermedades malignas, incluyendo el cáncer.

Tabla 2.6. Concentraciones de radionucleidos en minerías de oro.

Área	²²⁶ Ra (Bq/kg)	²³² Th (Bq/kg)	⁴⁰ K (Bq/kg)	Muestra	Geología	Fuente
Guatemala	785.3	43.9	427	Relave	Cuarcita, piedras de hierro, tillitas, lutitas y lava marina	(Kamunda et al., 2016)
Ghana	65.1 ± 2.2	71.8 ± 2.2	1168.3	Soil, rock and ore	Sedimento y granito	(Faanu et al., 2016)
Ghana (Tongo)	34 ± 7-110 ± 9	81 ± 20 – 880 ± 57	950 ± 23 – 3100 ± 40	Rock and ore	Formación granítica y metamórficas: granito, granodiorita y gneis	(Doyi et al., 2013)
Nigeria (Kano)	62.73	90.66	411.27	Soil		Bello, et al., 2019
Armenia (Kapan)	36.1 ± 16.3	21.8 ± 10.2	318.9 ± 163.9	Soil	Basalto, andesita, piedra caliza, dolomita y pizarra de arcilla. Rocas subatómicas	(Belyaeva et al., 2019)

Fuente: Elaboración propia.

La mayoría de los países europeos disponen de mapas radiométricos a nivel nacional, tal es el caso de España, mediante el proyecto MARNA. La realización de numerosos estudios radiométricos durante varios años permiten estimar la exposición a la radiación natural y generar mapas radiométricos. Se conoce que la Comisión Europea trabaja desde varios años en el Atlas de Radioactividad Natural, por lo tanto, en esta última década se registran extensos estudios radiométricos. Por otro lado, en países como Irán, India, Arabia Saudita y Turquía también han implementado estas evaluaciones de radiactividad natural a pesar de que el UNSCEAR tiene recopilado valores promedios de diferentes países del mundo. Irán es otro ejemplo de estudios a gran escala, se analizaron 979 muestras de suelo localizadas en todas las provincias del país, únicamente el valor promedio de ^{40}K sobrepasa ligeramente el promedio mundial de 400 Bq/kg (Kardan et al., 2017), A continuación, en la tabla 2.7, presentamos concentración de radionucleidos en diferentes partes del mundo.

Tabla 2.7. Concentraciones de radionucleidos (^{40}K y las series de ^{238}U , ^{232}Th) en diferentes partes del mundo.

País	^{238}U (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)	Referencia
India	24.3	25.8	457.7	(Kardan et al., 2017)
Arabia Saudita				(Ibraheem et al., 2018)
Turquía, Rize	85.75±11.77	51.08±9.42	771.57±65	Dizman, Görür and Keser, 2016)
Kuwait	18	15	385	(Alazemi et al., 2016)
India, Punjab	21±9.3	55.5±11.6	443±88.9	(Saini & Bajwa, 2017)
Promedio mundial	35	35	400	(UNSCEAR, 2000).

Fuente: Elaboración propia.

2.3.1. Exposición a la radiación terrestre

De acuerdo con la Tabla 2.1, dos fuentes principales contribuyen a la exposición por radiación terrestre; La radiación gamma emitida por los radioisótopos naturales (^{40}K y serie del ^{238}U , ^{232}Th) en el suelo que aportan a la exposición externa en lugares abiertos (0,7 mSv/a) y, a la exposición externa en lugares cerrados (0,41 mSv/a) por la presencia de la radiación gamma proveniente del suelo como como de los materiales de construcción. La magnitud física que representa la concentración radioactiva en el suelo o en materiales de construcción es la actividad específica cuya unidad es Bq/kg. La actividad específica promedio para

la cadena del ^{238}U en el suelo es de 35 Bq/kg; para la cadena del ^{238}Th es de 30 Bq/kg y para el ^{40}K es de 400 Bq/kg (UNSCEAR, 2000). Últimamente, la espectrometría gamma está siendo más empleada para identificar y determinar la radioactividad de ^{40}K , ^{137}Cs y los productos de desintegración de las series de ^{238}U , ^{232}Th . A partir de la actividad específica (A_e) del ^{238}U / ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en el suelo, se calcula la tasa de dosis absorbida en lugares abiertos para la radiación gamma terrestre en unidades de nano Gray por hora (nGy/h) (Saini & Bajwa, 2017) y por consiguiente, la dosis efectiva anual.

La tasa dosis absorbida en aire (D_{as}), es una cantidad clave utilizada para cuantificar la exposición externa generada por la radiación gamma encontrada a un metro sobre el suelo y se calcula por la siguiente ecuación establecida por el UNSCEAR.

$$D_{as} = 0,462 * A_{e226Ra} + 0,604 * A_{e238Th} + 0,0417 * A_{e40K} \quad (6)$$

La dosis efectiva anual (DE) medido en mSv/a, considera el factor de conversión de dosis absorbida en aire a dosis efectiva, los factores de ocupación y el tiempo de exposición. Desde hace más de tres décadas el UNSCEAR emplea el factor de conversión de 0,7 Sv/Gy para adultos, el tiempo de exposición durante un año (8760 h) y el factor ocupacional de 0,2 y 0,8 como fracción del tiempo en lugares abiertos y cerrados, respectivamente.

$$DE_{outdoor} = D_{as} \frac{nGy}{h} * 0,7 \frac{Sv}{Gy} * 0,2 * 8760 \frac{h}{a} \quad (7)$$

y

$$DE_{indoor} = Da_s \frac{nGy}{h} * 0,7 \frac{Sv}{Gy} * 0,8 * 8760 \frac{h}{a} (8)$$

A nivel mundial se han identificado las principales áreas con niveles altos de radiación natural, por ejemplo, Ramsar y Mahallat tienen concentraciones de ^{226}Ra de 26.5 kBq/kg y 7.3 kBq/kg en el suelo, respectivamente, radionucleido que ha sido llevados a la superficie por el agua de fuentes termales. Estos son lugares que tienen niveles altos de radiación ionizante natural y se los conoce como (HBNRAs) por sus siglas en inglés (*High Background Natural Radiation Areas*). A continuación, se presenta en la Tabla 2.8, valores de la dosis efectiva a la que están expuestas las personas que viven en HBNRAs (Aliyu & Ramli, 2015)

Tabla 2.8. Dosis efectiva en áreas con niveles altos de radiación natural HBNRAs.

NBNRAs	Dosis efectiva (mSv/a) (rango)	País
Guarapari	5.5	Brasil
Playa de Areia Preta	70	
Poços de Caldas	13 (6-16)	
Kerala	0.5-15	India
Playa Erasama Orissa State	2.36 (0.78-3.86)	
Yangjiang	3.5	China
Ramsar	260	Irán
Mahllat	132	

Fuente: (Aliyu & Ramli, 2015).

2.4. Radón

El radón es un gas noble, cuya característica no permite reacciones químicas con otras sustancias. El radioisótopo ^{222}Rn se origina por la desintegración del ^{226}Ra , este último, a su vez es generado por la desintegración de la cadena del ^{238}U (ver Fig. 1.8). El periodo de semidesintegración del ^{226}Ra es 1602 años, esto conlleva ser una fuente permanente de ^{222}Rn que tiene un periodo de semidesintegración es 3.8 días, cualidad que le permite escaparse de suelos y rocas hacia la superficie y concentrarse en lugares cerrados ej, viviendas, cuevas o en minas. El radón y sus productos de desintegración son emisores alfa, estos últimos, son los responsables de la exposición interna humana debido que son partículas cargadas que son atraídos por las partículas del aire y de tal forma se depositan en el pulmón al inhalar.

2.4.1. Exposición a radón

La exposición interna más importante a nivel de protección radiológica es la inhalación del gas radón (^{222}Rn) y sus productos de decaimiento. El gas es emanado del suelo, puede entrar y concentrarse en lugares cerrados por el tiempo de semidesintegración, siendo mucho mayor que el tiempo de semidesintegración del torón ^{220}Rn que proviene de la cadena de desintegración del ^{232}Th , de tan solo 55 segundos. Por esta razón, el ^{222}Rn aporta con una dosis efectiva anual de 1,2 mSv/año que representa la mitad al promedio mundial de exposición a fuentes naturales, Su concentración alta en lugares cerrados es considerada de interés radiológico.

Los materiales de construcción extraídos del suelo generan exposición interna por la difusión y acumulación de ^{222}Rn y ^{220}Rn en viviendas que luego es inhalado por las personas. Como el caso anterior, el ^{222}Rn es el mayor contribuyente a la exposición interna, salvo casos excepcionales cuando el material de construcción contiene altas concentraciones de ^{232}Th , justo ahí el ^{220}Rn es una fuente importante. La concentración de radón en viviendas contribuye más del 47,92 % de la exposición de radiación natural de fondo por inhalación. (UNSCEAR, 2008).

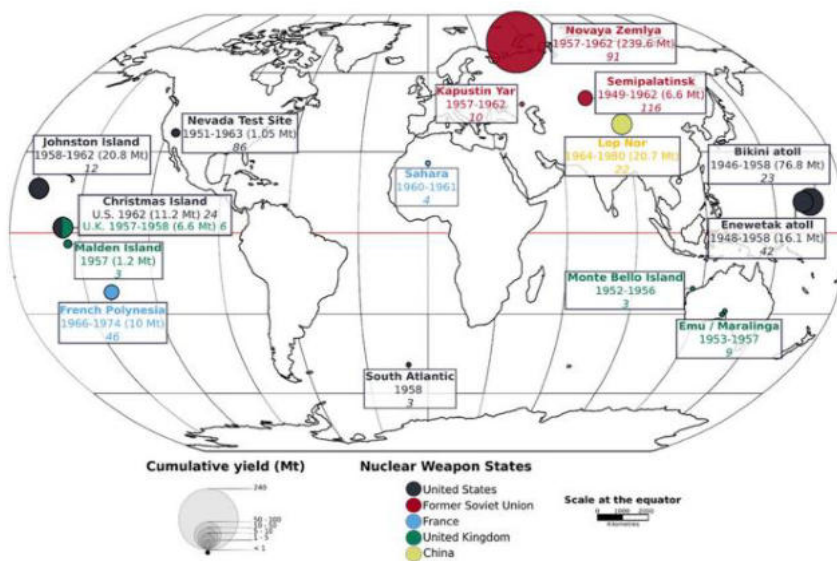
2.5. Ingestión total

Los radionucleidos primordiales y los productos de las series de desintegración encontrados en el suelo y, los radionucleidos cosmogénicos depositados en la superficie, ingresan en la cadena alimenticia, por tanto, ingresan a nuestro cuerpo. La concentración de ^{40}K y algunos radionucleidos cosmogénicos en alimentos y en el cuerpo es uniformemente distribuida en todo el mundo. Mientras las series de desintegración de ^{238}U y ^{232}Th tienden a variar porque dependen de las condiciones geológicas locales. El cuerpo humano de un adulto (70 kg) contiene cerca de 13 kg de carbón con 3000 Bq de ^{14}C , 50 kg de agua con 20 Bq de ^3H y 140 g de potasio con 4300 Bq de ^{40}K . Con respecto a los productos de las series de desintegración en el cuerpo, su concentración promedia es muy baja, menor al 1Bq. A nivel mundial existen alimentos conocidos por su alta concentración radioactiva, uno de ellos, es la nuez de Brasil; contiene 50, 25 y 40 Bq/kg de ^{226}Ra , ^{228}Ra y ^{228}Th , respectivamente (Diehl, 2003).

También los radionucleidos artificiales depositados en el suelo, producto de la lluvia radiactiva global ingresan como cualquier contaminante en la cadena alimenticia. Encontrándose contaminación radioactiva considerablemente mayor en el hemisferio norte que en el hemisferio sur, donde se produjo el mayor número de explosiones nucleares.

La concentración de radionucleidos artificiales es mayor en zonas donde se produjo contaminación radioactiva antropogénica como: explosión de bombas atómicas, ensayos de armas y accidentes nucleares (Mietelski, 2010), además, por causa de la lluvia radiactiva global se puede encontrar radionucleidos artificiales en casi todo el mundo (P. A. Chaboche et al., 2021)

Figura 2.3. Pruebas nucleares atmosféricas alrededor del mundo.



Fuente: (P.-A. Chaboche et al., 2022).

2.6. Materiales de construcción

La radioactividad de los materiales de construcción extraído del suelo es otra fuente de radiación ionizante, debido al tiempo de vida media extremadamente grande que tienen los radionucleidos naturales que lo conforman (^{40}K , ^{238}U y ^{238}Th), es similar a la edad de la Tierra. Por tanto, su radioactividad está y estará en todas partes de la Tierra y su distribución en el ambiente dependerá de las diferentes concentraciones encontradas en la geografía y formación geológica (El et al., 2018). Por lo general, se han descubierto que rocas ígneas tal como el granito tiene altos niveles de radioactividad debido a la alta concentración de radioisótopos de potasio, uranio y torio que las encontradas en rocas sedimentarias, a excepción de rocas fosfóricas y algunas pizarras que contienen relativamente alta radioactividad. Los promedios de actividad específica en materiales de construcción son de 50 Bq/kg para la cadena del ^{238}U ; 50 Bq/kg para la cadena del ^{238}Th y 500 Bq/kg para el ^{40}K (UNSCEAR, 1993).

Al hablar de materiales de construcción, países europeos consideran el término “materiales”, aquellos que son producidos y vendidos, pero todavía no tienen propiedades o formas como productos finales, por ejemplo, el cemento y agregados del hormigón y, el término “productos de construcción”, son los que tienen una geometría y propiedades definida como el hormigón, ladrillo y las tejas (COST, 2017).

Existe ecuaciones reportadas por la comisión europea que permiten evaluar la exposición frente a los materiales de construcción. La dosis absorbida en aire proveniente de la radiación gamma y emitida por los

radionucleidos naturales en los materiales de construcción empleados en la edificación es:

$$Da_{mcg} = 0,92 * A_{e226Ra} + 1,1 * A_{e238Th} + 0,08 * A_{e40K} \quad (9)$$

Por otro lado, la dosis absorbida de radiación en aire de radiación gamma emitida por los radionucleidos naturales de los materiales de construcción que son empleados en las edificaciones en forma superficiales y restringidas es:

$$Da_{mcs} = 0,12 * A_{e226Ra} + 0,14 * A_{e238Th} + 0,0096 * A_{e40K} \quad (10)$$

Para hallar la dosis efectiva en ambos casos se utiliza la ecuación (8) establecida por el UNSCEAR para la exposición externa *indoor*.

La exposición de los trabajadores a la radiación durante las actividades mineras y tratamiento de las materias primas, el IAEA establece un sistema de protección en base a tres requisitos principales: la justificación de las practicas basándose en el costo-beneficio al individuo o en la sociedad, optimización de la protección y seguridad reduciendo la exposición al valor más bajo razonablemente posible y límites de dosis de radiación a los individuos se aplican tanto a la exposición externa como interna (Pucha, 2025). El límite de dosis ocupacional se basa en la dosis efectiva total equivalente (cuerpo entero) o simplemente dosis efectiva anual; El límite es 20 mSv/a de promedio en un periodo de 5 años.

La exposición externa por radiación beta es insignificante en comparación a la radiación gamma en la mayoría de las zonas mineras, por lo que es apropiado medir la exposición externa con un detector de

centelleo, cámara de ionización o un contador Geiger debidamente calibrados con regularidad y ser trazables a patrones nacionales reconocidos. En la actividad minera se deben llevar a cabo exploraciones exhaustivas sobre la radiación gamma externa en zonas de trabajo, instalaciones de tratamiento y zonas de gestión de desechos. Los valores pueden llegar a unas decenas de $\mu\text{Sv/h}$ y aumentan de acuerdo con los minerales de alta calidad (Pucha, 2025). Los dosímetros personales deberán ser empleados para una evaluación individual, siendo los termoluminiscentes o los estimulados ópticamente adecuados para soportar condiciones ambientales particulares (Pucha, 2025).

Las concesiones de materiales de construcción se caracterizan principalmente por desarrollarse mediante minería a cielo abierto. Entre las actividades de explotación más comunes se encuentran el destape del terreno con maquinaria pesada, como buldóceres, seguido del arranque y carguío del material generalmente mediante retroexcavadoras, para posteriormente ser transportado en camiones. En estas mismas concesiones es frecuente el empleo de trituradoras y tamices para el procesamiento del mineral previo a su comercialización. En la minería a cielo abierto, la exposición al radón normalmente no representa un riesgo radiológico significativo, salvo bajo determinadas condiciones atmosféricas que favorezcan su acumulación. Sin embargo, en operaciones de minería subterránea, el International Atomic Energy Agency recomienda la realización de mediciones de radón, debido a que la exposición ocupacional a este gas radioactivo puede constituir un motivo de preocupación por su acumulación en espacios confinados,

quedando dichas situaciones sujetas a los requisitos establecidos para las exposiciones existentes (Pucha, 2025).

En este tipo de instalaciones, donde durante la extracción y el procesamiento del mineral pueden generarse elevadas concentraciones de polvo en suspensión, el International Atomic Energy Agency recomienda establecer límites de control sobre la concentración de partículas en el aire, con el propósito de proteger a los trabajadores frente a riesgos no radiológicos asociados principalmente a la inhalación de sílice. De manera adicional, esta medida contribuye a reducir la inhalación de radionucleidos naturales que pueden encontrarse adheridos al material particulado presente en el polvo.

El European Atomic Energy Community, mediante la Council Directive 2013/59/EURATOM, establece normas básicas de seguridad para la protección frente a los riesgos derivados de la exposición a radiaciones ionizantes en Europa. En este contexto, se fija un nivel de referencia de exposición gamma externa indoor de 1 mSv/año atribuible a los materiales de construcción, adicional a la exposición gamma natural outdoor (COST, 2017).. Bajo este criterio, la concentración de ^{226}Ra en los materiales de construcción debe mantenerse en niveles que no favorezcan concentraciones de radón superiores a 200 Bq/m^3 , valor recomendado por la Comisión Europea.

