

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Trabajo experimental previo a la obtención del título de:

Ingeniero Ambiental

Tema:

“DETECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE RADIO-226 Y EXHALACIÓN DE
RADÓN-222 EN ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE
CUENCA, ECUADOR”

AUTOR:

GABRIEL SEBASTIÁN CARPIO BRITO

DIRECTOR:

TONY JESÚS VILORIA ÁVILA.

Cuenca, octubre de 2016

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo Gabriel Sebastián Carpio Brito con documento de identificación N° 0104441415 , manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado intitulado: “DETECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE RADIO-226 Y EXHALACIÓN DE RADÓN-222 EN ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Ambiental, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Nombre: Gabriel Sebastián Carpio Brito.

Cédula: 0104441415.

Fecha: octubre de 2016.

CERTIFICACION

Yo declaro que bajo mi supervisión fue desarrollado el trabajo de titulación: “DETECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE RADIO-226 Y EXHALACIÓN DE RADÓN-222 EN ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR”, realizado por Gabriel Sebastián Carpio Brito, obteniendo proyecto de titulación que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, octubre 2016

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Tony Jesús Viloria Ávila', enclosed within a large, hand-drawn oval shape.

Tony Jesús Viloria Ávila.

No. Pasaporte: 083893643

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Yo, Gabriel Sebastián Carpio Brito, con número de cédula 0104441415 de “DETECCIÓN DE LAS CONCENTRACIONES DE RADIO-226 Y EXHALACIÓN DE RADÓN-222 EN ALGUNOS MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DE LA CIUDAD DE CUENCA, ECUADOR” certifico que el total contenido de este Proyecto de Titulación es de mí responsabilidad y autoría.

Cuenca, octubre de 2016



Gabriel Sebastián Carpio Brito

0104441415

RESUMEN

A nivel general se estima que los materiales de construcción pueden aportar un 20% en la concentración total de radón en los domicilio, con factores que varían las concentraciones de radón que se aportan como la porosidad de los materiales, la concentración en el mismo material, la superficie y su acabado entre otras. El ^{226}Ra y el gas ^{222}Rn , representan la exposición a la radiactividad natural más importante en la actualidad, llegando a eventos extremos como ser la primera causa en desarrollo de cáncer de pulmón, entre los no fumadores.

En el presente estudio se buscó estimar las concentraciones y exhalaciones de ^{226}Ra y ^{222}Rn en algunos materiales de construcción que se distribuyen y fabrican en la ciudad de Cuenca, para lo cual se pulverizaron quince muestras de diferentes materiales de construcción y colocaron en un envase de vidrio herméticamente sellado, en cuyo extremo interior de este se ubicó un detector LR-115 tipo II, de 1.5 cm x 1.5cm, por 100 días.

De los materiales analizados encontramos que el ladrillo 2 tuvo los valores más altos de exhalación de radón por masa y área, respectivamente ($21.31 \text{ bq kg}^{-1} \text{ h}$, y $1107 \text{ bq m}^{-2} \text{ h}$), mientras que la arena 3 ($0.233 \text{ bq kg}^{-1} \text{ h}$, y $12.09 \text{ bq m}^{-2} \text{ h}$) y el cemento blanco ($0