2.6.1. Índices de riesgo

EURATOM (Council of the European Union, 2014) propone que la exposición o dosis a los miembros del público deben mantenerse lo más bajo posible, por consiguiente, la Directiva de EURATOM adoptó a

finales del siglo pasado una guía para evaluar la radioactividad de materiales de construcción “Radiation Protection 112” (PR112), donde se ha establecido una herramienta de clasificación denominado Índice Gamma (I_γ), que permite diferenciar los materiales que requieren control para su mercantilización y manejo en la industria constructora de los países que conforman la Unión Europea, con el propósito de limitar la exposición pública debido a materiales enriquecidos de radionucleidos naturales que pueden elevar los niveles de radiación ionizante natural (Commission, 1999).

La Directiva 2013/59/EURATOM (2014) del Consejo define el índice gamma relativo a la dosis de radiación gamma que excede la exposición típica al aire libre (*outdoor*) en un edificio construido con un material de construcción específico (Pucha, 2025), mientras que este índice se aplica al material de construcción, no a sus componentes, excepto cuando estos componentes son materiales de construcción en sí mismos y se evalúan por separado como tales (Commission, 1999)..

El índice gamma consiste en indicar si la dosis efectiva anual por materiales de construcción supera el límite de referencia de 1 mSv/a establecido para la exposición externa *indoor*. Para determinar las concentraciones referenciales de los radionucleidos del ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K en el material de construcción, el índice gamma establecido por EURATOM considera ya la sustracción del promedio de radiación gamma externa en lugares abiertos (*outdoor*) de 50 nGy/h (promedio en Europa). El índice gamma se muestra en la siguiente ecuación empleando las concentraciones referenciales antes mencionadas:

$$I_{\gamma} = \frac{A^{226}Ra}{300 \text{ Bq/kg}} + \frac{A^{232}Th}{200 \text{ Bq/kg}} + \frac{A^{40}K}{3000 \text{ Bq/kg}} \quad (11)$$

Siendo, $A^{226}Ra$, $A^{232}Th$, $A^{40}K$ actividades específicas del ^{226}Ra , ^{232}Th y ^{40}K , respectivamente en el material de construcción.

Los criterios dosis para el control de la radioactividad de materiales de construcción son: La tasa de dosis excedente de 1 mSv/a deberán ser tomadas en cuenta desde el punto de vista de protección radiológica, recomiendan controles se rijan a dosis en el rango de 0,3 – 1 mSv/a y dosis menores a 0,3 mSv/a quedan exentos de toda restricción concernientes a su radioactividad. En la Tabla 2.9, se presenta los valores de I_{γ} para los dos tipos de materiales de construcción empleados en la edificación y que corresponden a la dosis tanto 0,3 mSv/a y 1 mSv/a.

Tabla 2.9. Criterios dosis para el control de la radioactividad de materiales de construcción.

Material de construcción	0,3 mSv/a	1 mSv/a
Materiales usados en grandes cantidades		
P. ej. concreto	$I_{\gamma} \leq 0,5$	$I_{\gamma} \leq 1$
Materiales superficiales o con uso restringido		
P. ej. cerámicas	$I_{\gamma} \leq 2$	$I_{\gamma} \leq 6$

Fuente: (Commission, 1999)

2.7. Material Radioactivo de Origen Natural (NORM)

La IAEA ha identificado las industrias que involucran NORM y son propensas a una exposición que no puede despreciarse desde el punto de vista de protección radiológica. Por nombrar algunas de ellas, están

la minería de uranio, torio y otros metales, la industria de producción de petróleo y gas, materiales de construcción, producción de fosfato, entre las más importantes. La IAEA ha planteado un mínimo de actividad específica, de 1×10^3 Bq/kg para las cadenas de ^{238}U y ^{238}Th y 1×10^4 Bq/kg para el ^{40}K , de tal forma de clasificar a los materiales NORM, si la radioactividad del material sobrepasa estos valores, entonces, el material es considerado como NORM acorde a los Estándares de Seguridad Básica de Unión Europea y de la IAEA (EU-and IAEA -BSS) (COST, 2017), y necesita ser tomado en cuenta por el órgano regulador.

La exposición a fuentes de radiación ionizante natural es regularmente considerada como una situación de exposición existente y, si lo amerita, deberá ser sujeta a requerimientos de intervención (IAEA, 2006). Algunas actividades humanas que dan lugar a exposición a fuentes ionizantes tienen características de prácticas y donde el enfoque de intervención puede ser inapropiado. Pero en otras actividades laborales que involucran situación de exposición planificadas a fuentes naturales son sujetas a requerimientos e intervención, entre ellas según el organismo internacional están:

- a) Producción y uso de fuentes de radiación que involucran radionucleidos de origen natural.
- b) La minería y procesamiento de mineral radioactivo como parte del ciclo de combustible nuclear.
- c) Cualquier otra actividad laboral que involucra exposición a fuentes naturales específicas por el órgano regulador como

requerimiento de control.

2.8. Minería

Las actividades mineras dan lugar a exposiciones a fuentes radiactivas naturales, que depende principalmente de la concentración de radionúclidos de origen natural. Las actividades mineras involucran procesos industriales que crean escenarios de exposición planificadas debido que contiene el material extraído contienen radionúclidos de origen natural y estos pueden ser depositados en la superficie y concentrados en el proceso de producción. La exposición planificada en los trabajadores por la concentración de NORM y, en situaciones el material es liberado al medio ambiente, por tanto, incrementa la exposición al público. En ambos casos, la concentración de NORM superiores a lo normal puede constituir un peligro para la salud a largo plazo.

2.9. Industria del petróleo y gas

La industria petrolera y de gas involucra NORM y TENORM durante el proceso de extracción del crudo, cuando los fluidos extraídos de los reservorios subterráneos arrastran sulfatos a la superficie de la corteza terrestre (UNSCEAR 2017). Los sulfatos de bario, calcio y estroncio son compuestos grandes, y los átomos más pequeños, tales como ^{226}Ra y ^{228}Ra se pueden alojar en los espacios huecos del compuesto y ser transportados a través de los fluidos que se procesan y también en el agua de producción (agua que sube a la superficie con el petróleo).

Al aproximarse los fluidos a la superficie, los cambios en la temperatura y presión hacen que los sulfatos de bario, calcio, estroncio y radio se precipiten y formen un depósito en la pared interna, o a veces afuera de los entubamientos y/o recubrimientos de los pozos. El uso de tubos en el proceso de producción se contamina con NORM, generalmente, no representa un peligro para la salud si los depósitos están dentro de los tubos y los tubos permanecen dentro de la perforación o en la planta de la cual son parte.

Concentraciones elevadas de ^{226}Ra y ^{228}Ra y productos hijos tales como ^{210}Pb pueden estar presentes en los barros que se acumulan en los sumideros de los campos de petróleo, tanques y lagunas. El gas radón ^{222}Rn se concentra en los flujos de gas natural como NORM en las actividades de procesamiento de gas. Los elementos de decaimiento del radón se depositan formando una película en la superficie interna de la parte superior de las tuberías, unidades de tratamiento, tanques de almacenamiento o separación, bombas y válvulas utilizadas en los sistemas de procesamiento de propileno, etano y propano.

CAPÍTULO III

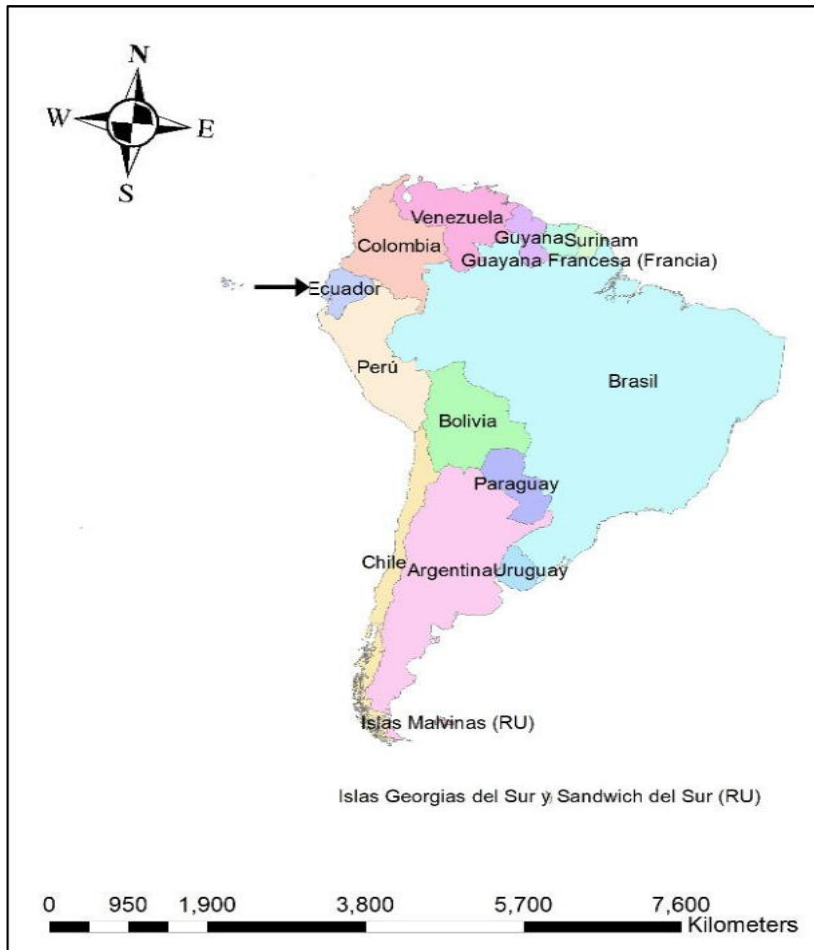
Entorno físico y natural del Ecuador

Ecuador es un país de contrastes naturales fascinantes, moldeado por su ubicación en el centro del mundo y la imponente presencia de los Andes. Nuestra geografía no es solo paisaje; es el resultado de un choque constante entre placas tectónicas que ha creado una tierra vibrante, llena de volcanes y fallas activas. Esta misma riqueza geológica es la que alberga los minerales y el petróleo que aprovechamos hoy. Por eso, si queremos entender la radiación natural de nuestro entorno, primero debemos comprender la tierra que pisamos: desde la composición de sus rocas hasta cómo la actividad volcánica y minera influyen en los niveles de energía que nos rodea.

3.1. Información geográfica de Ecuador

La Republica del Ecuador, está ubicada en la costa noroccidental de América del Sur, atravesada por la línea ecuatorial, entre las latitudes 01°30' N y 5°12' S y las longitudes 75° 20' W y 91° W (ver figura 3.1.).

Figura 3.1. Ubicación de Ecuador.

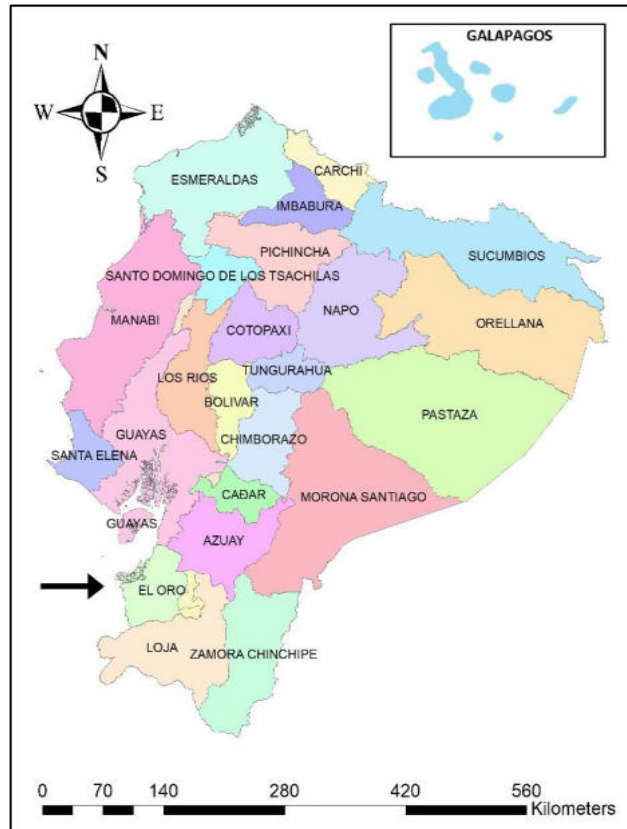


Fuente: Elaboración propia.

Ecuador tiene una extensión territorial de 255586.91 Km², conformado por 24 provincias (Figura 3.2). Por su ubicación geográfica, solo hay dos estaciones definidas: húmeda o invierno y seca o verano (Barros & Troncoso, 2010). El relieve, es un elemento importante del clima, por tal razón en Ecuador se encuentran variados tipos de clima a lo largo de su territorio, como son climas tropicales, subtropicales,

temperados, sub temperados y de páramo (Jørgensen & León-Yáñez, 1999).

Figura 3.2. División política de Ecuador.

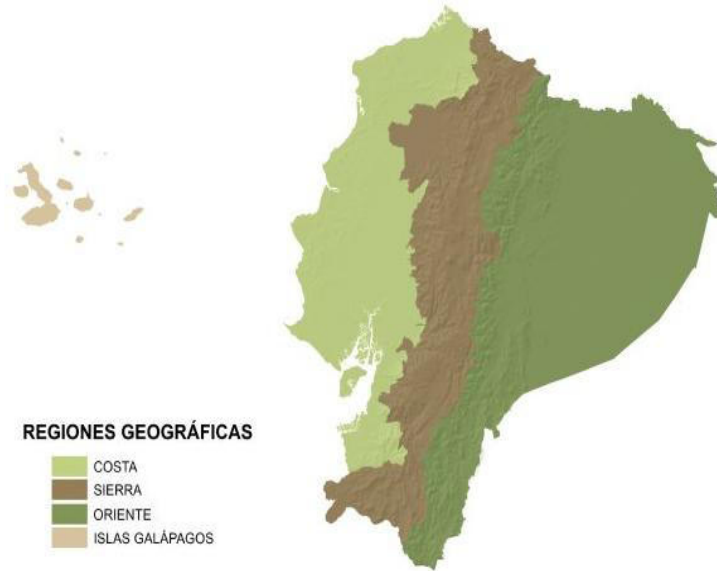


Fuente: Elaboración propia.

3.2. Regiones geográficas del Ecuador

El país está dividido por la cordillera de los Andes en tres regiones geográficas: Región Litoral o Costa, Región Interandina o Sierra y Región Oriental o Amazónica. A 600 millas de la costa esta la cuarta región denominada Archipiélago de Colón o Galápagos (Figura 3.3).

Figura 3.3. Regiones geográficas del Ecuador.



Fuente: Instituto Geográfico Militar.

La región Costa, se extiende desde el perfil costanero hasta unos 1000 m de elevación en las estribaciones occidentales de los Andes. Tiene una extensión de ~670 km de largo y ~150 km de ancho, desde el río Mataje al norte hasta el río Zarumilla al sur. Se conforma de llanuras bajas, cuencas sedimentarias, zonas de piedemonte y varias cordilleras costaneras de baja altura, que alcanzan elevaciones entre los 400 y 700 m de altura. (Barros & Troncoso, 2010), (Jørgensen & León-Yáñez, 1999).

La región Sierra, está dominada por la Cordillera de los Andes (ver figura 3.4), con una extensión de 800 km de longitud y 100-200 km de ancho aproximadamente, desde el río Carchi al norte y hasta el río Macará al sur (Barros & Troncoso, 2010). La cordillera Occidental es

de menor altura que la cordillera Oriental. Los Andes sur del Ecuador no se diferencian claramente entre cordilleras y sus elevaciones no sobrepasan los 4000 m de altura (Lynch & Duellman, 1980), (Duellman & Lynch, 2011) (Pourrut, 1983), (Lynch & Duellman, 1980).

La región Oriental o Amazónica, se extiende desde la cordillera de los Andes orientales al oeste hasta la frontera con Colombia y Perú al este, con un área de ~120.000 Km². Se divide en alta Amazonía (> 1000 m de altura) y llanura Amazónica (< 1000 m de altura).

La región insular es un archipiélago de 12 islas de origen volcánico, 17 islotes y decenas de rocas expuestas, con un área de ~8000 km² en total. Su principal elevación es el volcán Sierra Negra en la isla Isabela. Aun no se han reportado estudios radiométricos en el archipiélago de las Galápagos.

Sus principales elevaciones son el volcán Chimborazo (el más alto del país, con 6310 m) y el volcán Cotopaxi (segundo más alto, con 5897 m). (Jørgensen & León-Yáñez, 1999).

Figura 3.4. Mapa topográfico.

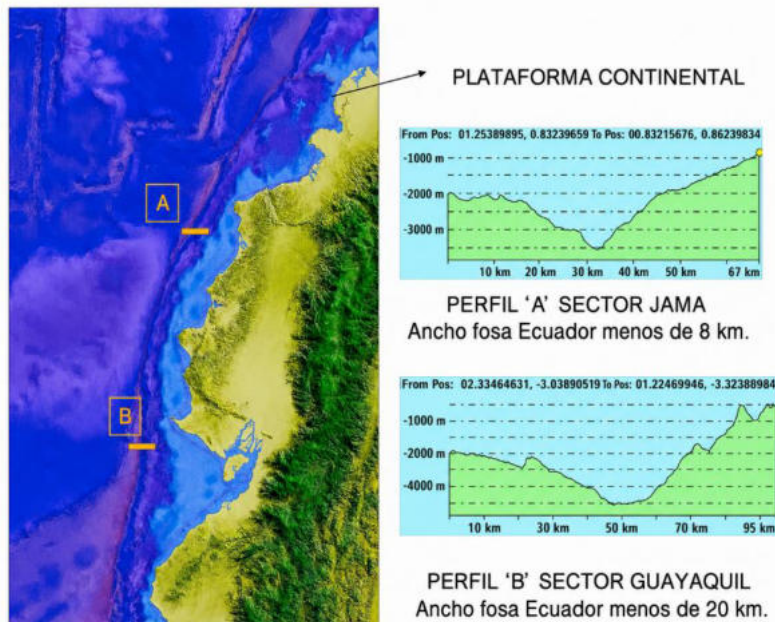


Fuente: Instituto Geográfico Militar.

3.3. Geología

El margen continental del Ecuador pertenece al tipo de márgenes continentales activos o de subducción. La plataforma continental del Ecuador posee una pendiente pronunciada, alcanzando profundidades sobre los 1.500 metros a pocas millas de distancia de la costa. El talud es más abrupto y termina en la fosa a 30-50 millas de la orilla (Figura. 3.5).

Figura 3.5. Fosa del Ecuador.



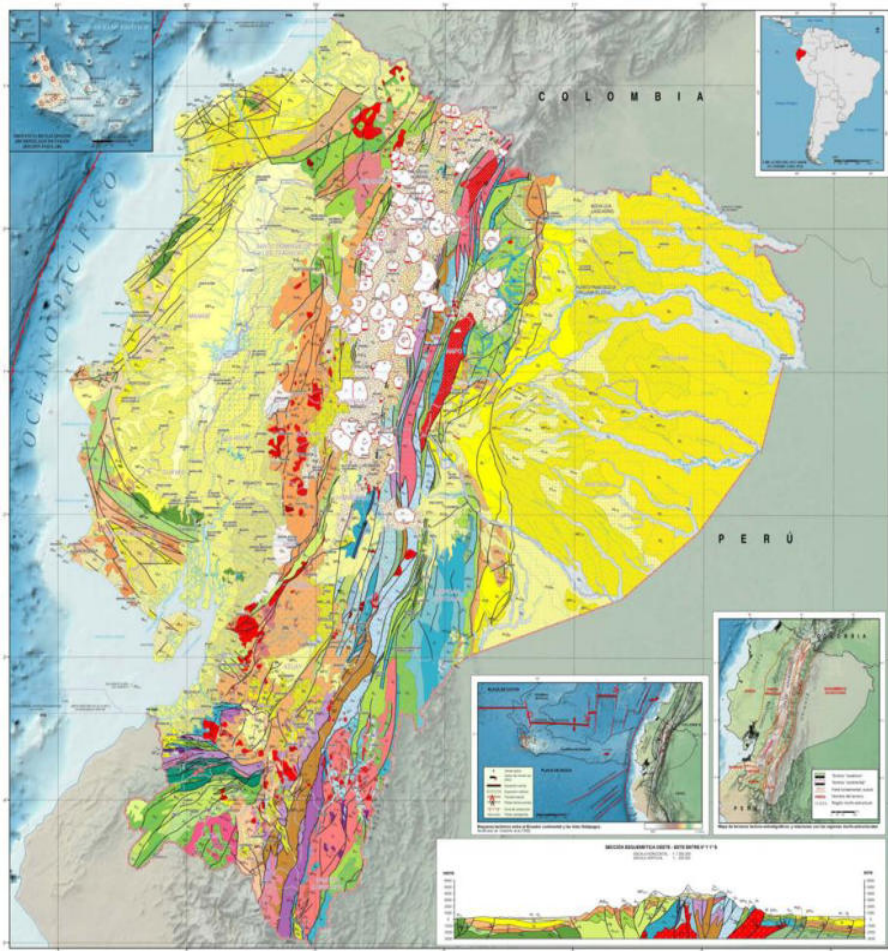
Fuente: (Collot et al., 2009).

El Golfo de Guayaquil se caracteriza por la acumulación de más de 4km de sedimento del Cuaternario y una serie de fallas producidas por la apertura del Golfo atribuido al desplazamiento a lo largo de la Megafalla Guayaquil-Dolores megashear (Megacizalla). Esta megafalla parte desde el Golfo de Guayaquil, corre a lo largo de la cordillera occidental de los Andes del Ecuador y de Colombia, y termina en el Caribe. Esta Megafalla es un desprendimiento del bloque norte andino que con movimiento dextral se desplaza hacia el norte a una tasa de $\sim 0.6\text{-}1$ cm/año (Nocquet et.al., 2009), calculando un movimiento medio en Ecuador de 0.87 cm/año en una dirección N35°E), habiendo ocasionado la apertura del Golfo de Guayaquil hace

aproximadamente 2 Ma. El desplazamiento en dirección NE del bloque norte de los Andes ocasiona que la Cordillera Carnegie se desplace hacia el sur (Collot et al., 2009).

El país posee un fuerte contraste geológico, con 163 unidades geológicas (ver figura 3.6.), además contiene rocas volcánicas, sub volcánicas, meta somáticas y rocas intrusivas, estas últimas con una gama de ejemplares como granito, granodiorita, tonalita, sienita, monzonita, diorita, cuarzodiorita y grabo (IIGE, 2017). Este tipo de rocas se distribuyen en el centro del país en las laderas oeste de la cordillera Occidental (Guaranda) y en las laderas este de la cordillera Oriental (Napo), también se encuentran de O-E en la zona sur del país, en una de las zonas históricas por la extracción de oro-cobre y depósitos polimetálicos.

Figura 3.6. Mapa Geológico del Ecuador.

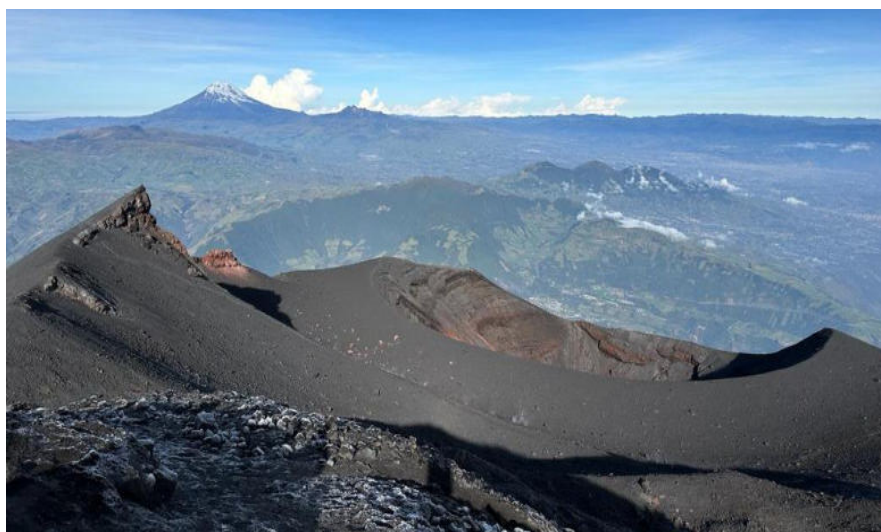


Fuente: (IIGE - Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2017).

Los Andes ecuatorianos contiene 84 edificios volcánicos originados por la subducción de la Placa Oceánica de Nazca debajo del continente sudamericano; principalmente estratovolcanes compuestos andesíticos a dacíticos ubicados en la Cordillera Occidental y estratovolcanes andesíticos en el Valle Interandino y Cordillera Oriental (Hall et al., 2008). El sótano de la Cordillera Occidental y la parte occidental del

Valle Interandino poseen terrenos oceánicos acrecidos (Jaillard et al, 2009), mientras que en el oriente se compone de rocas plutónicas y metamórficas paleozoico a mesozoico (Bablonetal, 2019). La subducción tanto la Placa de Nazca y la Carbegie Rige produjeron un desplazamiento a lo largo de la zona de falla de choque dextral madura, conocida como Sistema de Falla Chingal-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) (Baize et al., 2020) que atraviesa el país desde el Golfo de Guayaquil, cruza la Cordillera Occidental al Valle Interandino y llega a la Cordillera Oriental, finalmente recorre hacia el norte.

Figura 3.7. Cumbre del volcán Tungurahua.



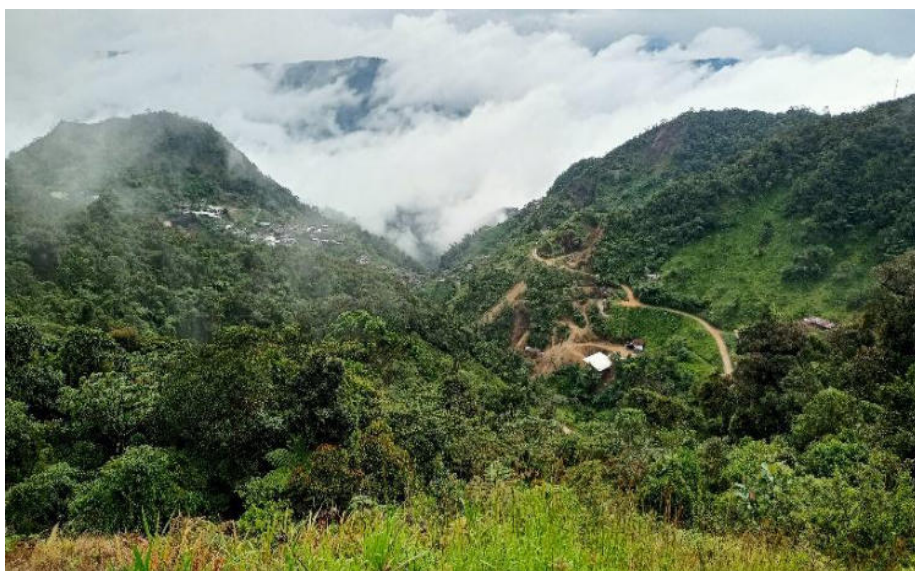
Fuente: Elaboración propia.

3.4. Minas

En la zona sur del Ecuador conformado por las provincias del Azuay, El Oro y Zamora Chinchipe, se encuentran localizadas los principales distritos mineros del país; Distrito Zaruma-Portovelo, Camilo Ponce

Enríquez, Nambija, entre otros. Las provincias en mención tienen un alto potencial minero de oro-cobre y la mayor parte de la producción proviene de operaciones mineras artesanales, por ejemplo, El Distrito Minero Nambija.

Figura 3.8. Distrito Minero Nambija.



Fuente: Elaboración propia.

La producción de oro en el país representa el 90% de los recursos minerales extraídos. Entre 1988 y 1992, cerca de 13t de Au fue producido; 7t extraído en el cantón Zamora y 3t en los cantones Portovelo-Zaruma (El Oro) (Requelme et al., 2002), el resto probablemente por otros sectores mineros ubicados en los cantones aledaños como Camilo Ponce Enríquez (Azuay).

```

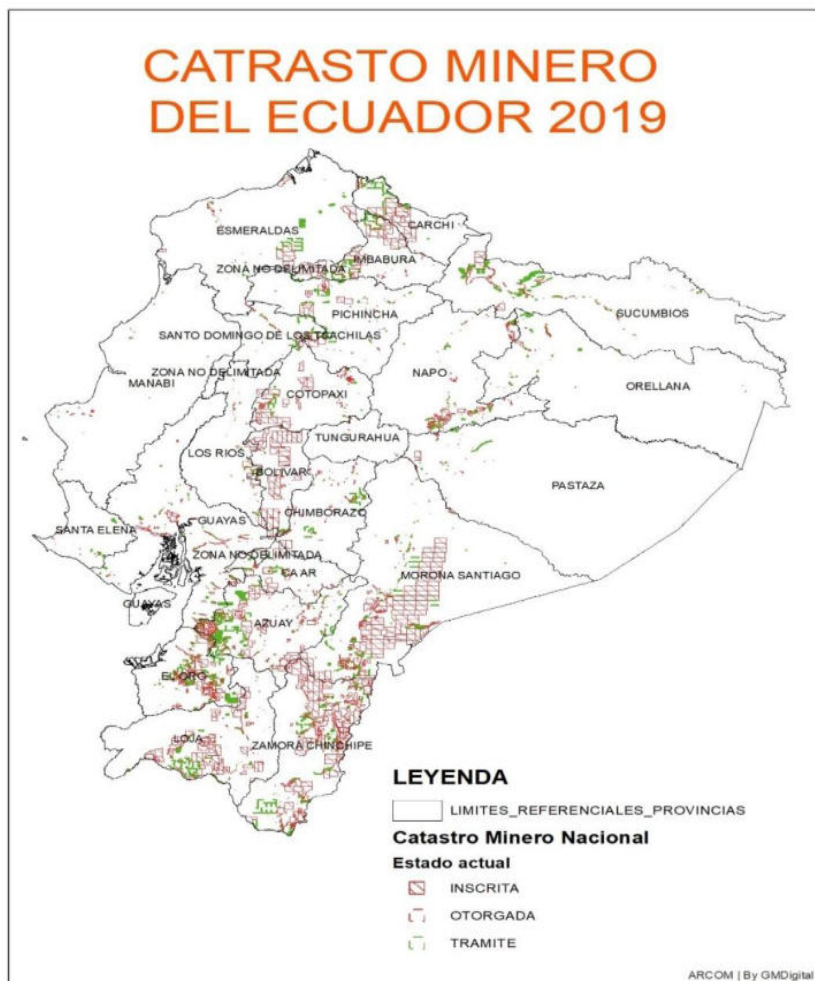
graph TD
    A[Canchón de almacenamiento de mineral] --> B[Trituración]
    B --> C[Molienda 10% de sólidos]
    C --> D[Concentración gravimétrica de oro en baveletas]
    D --> E[Remolienda con bolas de acero]
    E --> F[Concentrado remolido]
    F --> G[Reconcentración en concentrador centrífugo]
    G --> H[Reconcentrado 0,120 ts S]
    H --> I[Reconcentración en mesa concentradora]
    I --> J[Concentrado de oro 0,0012 ts S]
    J --> K[Ataque químico con ácido nítrico]
    K --> L[Fundición]
    L --> M[Bullión de oro]
    M --> N[Refinación de oro]
    N --> O[ORO PURO]

    C --> P[Filtración 10% de humedad]
    P --> Q[58,8 ton S; 6,53 m3 L]
    Q --> R[Cianuración 25% de sólidos]
    R --> S[1,20 ton S; 0,140 m3 L]
    S --> T[Relave 1,08 ton S]
    T --> G
    R --> U[60 ton S; 180 m3 L]
    U --> V[Adsorción con carbón activado]
    V --> W[Carbón activado]
    W --> X[Desorción de oro de carbón activado]
    X --> Y[Relave 1188 ton S]
    Y --> I
    V --> Z[60 ton S; 180 m3 L]
    Z --> AA[Filtración 10% de humedad]
    AA --> AB[Recirculación de agua de filtración 173,33 m3 L]
    AB --> C
    AA --> AC[60 ton S; 6,67 m3 L]
    AC --> AD[Filtración 30% de sólidos]
    AD --> AE[Concentrado de flotación 12 ton S; 1,33 m3 L]
    AE --> AF[Piscina de colas finales]
    AD --> AG[Relave de flotación 48 ton S; 138,67 m3 L]
    AG --> AH[Filtración 10% de humedad]
    AH --> AI[Recirculación de agua de filtración 133,33 m3 L]
    AI --> AD
    AH --> AJ[48 ton S; 5,33 m3 L]
    AJ --> AK[Piscina de colas finales]
  
```

Actualmente se registra 157 ocurrencias de depósitos mineros metálicos más representativos del país y aunque se realiza minería a gran escala (IIGE - Instituto de Investigación Geológico y Energético, 2017). La

provincia de El Oro presenta la mayor cantidad de mineralización metálica relacionada con rocas intrusivas en contacto con piedras volcánicas o rocas carbonatadas. En Zamora, rocas volcano clásticas de buzamiento leve se localiza dentro de los Granitoides Zamora. Fósiles bivalvos en una secuencia de limolitas calcáreas skarnificadas se localizan cerca de las poblaciones de Piuntza y Nambija.

Figura 3.10. Mapa de catastro minero del Ecuador.



Fuente: (Minero, 2026).

3.5. Petróleo

En Ecuador se encuentra una de las tres mayores reservas de petróleo de América Latina y el Caribe, con aproximadamente 8.270 millones de barriles. El país experimentó un cambio significativo en sus actividades petroleras a partir de la década de 1970 debido en gran medida al desarrollo e implementación del Sistema de Oleoducto Transecuatoriano, que juega un papel fundamental en la promoción de las exportaciones de petróleo a través del Terminal Marítimo Balao Esmeraldas, transportando más de 5000 millones de barriles de crudo desde las provincias orientales de Sucumbíos, Orellana y Napo (EPPETROECUADOR, 2018).

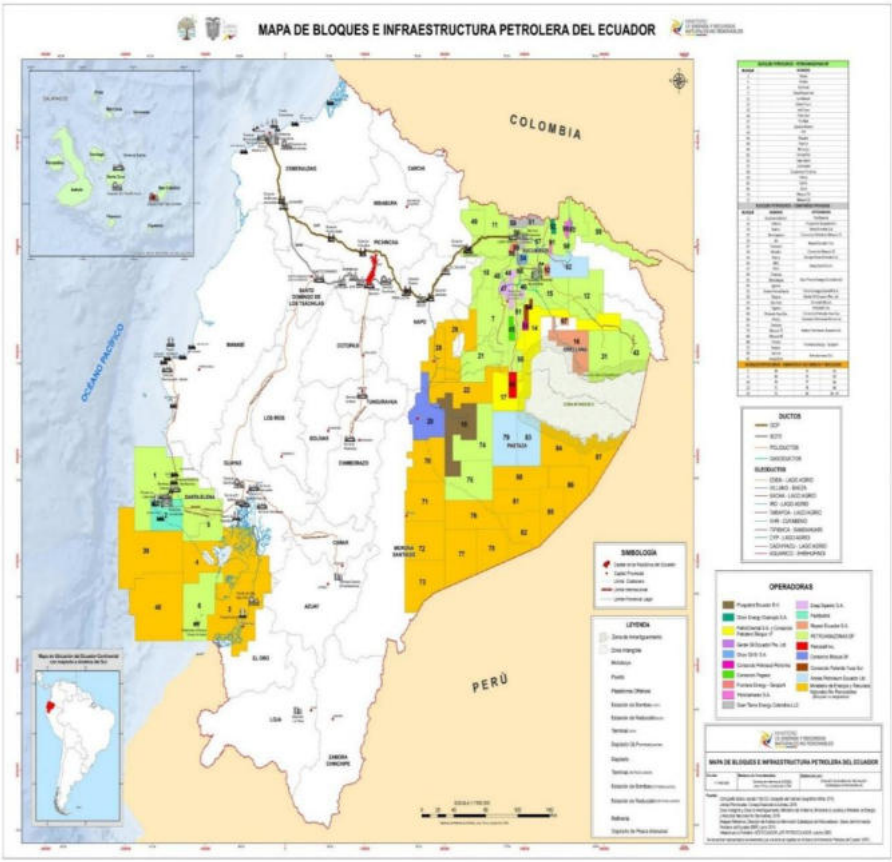
Figura 3.11. Monumento Petro producción línea Ecuatorial.



Fuente: Elaboración propia

La explotación de petróleo y gas representa el 11,3 % del Producto Interno Bruto nacional (Alfredo et al., 2022). Las actividades extractivas se desarrollaron con poco control ambiental, a pesar de la tecnología existente y el personal calificado. Estudio reportó tener 3.568 pozos petroleros cerrados, los cuales son considerados ‘fuentes de contaminación’ en el sector de petróleo y gas, existen 4.675 sitios contaminados, la mayoría de ellos ubicados en las provincias amazónicas de Sucumbíos (con 2.776) y Orellana (1.646). Por ejemplo, Texaco dejó 714 pozos petroleros enterrados que han resurgido con el paso de los años (Vélez et al., 2023). Ecuador históricamente ha dependido en gran medida de los combustibles fósiles como fuente de energía, pero su posición privilegiada le confiere un elevado potencial de energías renovables y limpias. (CONELEC, 2008).

Figura 3.12. Mapa Bloques Petroleros del Ecuador.



Fuente: (Energía, 2026).

CAPÍTULO IV

Exposición a la radiación ionizante en Ecuador

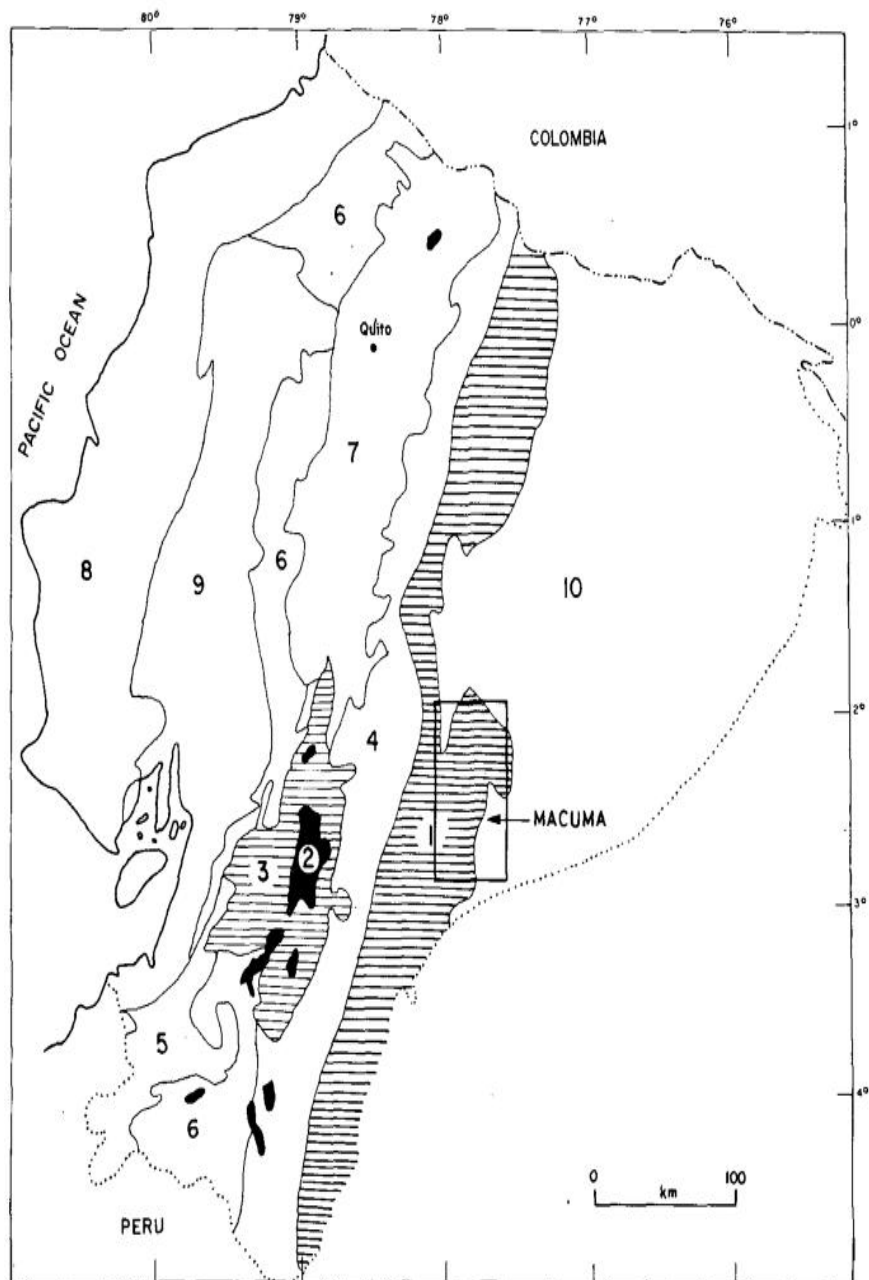
La investigación de la radiación ionizante natural en el Ecuador inició en 1966 mediante proyectos impulsados por la Comisión Ecuatoriana de Energía Atómica (CEAA), la Escuela Politécnica Nacional y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), orientados principalmente a la prospección de uranio y al monitoreo de la radioactividad ambiental en distintas regiones del país. Estas investigaciones incluyeron campañas radiométricas aéreas y terrestres que permitieron identificar zonas con potencial uranífero y generar los primeros antecedentes científicos sobre radiación natural en el Ecuador. Posteriormente, la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en colaboración con instituciones internacionales, desarrolló estudios sobre la concentración de radón y su posible relación con la actividad sísmica en el sistema de falla de Pallatanga mediante detectores sólidos de trazas nucleares. En años recientes, el Grupo de Energías Alternativas y Ambiente (GEAA) de la ESPOCH ha retomado estas investigaciones mediante la elaboración de mapas radiométricos y el monitoreo de radiación natural de fondo y radiación terrestre en la provincia de Chimborazo, una región influenciada por la actividad volcánica y la deposición de ceniza proveniente de volcanes activos como Tungurahua y Sangay.

4.1. Proyecto Mapa de Áreas Favorables de Uranio

El proyecto fue llevado a cabo por el CEAA y el OIEA para la realización del Mapa de Favorabilidad Geológico - Uranífera del Ecuador y el cálculo de los respectivos índices de favorabilidad geológica – uranífera (IFGU) para cada área, utilizando para ello los datos obtenidos en los diferentes trabajos preparados por la Dirección de Materias Primas Nucleares (DMPN) del CEAA en los últimos años y tomando como modelos diferentes aproximaciones relativas al tema ejecutadas en otros países.

En 1964 y 1965, la DMPN del CEAA en colaboración con los recursos económicos financiados del PNUD, llevaron a cabo la evaluación magnética y gamma métrica de aproximadamente 1700 km² en distintos sectores del territorio nacional. Los datos ayudaron limitadamente para el proyecto del OIEA y la EPN en 1966, que consistía en la búsqueda de uranio en distintas zonas del país. Estudios de prospección se realizaron en las provincias de Morona Santiago, Zamora Chinchipe, Loja y El Oro. En 1980 una prospección aerotransportada área y comprobación de anomalías se efectuó en los mismos sitios, sumando a la provincia del Azuay. Finalmente, el proyecto presento el mapa de áreas de favorabilidad geológica-uranífera.

Figura 4.1. Áreas prioritarias para la exploración de uranio.



Fuente: (IAEA, 1981).

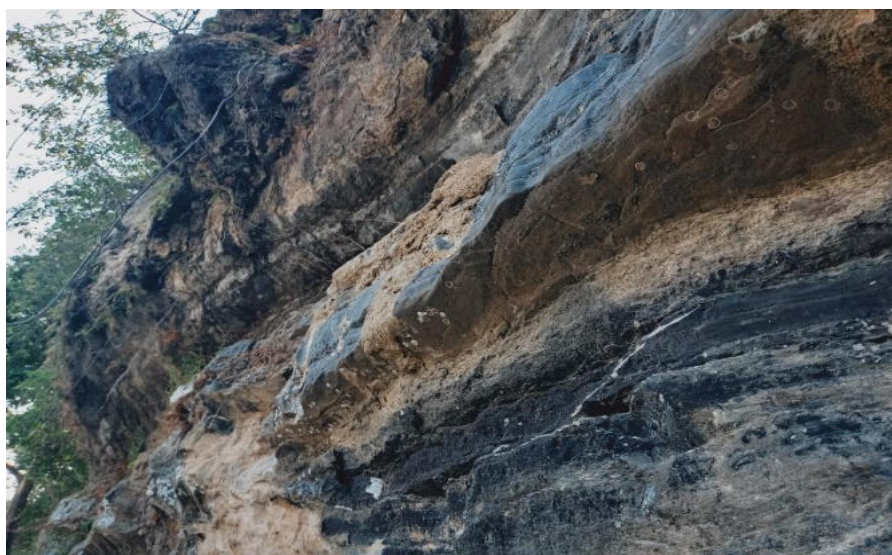
La ladera este de la Cordillera oriental ha sido reconocida como un área de gran potencial (zona 1) por su correlación geológica con distritos de uranio en Venezuela, Colombia y Norte de Argentina. Las ocurrencias de uranio han sido localizadas en sedimentos asfalto cretácico llegando hasta 100 ppm, aunque todavía aún no se han visto minerales de uranio. De las ocho cuencas sedimentarias de agua dulce discretas de edad del Mioceno situados en la Sierra, solo dos se conoce la presencia de uranio, clasificada como zona 2. La zona 3 se relaciona con los volcanes ácidos terciarios que se extienden a ambos lados del área central sur de la Sierra. La actividad hidrotermal se manifiesta por zonas de alteración y se conoce mineralización argentífera epitermal en San Bartolomé. Las zonas 1, 2 y 3 tienen una alta prioridad para la exploración y suman alrededor de 41000 km² o el 15 % del territorio nacional ((IAEA), 1981).

Sedimentos carbonatados a 20 km al suroeste de Cuenca se determinaron concentraciones de U en un promedio de 30 ppm y alcanzan un rango de hasta 400 ppm. A lo largo de la Cordillera Oriental se determinó varias anomalías (por gammagrafía) en los sedimentos del Cretáceo localizadas tanto en el Oriente como en el sur Andino. De las 48 áreas de respuesta elevada de uranio (uranio > 1 ppm), 7 zonas (Fig. 4.1) se verificaron posteriormente indicando que los valores altos encontrados en sedimentos se explican en términos de valores de lecho de roca (5 ppm de uranio se encontró en granodioritas) (IAEA, 1981).

En 1984, la DMPN enfocó su trabajo en la búsqueda de indicios y detección de prospectos en todo el continente ecuatoriano. El

estudio consistía en la evaluación del potencial uranífero en Zamora, evaluación de cuerpos intrusivos, reconocimiento preliminar de volcanes ácidos, pero principalmente la investigación se orientó a la exploración en el cantón Puyango de la provincia de Loja. En 1985, a investigación geológica de uranio y más minerales radioactivos de interés nuclear, cubrió importantes áreas bajo dos modalidades muy bien definidas; la prospección regional (Zamora, El oro, Cotopaxi, Tungurahua y Pastaza) y la exploración preliminar que se enfocó en el área de Puyango.

Figura 4.2. Calizas, lutitas calcáreas en el cantón Puyango.



Fuente: Elaboración propia.

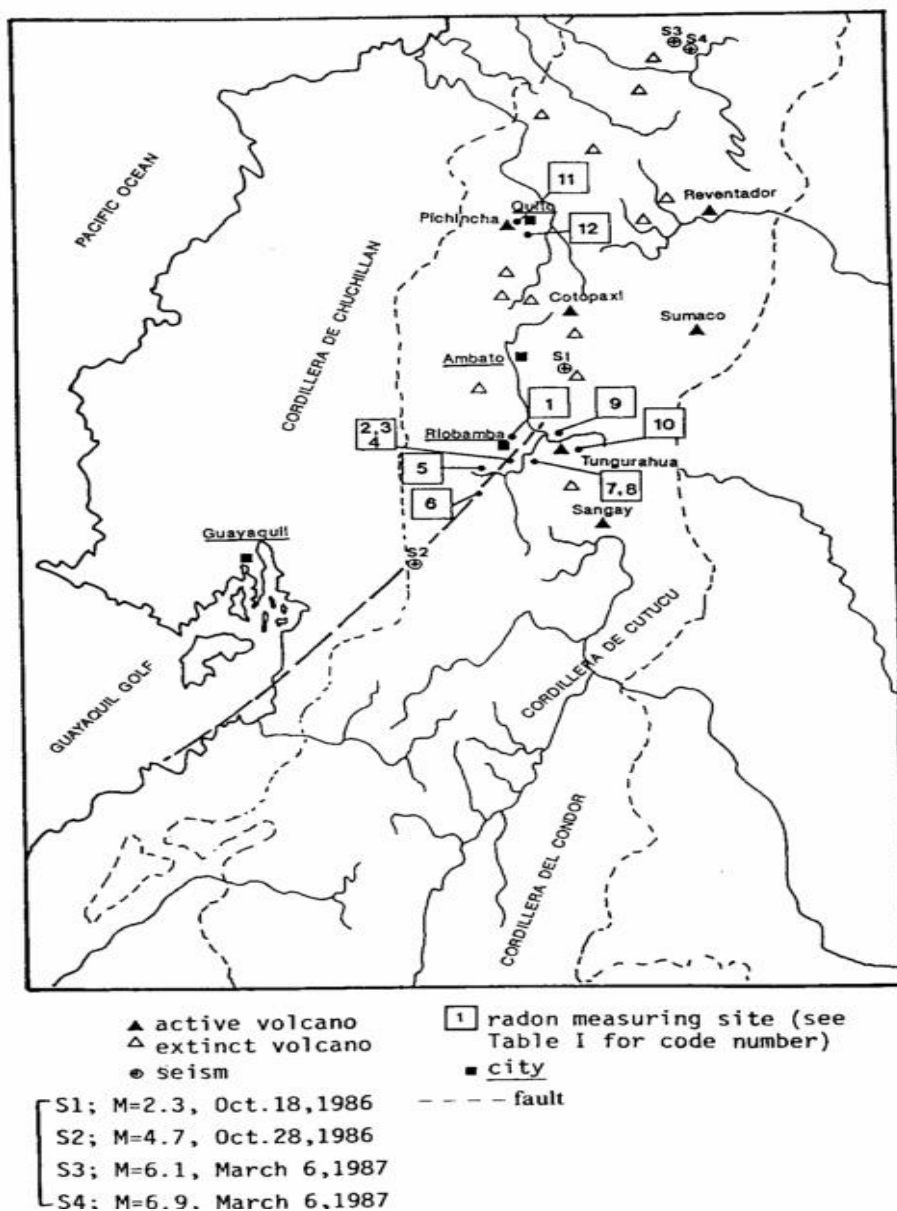
En el Puyango, se han detectado dos estratos anómalos con valores de hasta 500 ppm de uranio, y cuya evaluación preliminar cubre aproximadamente 2 millones de toneladas de rocas mineralizadas, en las cuales se observan también valores muy significativos de

vanadio de hasta 10.000 ppm. Luego de registros de lecturas radiométricas de tres drenajes que desemboca en el río Puyango, realizaron un levantamiento geológico en detalle, incluyendo el levantamiento topográfico con plancheta para reconstruir la estructura geológica de la zona. Tratándose de rocas sedimentarias (Larrea, 1986).

4.2. Cuantificación de gas radón en el Ecuador

El Proyecto de Investigación consistía en determinar fallas naturales en la estructura del territorio ecuatoriano que habían causado grandes eventos sísmicos a lo largo del tiempo. Con la ayuda del Instituto de Geofísica de la EPN se identificó dichos lugares para hacer agujeros de 1 metro de profundidad e instalar las películas de Lr-115 que son empelados como detectores pasivos de radón, reemplazarlas por periodos de tiempo y posteriormente ser procesadas en el Laboratorio de Técnicas Nucleares LTN. El propósito de realizar estudios a lo largo del tiempo era para conocer el comportamiento de la emisión del gas radón en las distintas épocas del año, para tener datos más reales que se puedan vincular con fenómenos sísmicos y volcánicos muy frecuentes en nuestro país. A fines de marzo de 1986 se instalaron los primeros dosímetros para medir radón juntamente con la primera Red Sísmica del país al pie del nevado Chimborazo, en Lirio y Tepeyac pertenecientes a la provincia de Chimborazo, en el Guagua Pichincha. También se instalaron dosímetros y sismógrafos en El Tablón, cerca de Pallatanga y otros en la Provincia de Bolívar y Tungurahua.

Figura 4.3. Mapa de localización de estaciones de medición de radón en Ecuador, ocurrencias sísmicas durante el periodo de evaluación son indicadas (S1, S2, S3, S4).



Fuente: (Humanante et al., 1990).

El proyecto de cuantificación de gas radón relacionado con actividades sísmicas y volcánicas se desarrollaba de manera regular, se había ampliado a otras áreas estudio con la participación de nuevos tesisistas y siempre en colaboración permanente del Instituto de Geofísica de la EPN y de la CEEA de Quito. El 6 de marzo de 1987, ocurre un gran terremoto en la región central del país de magnitud 6,9 con el epicentro cercano a Quito; los daños fueron cuantiosos en edificios históricos como templos y museos. Pero lo más impactante fue que los principales objetivos del Proyecto de Investigación en marcha en la ESPOCH se cumplieron. “Según Humanante et al. (1990), se reportaron incrementos anómalos hasta con 5 días de anticipación. En algunos sitios, la media normal aumentó significativamente y en otras disminuyó. Las razones son elementales, donde aumentó la emisión de gas radón muy probablemente se trataba de zonas de expansión al momento del terremoto. Pero en aquellos lugares donde disminuyó drásticamente se debía a que eran zonas de compresión de la corteza terrestre.

El suceso pudo haber sido anticipado, si en 1986 se contaba con detectores de gas radón que den resultados en tiempo real, se podía haber anticipado muy probablemente a estos fenómenos sísmicos y volcánicos. De este modo se podía haber tomado medidas para evitar desgracias a la población expuesta. Ecuador es un país donde frecuentemente suceden eventos de esta índole que, causan dolor y pérdidas económicas. Como resultado de estas investigaciones la Revista PAGEOPH (Pure and Applied Geophysics) de Suiza de gran renombre mundial acepta analizar los resultados y finalmente se

publican en 1990 bajo el título Radon Signal Related to Seismic Activity in Ecuador, March 1987. PAGEOPH, Vol. 132 No 3

Una de las técnicas usadas para cuantificar el gas radón de origen natural que tiene características de incoloro, inodoro e isobaro se llama Detectores de Trazas Nucleares en Estado Sólido que en inglés lleva las siglas SSNTD (Solid State Nuclear Track Detectors). Consiste en el uso de películas poliméricas muy delgadas de 112 micrones de espesor hechas de nitrato de celulosa de color rojo (Lr-115), muy sensibles a las radiaciones alfa producto del decaimiento del gas ^{222}Rn en ^{218}Po . Estas películas son colocadas por el tiempo de al menos una semana hasta un año en los lugares designados para la medición y luego ser procesadas con una disolución de hidróxido de sodio (NaOH) a 60 °C por un tiempo aproximado de 90 minutos en el Laboratorio de Técnicas Nucleares (LTN) de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,

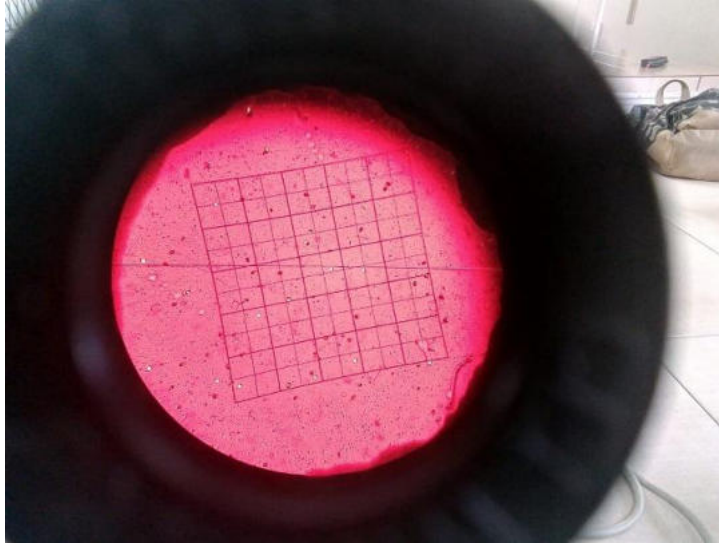
Antes, se realizan curvas de calibración para calcular nuevos factores de calibración adaptados a la realidad. Si bien el espesor original sensible es de 12 micrones, se ataca químicamente con la disolución de Na (OH) al 10 % y a 60°C para determinar el tiempo del ataque químico ideal. La curva de calibración se aplica para cada caja nueva de 20 films o cuando se utiliza disoluciones químicas nuevas. Esta curva de calibración se obtiene exponiendo 12 películas vírgenes por un tiempo desde los 90 minutos en adelante y retirando un dosímetro cada 5 minutos con una temperatura estable del baño maría de 60°C.

Luego de 110 y 120 minutos de ataque químico, se obtiene el espesor residual de 6,50 micrones que era el recomendado porque alcanza la

mayor densidad de trazas nucleares por área (Fig.4.2). Luego se separa la parte sensible de apenas 6,5 micrones para la lectura de densidad de trazas por centímetro cuadrado con un microscopio o contadas sus trazas nucleares mediante un contador de chispas aplicando alto voltaje (2000 voltios) con la finalidad de explotar el mayor número de trazas nucleares dejadas por el paso de las partículas alfa, que impactaban contra el *film* de Lr-115 con distintos ángulos.

Las trazas originales generadas en la película detectora presentaban diámetros del orden de unos pocos angstroms, resultando imperceptibles para microscopios convencionales; sin embargo, podían ser detectadas mediante sistemas especializados de análisis de imágenes de alta sensibilidad y elevado costo. Luego del ataque químico descrito anteriormente, las trazas nucleares se amplificaban hasta unos cuantos micrones de diámetro y lo suficientemente grandes como para ser visibles con un microscopio normal y contar con facilidad su densidad de trazas por cada cm^2 , tal como se observa en la imagen.

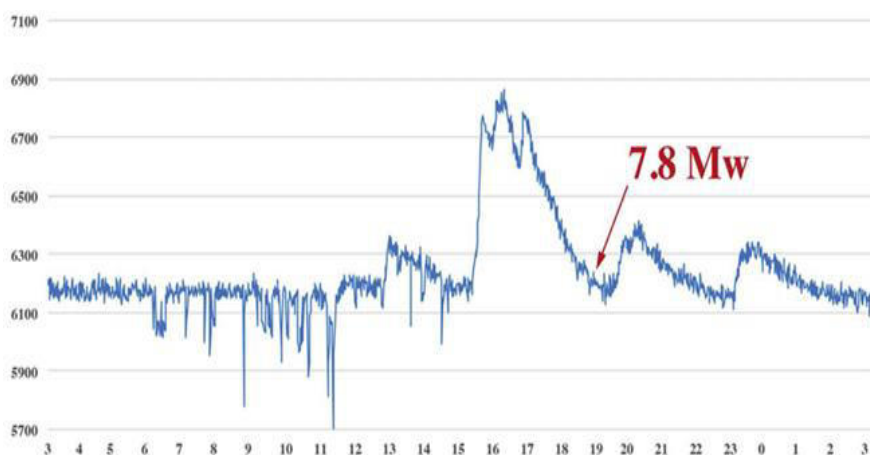
Figura 4.4. Fotografía de un dosímetro Lr-115, amplificado sus trazas nucleares, mediante la técnica SSNTD en el LTN de la Facultad de Ciencias de la ESPOCH.



Fuente: Elaboración propia.

Otras observaciones en el cambio de niveles de radiación natural de fondo se han registrado en el 2018 como un indicador para predecir erupciones volcánicas y eventos sísmicos en el país, ej. horas después del terremoto de 16 de abril de 2016 ($M=7.8$) altos niveles de radiación natural se detectaron a 222km del epicentro (22km suroeste del volcán Cotopaxi) (Toulkeridis et al., 2019).

Figura 4.5. Terremoto principal de 7,8 Mw del 16 de abril de 2016 con un comportamiento de radiación diferente al de los días normales.



Fuente: (Toulkeridis et al., 2019).

4.3. Estudios radiométricos en materiales de construcción

Un estudio reporta que el material piroclástico del volcán Tungurahua depositado en sus flancos en la erupción del 2006 contiene 27.58 ± 1.99 Bq/kg de ^{226}Ra , 30.28 ± 2.48 Bq/kg de ^{232}Th y 411 ± 28.77 Bq/kg de ^{40}K , el cual es actualmente utilizado como material de construcción y dichos valores están bajo los promedios de concentración globales de materiales de construcción, sin embargo, muy cerca del promedio mundial de concentración en el suelo (Reino et al., 2018).

Tabla 4.1. Actividad específica e índice gamma de los flujos piroclásticos del volcán Tungurahua.

Muestra	A	B	C	D	E	Promedio
Peso (g)	1282.67	1279.99	1268.96	1268.96	1245.25	1269.17
²²⁶Ra	24.25 ±	33.25 ±	27.69 ±	26.45 ±	26.25 ±	27.58 ±
(Bq/kg)	1.69	2.66	1.94	1.85	1.84	1.99
²³²Th	29.15 ±	30.6 ±	30.95 ±	29.4 ±	31.3 ±	30.28 ±
(Bq/kg)	2.3	2.4	2.79	2.35	2.5	2.48
⁴⁰K	393 ±	410 ±	440 ±	402 ±	410 ±	411 ±
(Bq/kg)	27.5	28.7	30.8	28.14	28.7	28.77
Índice	0.35 ±	0.41 ±	0.39 ±	0.36 ±	0.38 ±	0.38 ±
gamma	0.03	0.03	0.029	0.026	0.028	0.028

Fuente: (Reino et al., 2018).

Las muestras de material piroclástico no superan el criterio dosis (índice gamma de 0.5 a 1), por tanto, no requieren un control de la radioactividad de materiales de construcción utilizado en grandes cantidades, considerando que el material piroclástico se vende como arena fina para la construcción, específicamente para la ciudad de Baños y Ambato.

40 materiales de construcción más fueron estudiados en estos últimos años, entre ellos bloques de hormigón, ladrillos de arcilla, granito y muestras de hormigón fabricados en Ecuador. Las mediciones radiométricas consistieron en detectar concentraciones de radón en una cámara cerrada con un equipo RAD7 en el interior. La tasa de exhalación superficial más alta se detectó en muestras de granito (5.053 Bq/m²·h), mientras que los ladrillos de arcilla muestran una exhalación

de Rn por debajo del nivel mínimo de detección (0,05 Bq/m·h) como se ve en la Tabla 4.2 (Tene et al., 2021).

Tabla 4.2. Concentración de actividad de Rn en interiores para la vivienda de referencia. A_e es el área de exhalación frontal y E_A es la tasa de superficie de exhalación de los materiales de construcción correspondientes.

Descripción	Aplicación	A_e (m ²)	E_A (Bq·m ⁻² ·h ⁻¹)	C_{indoor} (Bq·m ⁻³)
Bloque de hormigón	Paredes internas	24.41	0.218	0.09
Ladrillo de arcilla	Paredes externas	58.95	0.009	0.01
Granito	Mesón de cocina	0.60	5.053	0.05
Hormigón	Columnas	10.25	1.148	0.19
Hormigón	Piso	39.17	1.148	0.73
Total				1.06

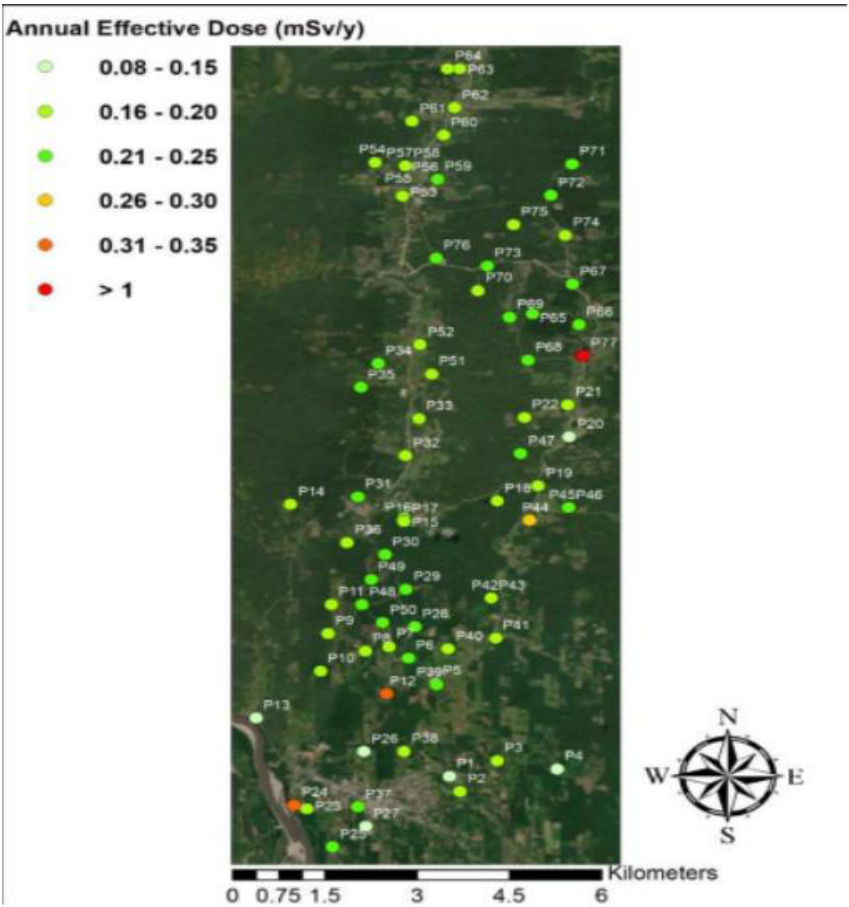
Fuente: (Tene et al., 2021).

4.4. Exposición radiológica en Pacayacu, una ciudad petrolera

Un Reciente estudio, mide la tasa de dosis equivalente ambiental con detectores de centelleo debidamente calibrados en la autoridad reguladora SCAN en una ciudad históricamente petrolera en la amazonia, Pacayacu ubicada en cantón Lago Agrio, provincia de Sucumbíos. Esta investigación presenta los valores de dosis efectiva anual de los pozos petrolíferos cerrados en un mapa, donde el área de estudio productora de petróleo reporta contaminación derivada de dichas actividades. Se identificó un punto de interés radiológico que

superaba el límite de exposición pública establecido por la legislación nacional y el límite sugerido por el OIEA. Los resultados de este estudio estimularán la realización de futuros estudios radiométricos en otros yacimientos petrolíferos y servirán de base para el control del cumplimiento por parte de la autoridad reguladora SCAN.

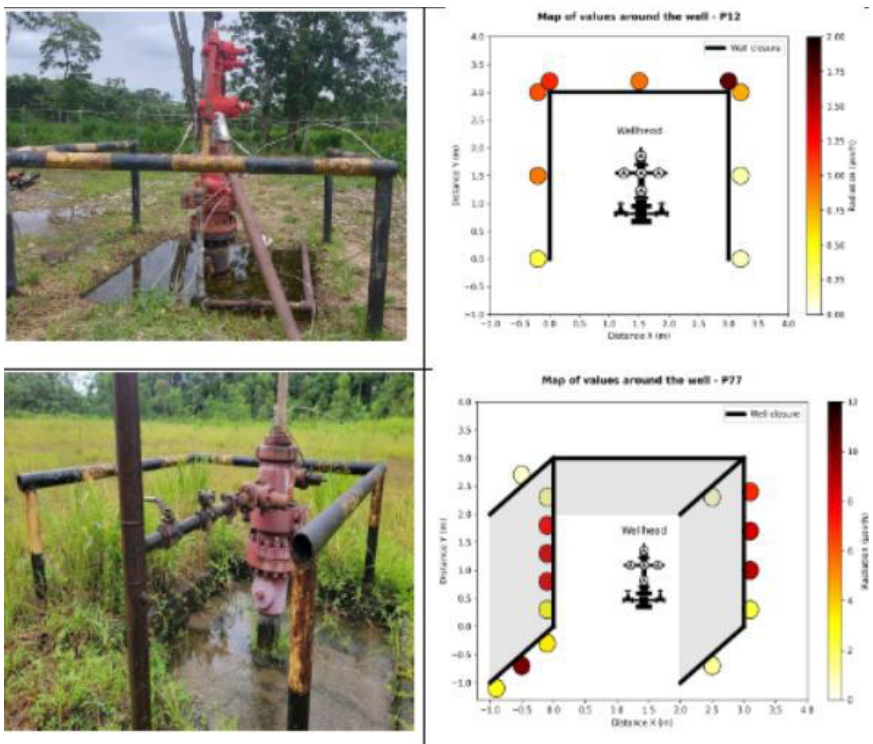
Figura 4.6. Dosis efectiva anual.



Fuente: (Pucha, G. Armijos, V.Flores, B.Recalde, 2025).

Para identificar la fuente de contaminación en los lugares con alta radioactividad, los investigadores realizan mediciones de barrido de los pozos petrolíferos (HVI-22) en el emplazamiento P12 y PPC(SHR-04) en el emplazamiento P77, que se muestran en la figura 4.6, con valores de 0,20 a 10 $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, correspondientes a mediciones tomadas a 5 cm de las tuberías metálicas del recinto. Esta variabilidad se debe a la acumulación de material radiactivo en determinadas secciones de las tuberías utilizadas en la explotación petrolera, lo que indica la presencia de contaminación NORM en el interior de dichas tuberías.

Figura 4.7. Mediciones de barrido del pozo petrolífero en los sitios P12 y P7.

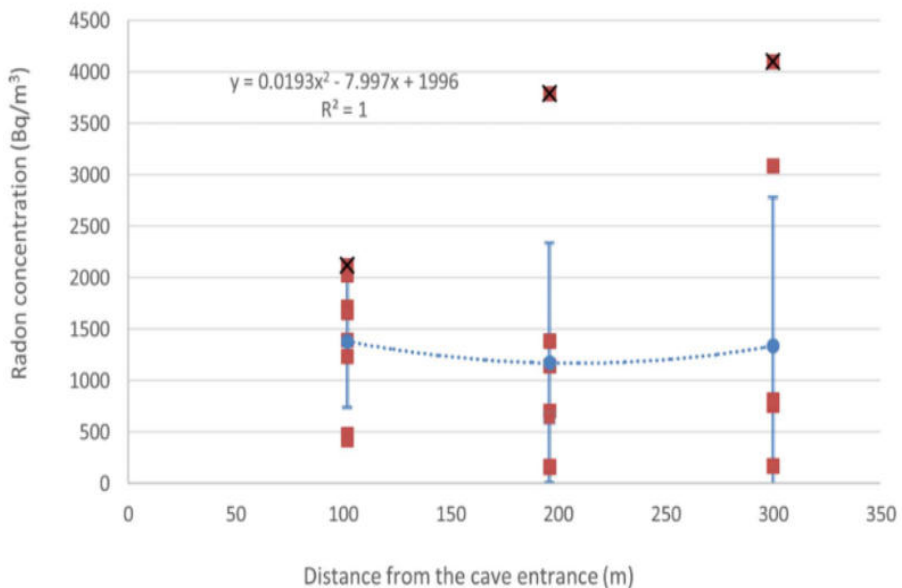


Fuente: (Pucha, G. Armijos, V.Flores, B.Recalde, 2025).

4.5. Estudios sobre radón

La Caverna Jumandy localizado en una zona uranífera de tercera prioridad en Ecuador, es una de las cuevas más visitadas, aquí la concentración de ^{222}Ra varia de 156-4100 Bq/m³ de acuerdo con la humedad y temperatura en un área geológicamente ígnea compuesto de areniscas bituminosas. La dosis efectiva anual estimada para el guía turístico sobrepasa 10 veces el límite permisible de 1 mSv/año (García Paz et al., 2019).

Figura 4.8. Análisis de correlación de la media general (marcadores azules) y de todas las mediciones de 24 horas (marcadores naranjas) del ^{222}Rn en los tres puntos de medición de la cueva turística de Jumandy en función de su distancia a la entrada de la cueva. Las concentraciones máximas están marcadas con una cruz negra.



Fuente:(García Paz et al., 2019).

Existen actividades importantes en el país, tal como la extracción de petróleo, gas natural, oro-cobre y material de construcción, pueden alterar o modificar los niveles de radiación terrestre. La transferencia de NORM hacia el ambiente es posible por la acción extractiva de minerales, eventos geológicos, erupciones y sísmicos. La difusión del radón a partir de las fuentes termales que fluye por las fracturas del suelo provocado por eventos sísmicos y volcánicos es la principal causa de las concentraciones de radón en las viviendas. En general, los radionucleidos al estar presentes en el rocas, suelo, agua, aire y alimentos son responsables de una parte significativa de la dosis de radiación recibida por los humanos. Ecuador es un país en desarrollo, no cuenta con la industrialización nuclear, por lo tanto, su población está expuesta parcial o totalmente a la radiación ionizante de origen natural (Carrasco, 2015).

CAPÍTULO V

Exposición a la radiación ionizante en la provincia de Chimborazo

Las regiones altas se pueden considerar como sitios adecuados para estudiar la radiación cósmica, con los equipos detectores se puede estimar los niveles de exposición al público, así como, determinar sus componentes generados en la cascada cósmica, energía y origen. Por lo mencionado, investigadores del grupo GEAA realizaron mediciones en el volcán Chimborazo, donde se encuentra el punto más cercano al sol.

Estudio detecto anomalías en la concentración de radón en puntos cercanos al tramo de la Falla Chingal-Cosanga-Pallatanga-Puná (CCPP) localizados en la provincia de Chimborazo, Tungurahua y Pichincha, semanas antes de los terremotos ($M_1=2.3$ y $M_2=4.7$) de 1986 y ($M_1=6.1$ y $M_2=6.9$) 1987 (Flores, et al., 1987).

Si bien los eventos eruptivos y sísmicos pueden aportar el aumento de los niveles de radiación, en el país 8 volcanes son considerados todavía activos, de los cuales 4 de ellos han estado en actividad durante los últimos años: Reventador, Cotopaxi, Tungurahua y Sangay (Norte a Sur del país).

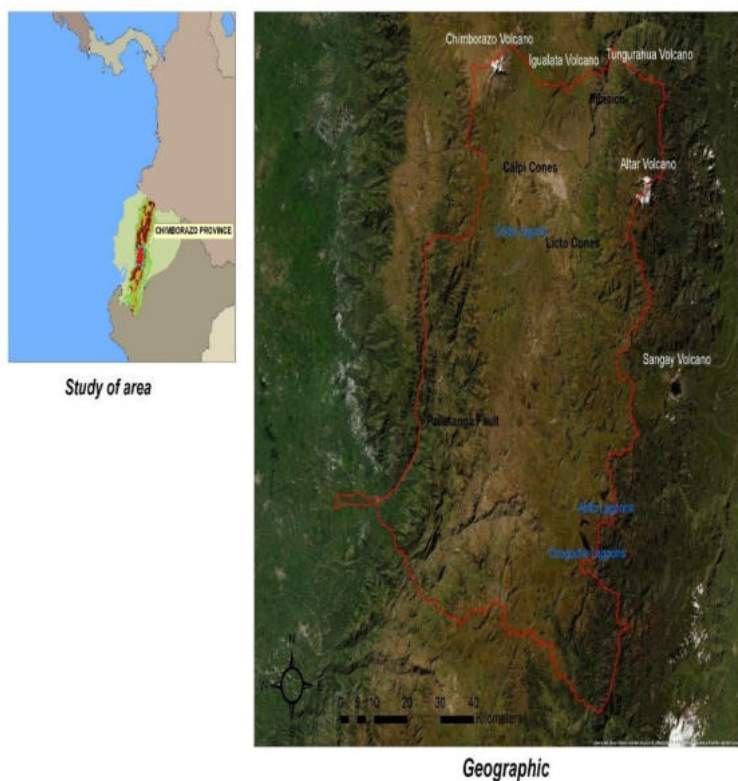
La actividad eruptiva es considerada como un proceso natural en la distribución de metales pesados y elementos radioactivos en el suelo, por tanto, puede incrementar los niveles de radiación terrestre. En base a dichos criterios y en colaboración con la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN) se obtuvo mapas de

concentración de radionucleidos naturales, mismos servirán como datos referenciales para futuras investigaciones

5.1. Área de estudio

El área de estudio ubicada en la zona central del Ecuador a $78^{\circ} 39'$ O y $1^{\circ} 39'$ S y está formada principalmente por material volcánico de previas erupciones. La provincia de Chimborazo cubre un área de 6,500.66 km² con un rango altitudinal de 135 m.s.n.m. a 6310 msnm se encuentra en los Andes del Norte del Arco Cuaternario Sur, limitando con volcanes potencialmente activos como el Tungurahua y el Sangay y entre estos el volcán Altar extinto, ubicados en la Cordillera Oriental. El volcán Chimborazo está acentuado en la Cordillera Occidental. Entre ambas cordilleras está el Valle Interandino donde se acentúa el volcán Igualata ya extinto (Bablon et al., 2019).

Figura 5.1. Mapa área de estudio.



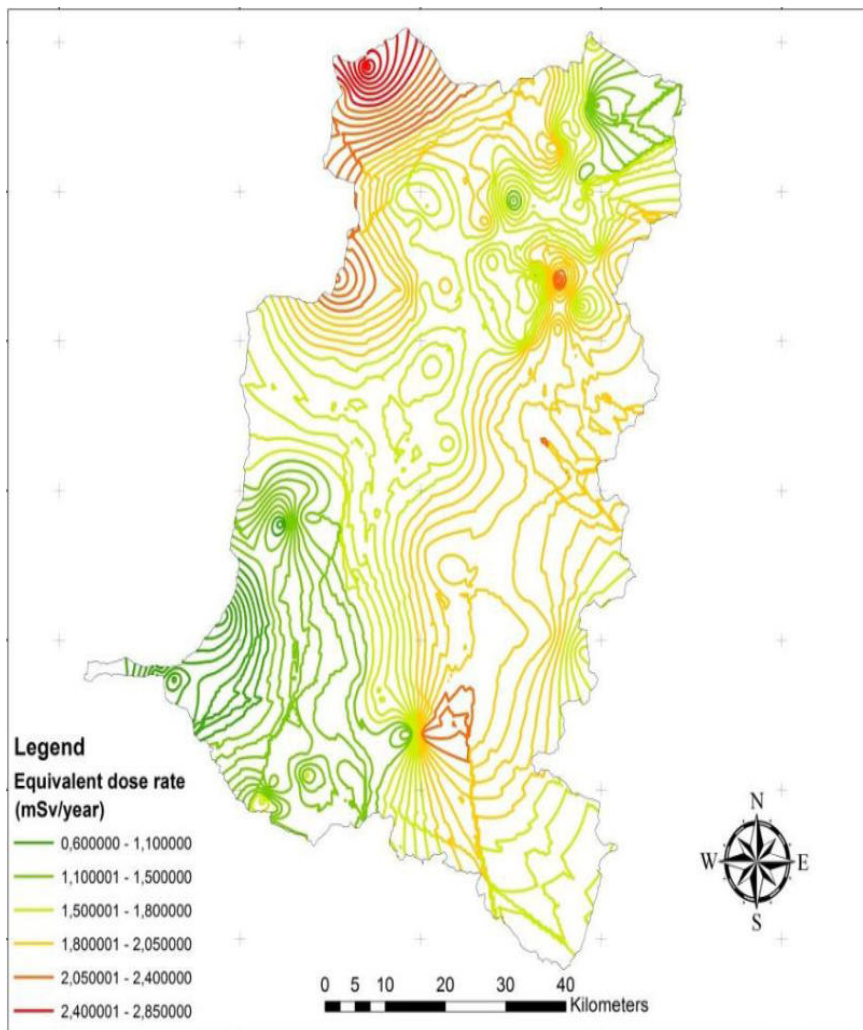
Fuente: Elaboración propia.

5.2. Radiación de fondo natural de la provincia de Chimborazo

Cerca del 2% de la población del mundo vive sobre los 3 km y recibe una desproporcionada dosis efectiva anual proveniente de la radiación cósmica, con un contribución neta del componente neutrónico quien es 3 a 4 veces mayor que en el nivel de mar (Durante & Manti, 2008). En una de las provincias más altas del país, Chimborazo, se estimó la dosis efectiva anual oscila de 0.57 mSv/año a 3.03 mSv/año con un promedio de 1.57 mSv/año. El coeficiente de correlación lineal entre la dosis y la

altura es de 0.92, factor que corrobora en las zonas de mayor altitud la radiación cósmica aporta significativamente a la radiación de fondo natural (Pérez et al., 2018). La distribución de radiación natural de fondo de la provincia de Chimborazo es mostrada en la Fig. 5.2.

Figura 5.2 Mapa de iso-dosis de radiación natural de fondo de la provincia de Chimborazo.



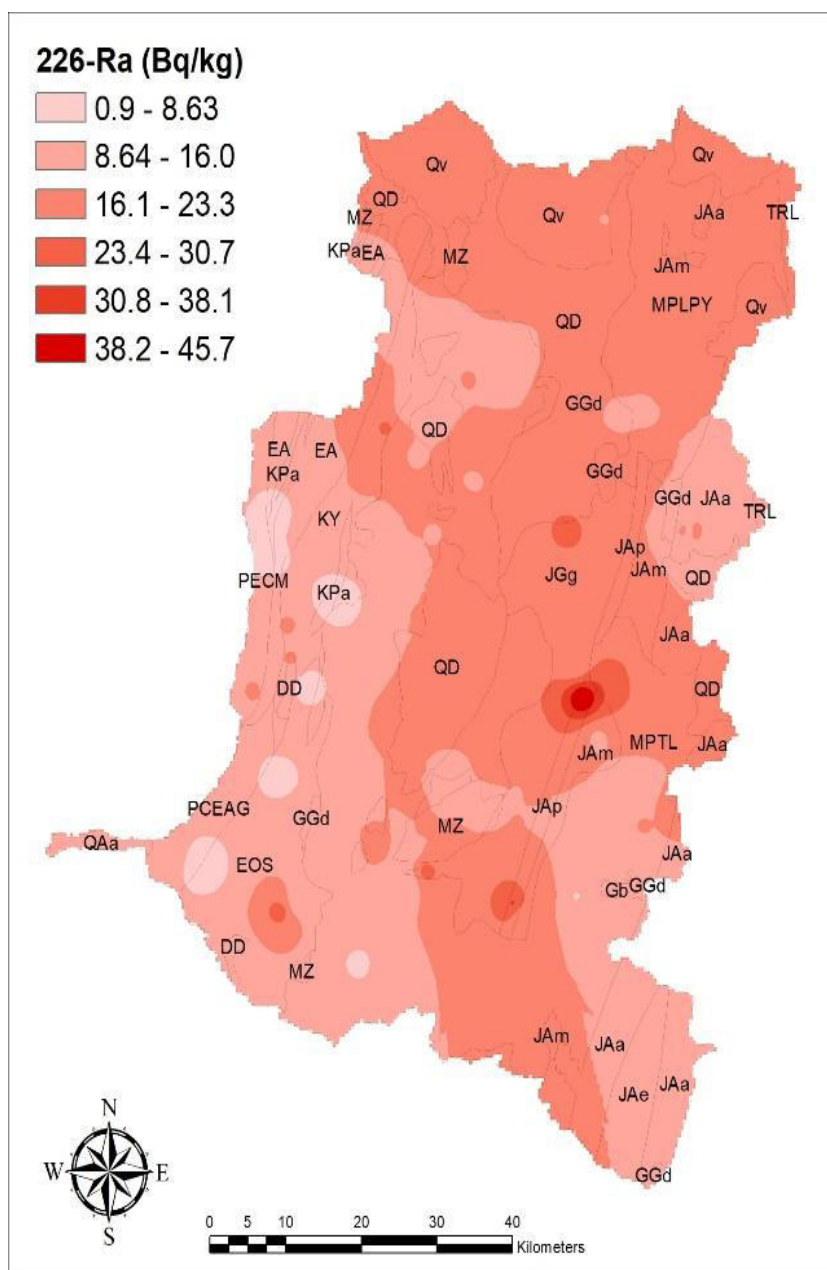
Fuente: (Pérez et al., 2018).

Los valores de radiación de fondo natural que superan la media mundial establecida por el UNSCEAR de 2.4 mSv/año se observan en el norte del área de estudio, estos valores se encuentran en la región de mayor altitud, este aumento de los niveles de radiación natural de fondo a mayor altitud se debe principalmente a la contribución neutrónica ya que a nivel del mar la contribución es del 8%, mientras que en zonas por encima de los 4000 m.s.n.m. aumenta drásticamente hasta el 35%.

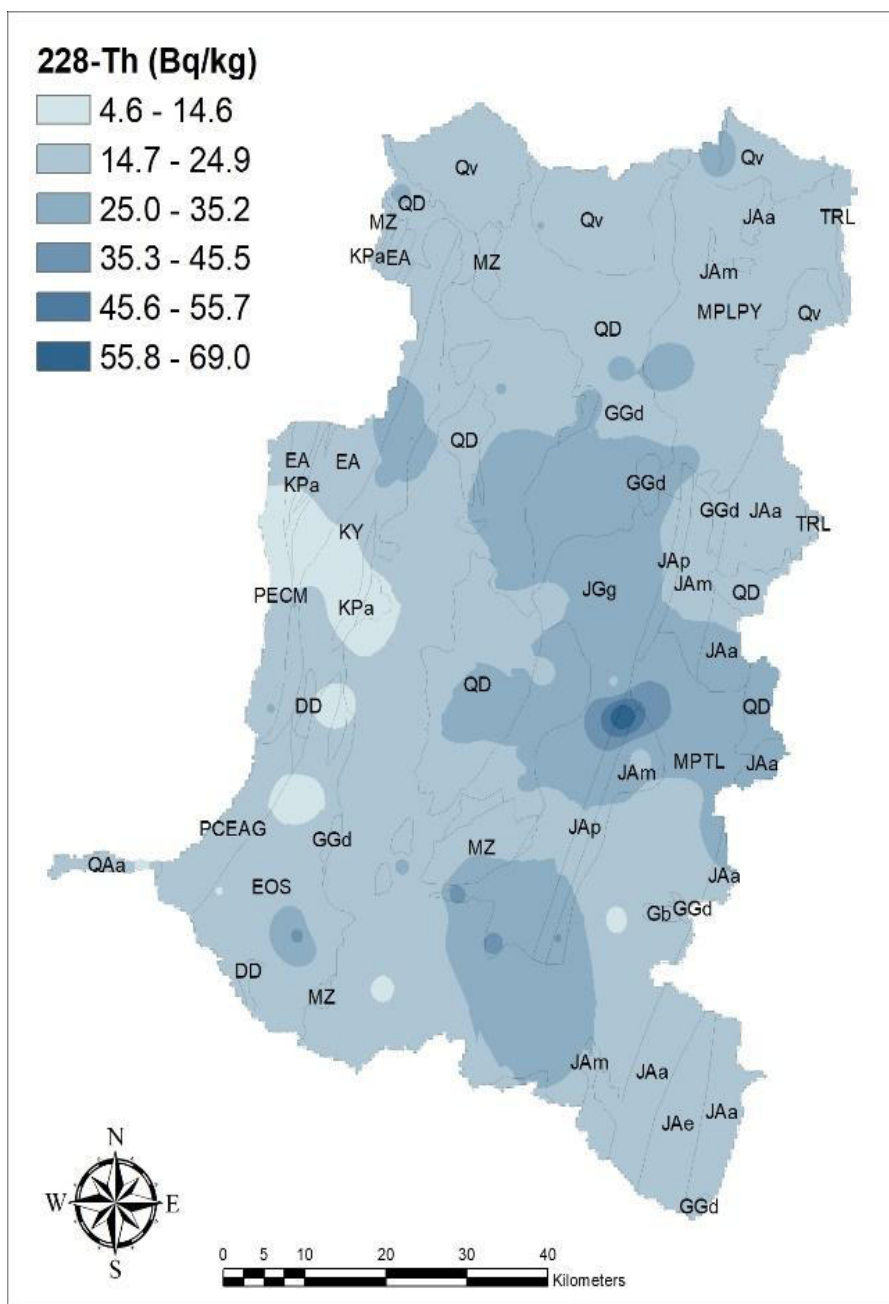
5.3. Radiación terrestre de la provincia de Chimborazo

En la provincia de Chimborazo, la concentración de los radionucleidos en el suelo no sobrepasa el promedio mundial, sin embargo, existen geologías tal como: Unidad Guasuntos el ^{40}K sobrepasa en 6,550%, y Unidad Peltetec el ^{232}Th sobrepasa en 25,17% y el ^{40}K sobrepasa en 29,35% (Fig 5.3), siendo la radioactividad atribuida a rocas pizarras y basaltos. En Ecuador por su ubicación y morfología, tanto la actividad volcánica y los riesgos sísmicos pueden alterar los niveles de radiación terrestre.

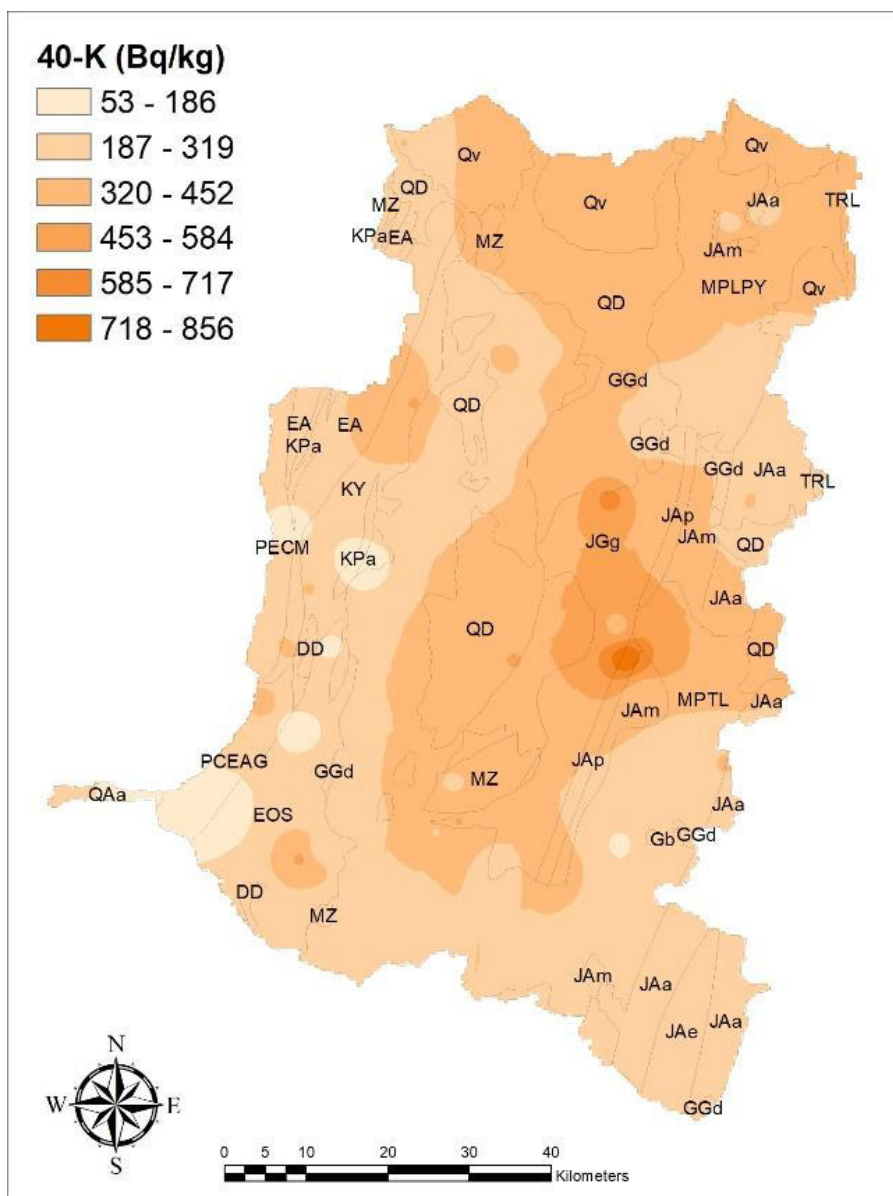
Figura 5.3. Mapa de concentración de radionucleidos en el suelo de la provincia de Chimborazo.



Fuente: Elaboración propia.



Fuente: Elaboración propia.

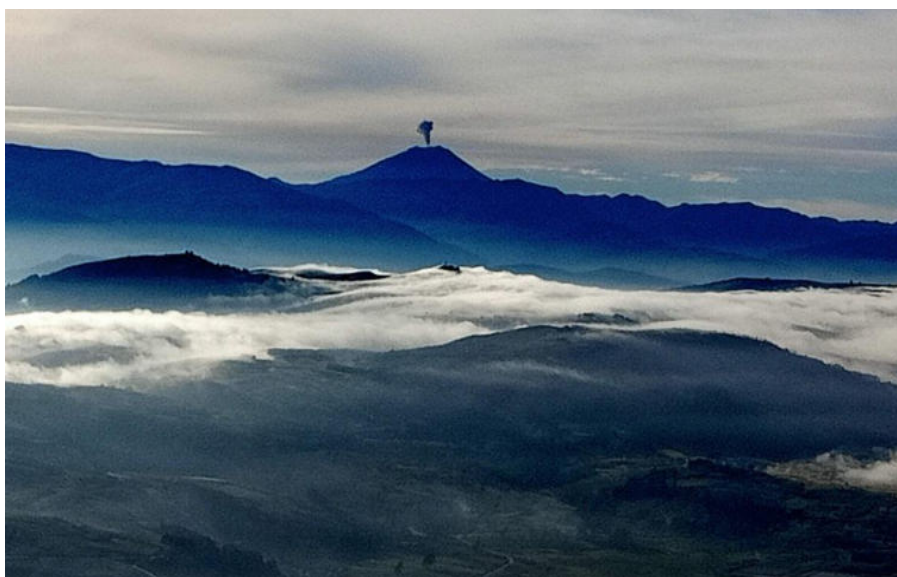


Fuente: Elaboración propia.

El volcán Sangay ubicado en la provincia de Morona Santiago ha registrado un proceso eruptivo constante desde 1628. El material piroclástico emitido más fino como es la ceniza es transportado por los

vientos alisios que se dirigen de este a oeste, depositando mayor cantidad en la zona centro-este de la provincia de Chimborazo y en ciertas ocasiones alcanza ciudades de la región costa como Babahoyo y Guayaquil.

Figura 5.4. Erupción de ceniza del volcán Sangay. 24 de marzo de 2024.



Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de las concentraciones de radionucleidos en lugares volcánicos es de interés debido a la deposición de material piroclástico producto de erupciones volcánicas puede incrementar los niveles de radiación terrestre, tal es el caso de Ereván, capital de Armenia, los valores más altos de radioactividad se identificaron en rocas volcánicas, generando un patrón de distribución en la zona norte cerca al volcán Aragats (Belyaeva et al., 2021). De igual manera, en las Islas Canarias orientales de España niveles altos se obtuvieron de suelo formado por rocas intermedias y ácidas (*volcánica y plutónica*) (Arnedo et al., 2017).

Figura 5.5. Material piroclástico acumulado en la quebrada (78°37' W y 2° 03' S) ubicado en la parroquia Cebadas, cantón Guamote, provincia de Chimborazo.



Fuente: Elaboración propia.

Las quebradas del cantón Cebadas son lugares donde se acumula el material piroclástico proveniente principalmente del volcán Sangay. La muestra de dicho material recolectada en este sitio mostró concentraciones más altas que en toda la provincia de Chimborazo con valores de 45,7, 61,5, 69 y 856 Bq/kg de ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th y ^{40}K , respectivamente.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Actividad radiactiva: Número de desintegraciones nucleares que ocurren por unidad de tiempo en una sustancia radiactiva. Su unidad en el Sistema Internacional es el becquerel (Bq).

ALARA: Principio de protección radiológica que establece que las exposiciones deben mantenerse tan bajas como sea razonablemente posible, considerando factores técnicos, económicos y sociales.

Átomo: Unidad básica de la materia constituida por un núcleo, formado por protones y neutrones, alrededor del cual se encuentran los electrones.

Becquerel (Bq): Unidad de actividad radiactiva del Sistema Internacional. Un becquerel equivale a una desintegración nuclear por segundo.

Cámara de ionización: Detector que mide la carga eléctrica producida cuando la radiación ioniza el gas contenido en una cámara.

Contador Geiger-Müller: Instrumento utilizado para detectar radiación ionizante mediante la ionización producida en un tubo lleno de gas.

Decaimiento radiactivo: Proceso espontáneo mediante el cual un núcleo atómico inestable se transforma y emite partículas o radiación electromagnética.

Detector de centelleo: Instrumento que transforma la energía depositada por la radiación en destellos de luz, que posteriormente se convierten en señales eléctricas.

Dosimetría: Disciplina encargada de medir, calcular y evaluar las dosis de radiación ionizante absorbidas por la materia o recibidas por las personas.

Dosis absorbida: Energía impartida por la radiación ionizante por unidad de masa de un material. Su unidad es el gray (Gy).

Dosis efectiva: Magnitud de protección radiológica que considera el tipo de radiación y la sensibilidad de los órganos y tejidos irradiados. Se expresa en sievert (Sv).

Dosis equivalente: Magnitud obtenida al ponderar la dosis absorbida de acuerdo con el tipo y la energía de la radiación. Su unidad es el sievert (Sv).

Efecto biológico: Cambio producido en células, tejidos u organismos como consecuencia de la interacción con la radiación ionizante.

Equilibrio secular: Condición en la que la actividad de un radionúclido hijo se aproxima a la actividad de su progenitor debido a que la vida media del progenitor es mucho mayor.

Espectrometría gamma: Técnica que permite identificar y cuantificar radionúclidos mediante el análisis de las energías características de los fotones gamma emitidos.

Exposición externa: Irradiación producida por una fuente de radiación situada fuera del organismo.

Exposición interna: Irradiación originada por radionúclidos que ingresan al organismo mediante inhalación, ingestión o absorción.

Fondo natural de radiación: Nivel de radiación ionizante presente naturalmente en el ambiente debido a fuentes cósmicas, terrestres e internas.

Fotón: Cuanto o unidad elemental de la radiación electromagnética. Los rayos X y gamma están constituidos por fotones.

Gray (Gy): Unidad de dosis absorbida. Un gray equivale a la absorción de un joule de energía por kilogramo de materia.

Índice de concentración de actividad: Parámetro utilizado para evaluar la contribución de los radionúclidos naturales presentes en los materiales de construcción a la exposición gamma en espacios interiores.

Índice de riesgo radiológico: Indicador calculado a partir de las concentraciones de actividad de determinados radionúclidos para estimar la seguridad radiológica de un material.

Ingestión: Vía de incorporación de radionúclidos al organismo mediante el consumo de agua, alimentos u otras sustancias.

Inhalación: Vía de incorporación de radionúclidos a través del sistema respiratorio, especialmente relevante para el radón, sus descendientes y el polvo que contiene materiales NORM.

Ion: Átomo o molécula que adquiere carga eléctrica debido a la pérdida o ganancia de electrones.

Ionización: Proceso mediante el cual un átomo o molécula pierde o gana electrones y se transforma en un ion.

Límite de dosis: Valor de dosis establecido normativamente que no debe superarse durante un periodo determinado en situaciones de exposición planificada.

Periodo de semidesintegración o vida media física: Tiempo necesario para que la actividad o el número de núcleos radiactivos de una muestra se reduzca a la mitad.

Protección radiológica: Conjunto de principios, normas y medidas destinadas a proteger a las personas y al ambiente frente a los efectos perjudiciales de la radiación ionizante.

Radiación alfa: Radiación corpuscular constituida por dos protones y dos neutrones. Presenta alta capacidad de ionización y bajo poder de penetración.

Radiación beta: Radiación formada por electrones o positrones emitidos durante determinadas transformaciones nucleares.

Radiación cósmica: Radiación de alta energía procedente del espacio que interactúa con la atmósfera y contribuye a la exposición natural, especialmente en lugares de mayor altitud.

Radiación electromagnética: Forma de propagación de energía mediante campos eléctricos y magnéticos oscilantes. Incluye las ondas de radio, la luz visible, los rayos X y los rayos gamma.

Radiación gamma: Radiación electromagnética de alta energía emitida por núcleos atómicos durante procesos de desexcitación o transformación nuclear.

Radiación ionizante: Radiación con energía suficiente para extraer electrones de los átomos o moléculas y producir ionización.

Radiación natural: Radiación ionizante originada en fuentes naturales, como los rayos cósmicos, los radionúclidos de la corteza terrestre y los radionúclidos presentes en el organismo.

Radiación terrestre: Radiación originada por radionúclidos naturales presentes en suelos, rocas, sedimentos y materiales de construcción.

Radiactividad: Propiedad de ciertos núcleos atómicos inestables de transformarse espontáneamente, emitiendo partículas o radiación electromagnética.

Radio-226 (^{226}Ra): Radionúclido perteneciente a la serie de desintegración del uranio-238 y progenitor directo del radón-222.

Radionúclido: Especie atómica caracterizada por un núcleo inestable que experimenta desintegración radiactiva.

Radionúclido primordial: Radionúclido existente desde la formación de la Tierra debido a su prolongada vida media. Entre los principales se encuentran el potasio-40, el uranio-238 y el torio-232.

Radón-222 (^{222}Rn): Gas radiactivo natural, incoloro e inodoro, producido en la serie de desintegración del uranio-238 a partir del radio-226. Puede acumularse en espacios cerrados.

Rayos X: Radiación electromagnética ionizante originada principalmente por transiciones electrónicas o por la desaceleración de electrones de alta energía.

Serie radiactiva: Conjunto sucesivo de transformaciones nucleares mediante las cuales un radionúclido progenitor origina varios radionúclidos hijos hasta alcanzar un núcleo estable.

Sievert (Sv): Unidad utilizada para expresar la dosis equivalente y la dosis efectiva, considerando el efecto biológico de la radiación.

Tasa de dosis: Dosis de radiación recibida o absorbida por unidad de tiempo. Puede expresarse, por ejemplo, en microsieverts por hora ($\mu\text{Sv/h}$).

Tasa de equivalente de dosis ambiental, $H^*(10)$: Magnitud operacional empleada para estimar la exposición externa producida por radiación penetrante en un punto del ambiente, a una profundidad de referencia de 10 mm.

TENORM: Sigla de *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material*. Designa materiales radiactivos naturales cuya concentración, distribución o disponibilidad ha sido incrementada mediante actividades tecnológicas.

Torio-232 (^{232}Th): Radionúclido primordial que encabeza una de las principales series naturales de desintegración radiactiva.

Transferencia lineal de energía (LET): Cantidad de energía que una partícula cargada transfiere al medio por unidad de longitud recorrida.

Uranio-238 (^{238}U): Radionúclido primordial y progenitor de una serie natural de desintegración que incluye al radio-226 y al radón-222.

NORM: Sigla de *Naturally Occurring Radioactive Material*. Comprende los materiales que contienen radionúclidos naturales en concentraciones propias de procesos geológicos o ambientales.

Potasio-40 (^{40}K): Isótopo radiactivo natural del potasio presente en rocas, suelos, alimentos y organismos vivos. Contribuye a la exposición interna y externa.

Concentración de actividad: Actividad radiactiva contenida por unidad de masa o volumen de un material. Generalmente se expresa en Bq/kg o Bq/m³.

Emanación de radón: Proceso mediante el cual los átomos de radón generados en un material sólido escapan de los granos minerales hacia sus poros.

Exhalación de radón: Liberación del radón desde la superficie del suelo, las rocas o los materiales hacia la atmósfera o un espacio interior.

Material de construcción: Producto natural o manufacturado utilizado en edificaciones que puede contener radionúclidos como ^{40}K , ^{226}Ra y ^{232}Th .

Minería subterránea: Actividad extractiva realizada bajo la superficie terrestre, donde pueden presentarse exposiciones a radiación gamma, radón, descendientes del radón y polvo con radionúclidos naturales.

Monitoreo radiométrico: Medición sistemática de los niveles de radiación o de la actividad de radionúclidos en un lugar y periodo determinados.

Radiometría: Conjunto de técnicas empleadas para detectar y medir la radiación ionizante y determinar su intensidad o distribución.

Riesgo radiológico: Probabilidad de que la exposición a la radiación ionizante produzca efectos perjudiciales, considerando la magnitud y las condiciones de exposición.

Uranio equivalente: Estimación indirecta de la concentración de uranio basada en la radiación gamma emitida por radionúclidos hijos de su serie de desintegración, suponiendo equilibrio radiactivo.

Torio equivalente: Estimación indirecta de la concentración de torio a partir de la radiación gamma emitida por radionúclidos descendientes de su serie, bajo la suposición de equilibrio radiactivo.

BIBLIOGRAFÍA

- (IAEA), I. A. E. A. (1981). *Uranium Deposits in Latin America: Geology and Exploration*.
- Alazemi, N., Bajoga, A. D., Bradley, D. A., Regan, P. H., & Shams, H. (2016). Soil radioactivity levels, radiological maps and risk assessment for the state of Kuwait. *Chemosphere*, 154, 55–62. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.03.057>
- Alfredo, I., Maridueña, M., William, K., Sánchez, G., Andrés, K., Jiménez, S., Antonio, P., Salazar, C., Alfredo, I., & Maridueña, M. (2022). *Impact of oil activity on Ecuador's finances*. 6(1), 285. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.\(1\).enero.2022.284-293](https://doi.org/10.26820/reciamuc/6.(1).enero.2022.284-293)
- Aliyu, A. S., & Ramli, A. T. (2015). The world's high background natural radiation areas (HBNRAs) revisited: A broad overview of the dosimetric, epidemiological and radiobiological issues. *Radiation Measurements*, 73, 51–59. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2015.01.007>
- Arnedo, M. A., Rubiano, J. G., Alonso, H., Tejera, A., González, A., González, J., Gil, J. M., Rodríguez, R., Martel, P., & Bolivar, J. P. (2017). Mapping natural radioactivity of soils in the eastern Canary Islands. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.010>
- Attix, F. H. (1986). Ionizing Radiation. In *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9783527617135.ch1>

- Bablon, M., Quidelleur, X., Samaniego, P., Le Pennec, J. L., Audin, L., Jomard, H., Baize, S., Liorzou, C., Hidalgo, S., & Alvarado, A. (2019). Interactions between volcanism and geodynamics in the southern termination of the Ecuadorian arc. *Tectonophysics*, 751(December 2018), 54–72. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2018.12.010>
- Barros, J., & Troncoso, A. (2010). *Atlas climatológico del Ecuador*. 153.
- Belyaeva, O., Movsisyan, N., Pyuskyulyan, K., Sahakyan, L., Tepanosyan, G., & Saghatelyan, A. (2021). Yerevan soil radioactivity: Radiological and geochemical assessment. *Chemosphere*, 265, 129173. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.129173>
- Belyaeva, O., Pyuskyulyan, K., Movsisyan, N., Saghatelyan, A., & Carvalho, F. P. (2019). Natural radioactivity in urban soils of mining centers in Armenia: Dose rate and risk assessment. *Chemosphere*, 225, 859–870. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.03.057>
- Bertou, X. (2014). EL LABORATORIO SUBTERRÁNEO ANDES. In *Anales Acad. Nac. de Cs. Ex., Fís. y Nat., tomo* (Vol. 66).
- Capaccioni, B., Cinelli, G., Mostacci, D., & Tositti, L. (2012). Long-term risk in a recently active volcanic system: Evaluation of doses and indoor radiological risk in the quaternary Vulsini Volcanic District (Central Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal*

Research, 247–248, 26–36.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2012.07.014>

Carrasco, J. (2015). *Situación Actual Del Ecuador En El Uso Y Aplicaciones Nucleares*. March, 1.
https://www.researchgate.net/publication/299423789_SITUACION_ACTUAL_DEL_ECUADOR_EN_EL_USO_Y_APLICACIONES_NUCLEARES

Casaus, J., Rodríguez, J., & Sánchez, E. (2005). Cromodinámica Cuántica: el color de los quarks. *Revista Iberoamericana de Física*, 1(1), 4–11.
<http://fisica.ciens.ucv.ve/SVF/Documentos/Feiasofi/cromodinamica.pdf>

Chaboche, P.-A., Pointurier, F., Sabatier, P., Foucher, A., Tiecher, T., Minella, J. P. G., Tassano, M., Hubert, A., Morera, S., Guédron, S., Ardois, C., Boulet, B., Cossonnet, C., Cabral, P., Cabrera, M., Chalar, G., & Evrard, O. (2022). $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ signatures allow refining the chronology of radionuclide fallout in South America. *Science of The Total Environment*, 843, 156943.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156943>

Chaboche, P. A., Saby, N. P. A., Laceby, J. P., Minella, J. P. G., Tiecher, T., Ramon, R., Tassano, M., Cabral, P., Cabrera, M., da Silva, Y. J. A. B., Lefevre, I., & Evrard, O. (2021). Mapping the spatial distribution of global ^{137}Cs fallout in soils of South America as a baseline for Earth Science studies. In *Earth-Science Reviews*

(Vol. 214). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103542>

Collot, J.-Y., Sallares, V., & Pazmiño, N. (2009). Geología Y Geofísica Marina Y Terrestre Del Ecuador. In *Institut de recherche pour la developpement*.

Commission, E. (1999). *European Commission, RADIATION PROTECTION 112*.

CONELEC. (2008). Atlas solar del ecuador. *Conelec*, 1–51.
http://www.conelec.gob.ec/archivos_articulo/Atlas.pdf

COST. (2017). Naturally Occurring Radioactive Materials in Construction. In W. Schroeyers (Ed.), *Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering* (Vol. 1, Issue ISBN: 978-0-08-102008-1). Elsevier Ltd. All rights reserved.
<https://www.elsevier.com/books-and-journals>

Diehl, J. F. (2003). *Radioactivity in food BT - Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition* (B. Caballero (ed.); Second Edi, pp. 4903–4911). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00997-4>

Dirk, J. D., Nelson, M. E., Ziegler, J. F., Thompson, A., & Zabel, T. H. (2003). Terrestrial Thermal Neutrons. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 50(6 I), 2060–2064.
<https://doi.org/10.1109/TNS.2003.821587>

- Doyi, I., Oppon, O. C., Glover, E. T., Gbeddy, G., & Kokroko, W. (2013). Assessment of occupational radiation exposure in underground artisanal gold mines in Tongo, Upper East Region of Ghana. *Journal of Environmental Radioactivity*, 126, 77–82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2013.07.007>
- Duellman, W. E., & Lynch, J. D. (2011). Frogs of the genus *Eleutherodactylus* (Leptodactylidae) in western Ecuador : systematics, ecology, and biogeography / John D. Lynch, William E. Duellman. In *Frogs of the genus Eleutherodactylus (Leptodactylidae) in western Ecuador : systematics, ecology, and biogeography / John D. Lynch, William E. Duellman*. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.7951>
- Durante, M., & Manti, L. (2008). Human response to high-background radiation environments on Earth and in space. *Advances in Space Research*, 42(6), 999–1007. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.02.014>
- El, H., Essam, G., Mervat, S., Haddad, E., El, M., & Farid, A. (2018). *Assessment of the natural radioactivity and radiological hazards in granites of Mueilha area (South Eastern Desert , Egypt)*.
- Energía, M. de A. y. (2026). *Ministerio de Ambiente y Energía*. <https://www.ambienteyenergia.gob.ec/#>
- EPPETROECUADOR. (2018). *SOTE, 46 años, el motor de la economía del país*.

- Faanu, A., Adukpo, O. K., Tettey-Larbi, L., Lawluvi, H., Kpeglo, D. O., Darko, E. O., Emi-Reynolds, G., Awudu, R. A., Kansaana, C., Amoah, P. A., Efa, A. O., Ibrahim, A. D., Agyeman, B., Kpodzro, R., & Agyeman, L. (2016). Natural radioactivity levels in soils, rocks and water at a mining concession of Perseus gold mine and surrounding towns in Central Region of Ghana. *SpringerPlus*, 5(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-1716-5>
- Foro Nuclear. (2022). *Rincón educativo*. Partículas Alfa, Beta y Gamma: El Gran Descubrimiento de Rutherford y Soddy. <https://rinconeducativo.org/es/recursos-educativos/particulas-alfa-beta-gamma-descubrimiento-rutherford-soddy/>
- García Paz, F. A., Gonzalez Romero, Y. A., & Zalakeviciute, R. (2019). Radon (^{222}Rn) concentrations in the touristic Jumandy cave in the Amazon region of Ecuador. *Journal of Radiation Research*, 60(6), 759–767. <https://doi.org/10.1093/jrr/rrz064>
- Humanante, B. F., Giroletti, E., Idrovo, J., Monnin, M., Pasinetti, R., & Seidel, J. L. (1990). Radon signals related to seismic activity in Ecuador, March 1987. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 132(3), 505–520. <https://doi.org/10.1007/BF00876926>
- IAEA. (1981). *URANIUM DEPOSITS IN LATIN AMERICA: GEOLOGY AND EXPLORATION*, 1981.
- IAEA. (1993). *HIGH LEVELS OF NATURAL RADIATION*.

IAEA. (2006). *Safety Reports Series No. 49 Assessing the Need for Radiation Protection Measures in Work Involving Minerals and*. IAEA. <http://www.iaea.org/books>

Ibraheem, A. A., El-Taher, A., & Alruwaili, M. H. M. (2018). Assessment of natural radioactivity levels and radiation hazard indices for soil samples from Abha, Saudi Arabia. *Results in Physics*, 11(September), 325–330. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.09.013>

IIGE. (2017). *Mapa geológico de la república del Ecuador*.

IIGE - Instituto de Investigación Geológico y Energético. (2017). *Mapa geológico de la república del Ecuador*. <https://www.geoenergia.gob.ec/mapas-geologicos/>

Jørgensen, P. M., & León-Yáñez, S. (1999). Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador. *Monogr. Syst. Bot. Missouri Bot. Gard.*, 75(i–viii), 1182.

Kamunda, C., Mathuthu, M., & Madhuku, M. (2016). An assessment of radiological hazards from gold mine tailings in the province of Gauteng in South Africa. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(1). <https://doi.org/10.3390/ijerph13010138>

Kardan, M. R., Fathabdi, N., Attarilar, A., Esmaceli-Gheshlaghi, M. T., Karimi, M., Najafi, A., & Hosseini, S. S. (2017). A national survey of natural radionuclides in soils and terrestrial radiation

- exposure in Iran. *Journal of Environmental Radioactivity*, 178–179, 168–176. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.08.010>
- Lanzo, G., Basile, S., Brai, M., & Rizzo, S. (2010). Volcanic products of Lipari (Aeolian Islands, Italy): Multivariate analysis of petrographic and radiometric data. *Radiation Measurements*, 45(7), 816–822. <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2010.04.003>
- Lariviere, D., & Guérin, N. (2010). Radionuclides in the Environment. In *Radionuclides in the Environment* (1st ed., pp. 1–15). Ltd, John Wiley & Sons Registered. <http://www.mrw.interscience.wiley.com/eic/>
- Larrea, E. (1986). *INSTITUTO DE ALTOS ESTUDIOS NACIONALES. XIII Curso Superior de Seguridad Nacional y Desarrollo.*
- Lee, J. K. W. (2013). *Ar–Ar and K–Ar Dating BT - Encyclopedia of Scientific Dating Methods* (W. J. Rink & J. Thompson (eds.); pp. 1–27). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6326-5_40-1
- Lynch, J. D., & Duellman, W. E. (1980). The *Eleutherodactylus* of the Amazonian slopes of the Ecuadorian Andes (Anura: Leptodactylidae). *Miscellaneous Publication*, 69(69), 1–86. <https://doi.org/10.5962/bhl.title.16222>
- Mietelski, J. W. (2010). Anthropogenic Radioactivity. *Radionuclide in the Environment*, 19–34.

- Minero, A. de R. y C. (2026). *Agencia de Regulación y Control Minero*.
<https://controlminero.gob.ec/>
- Nakamura, T. (2008). Cosmic-ray neutron spectrometry and dosimetry.
Journal of Nuclear Science and Technology, 45, 1–7.
<https://doi.org/10.1080/00223131.2008.10875772>
- NASA. (2013). *National Aeronautics and Space Administration*.
 Sources of Ionizing Radiation in Interplanetary Space.
<https://science.nasa.gov/resource/sources-of-ionizing-radiation-in-interplanetary-space/>
- National Geographic. (2023). *National Geographic*. Esta Partícula
 Desafía El Modelo Estándar de Física de Partículas.
https://www.nationalgeographic.com.es/ciencia/esta-particula-desafia-el-modelo-estandar-de-fisica-de-particulas_18130
- Patterson, H. W., & Thomas, R. H. (1972). *Radiation and risk the source data*.
- Pérez, M., Chávez, E., Echeverría, M., Córdova, R., & Recalde, C. (2018). Assessment of natural background radiation in one of the highest regions of Ecuador. *Radiation Physics and Chemistry*, 146, 73–76. <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.01.002>
- PNUMA. (2016). *RADIACIÓN EFECTOS y FUENTES*. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.,
<https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790>

- Pourrut, P. (1983). Los climas del Ecuador: fundamentos explicativos. *Centro Ecuatoriano de Investigaciones Geográficas*, 7–41. http://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers11-10/21848.pdf
- Pucha, G. Armijos, V.Flores, B.Recalde, C. (2025). Estimating ambient gamma dose rate in the oil town of Pacayacu, Ecuador. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, 13(2 SE-Articles), e2818. <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2025.2818>
- Pucha, G. (2025). *Caracterización de material radioactivo de origen natural en la provincia de Tungurahua, Chimborazo y Azuay*. <https://dspace.esPOCH.edu.ec/items/3f046d02-b282-4fa8-96ee-d17dcfd6c6f2/full>
- Ramachandran, T. V. (2011). *Background radiation , people and the environment*. 9(2), 63–76.
- Reino, W., Pucha, G., Recalde, C., Tene, T., & Cadena, P. (2018). Occurrence of radioactive materials in pyroclastic flows of Tungurahua volcano using gamma spectrometry. *AIP Conference Proceedings*, 2003. <https://doi.org/10.1063/1.5050366>
- Saini, K., & Bajwa, B. S. (2017). Mapping natural radioactivity of soil samples in different regions of Punjab , India. *Applied Radiation and Isotopes*, 127(November 2016), 73–81. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2017.05.013>
- Serway, R. A., & Vuille, C. (2012). *Fundamentos de Física, 9 Ed, vol 2*. <http://latinoamerica.cengage.com>

- Shahbazi-Gahrouei, D., Setayandeh, S., & Gholami, M. (2013). A review on natural background radiation. *Advanced Biomedical Research*, 2(1), 65. <https://doi.org/10.4103/2277-9175.115821>
- Tene, T., Vacacela Gomez, C., Tubon Usca, G., Suquillo, B., & Bellucci, S. (2021). Measurement of radon exhalation rate from building materials: The case of Highland Region of Ecuador. *Construction and Building Materials*, 293, 123282. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123282>
- Toulkeridis, T., Porras, L., Tierra, A., Toulkeridis-Estrella, K., Cisneros, D., Luna, M., Carrión, J. L., Herrera, M., Murillo, A., Perez Salinas, J. C., Tapia, S., Fuertes, W., & Salazar, R. (2019). Two independent real-time precursors of the 7.8 Mw earthquake in Ecuador based on radioactive and geodetic processes—Powerful tools for an early warning system. *Journal of Geodynamics*, 126(September 2018), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.03.003>
- UNSCEAR. (1993). Sources and effects of ionizing radiation: UNSCEAR 1993 report to the General Assembly. In *New York, NY: United Nations*. UNITED NATIONS PUBLICATION.
- UNSCEAR. (2000). *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION ANNEX B Exposures from natural radiation sources: Vol. I*.

UNSCEAR. (2008a). *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION Annex B Exposures of the public and workers from various sources of radiation: Vol. I.*

UNSCEAR. (2008b). *SOURCES AND EFFECTS OF IONIZING RADIATION United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation: Vol. I.*

Vélez, A., Romo, V., & Yvette, P. (2023). *MONGABAY*. The Oil Debt: More than 6,000 Polluted Sites Fester across Amazonian Countries.



Radiación ionizante natural en el Ecuador, se publicó en el mes de
septiembre de 2026.

ISBN: 978-9907-802-12-2

Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
<https://grupoblrr.com/>
publicaciones@grupoblrr.com

BIOGRAFÍA DE LOS AUTORES

Gilson Julian Pucha Amancha:

Biofísico y magíster en Física por la ESPOCH, es docente e investigador especializado en física de radiaciones, protección radiológica, dosimetría y materiales NORM/TENORM. Posee experiencia en investigación, docencia y aplicaciones nucleares. Es autor de publicaciones científicas y promueve la investigación, capacitación y uso pacífico de tecnología nuclear.

Bolívar Edmundo Flores Humanante:

Doctor en Química y magíster en Administración para el Desarrollo Educativo, cuenta con más de 35 años de trayectoria en la ESPOCH. Ha ejercido docencia, investigación y gestión académica, destacándose en química, radioquímica, dosimetría y NORM/TENORM, además de impulsar la divulgación y el uso pacífico de la tecnología nuclear.

Edmundo Rodrigo Caluña Sánchez:

Doctor en Química y magíster en Administración para el Desarrollo Educativo, cuenta con más de 20 años de experiencia docente. Su trayectoria abarca química general, inorgánica, orgánica y mineralogía, complementada con formación en investigación, proyectos y tecnologías educativas, destacándose por su compromiso con la formación científica y la innovación docente.

RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL EN EL ECUADOR

Estimado lector, el libro "Radiación ionizante natural en el Ecuador" analiza, sistematiza y divulga el conocimiento disponible sobre la radiactividad ambiental en el territorio ecuatoriano, cuyas particularidades geológicas, actividad volcánica y gradiente altitudinal configuran un entorno idóneo para la dosimetría ambiental y la protección radiológica. La obra articula los principios físicos de la radiación con la descripción de fuentes naturales primordiales, tales como los rayos cósmicos, la radiación terrestre, el radón y las series radiactivas del uranio-238, torio-232 y potasio-40.

Asimismo, el texto evalúa el impacto de los materiales radiactivos de origen natural (NORM) y aquellos tecnológicamente enriquecidos (TENORM), asociados a sectores como la minería, la industria petrolera y la fabricación de materiales de construcción. Un aporte sustancial de la publicación es la recopilación histórica de mediciones radiométricas en el país, incorporando investigaciones contemporáneas y resultados empíricos obtenidos en la provincia de Chimborazo, donde los depósitos volcánicos y la altitud permiten examinar la influencia del medio físico sobre los niveles de exposición.

Bajo un enfoque estrictamente científico, la obra descarta especulaciones predictivas sobre eventos sísmicos o volcánicos, ciñéndose a la evidencia dosimétrica experimental. Dirigido a profesionales, académicos e instituciones de monitoreo ambiental, el libro promueve el establecimiento de líneas base nacionales para fundamentar la toma de decisiones técnicas sin generar alarmismos infundados.



Grupo Editorial BLR
Ecuador
Cel: +593 98 320 4362
[https://grupoblrl.com/
publicaciones@grupoblrl.com](https://grupoblrl.com/publicaciones@grupoblrl.com)

ISBN: 978-9907-802-12-2



Escuela Superior
Politécnica de Chimborazo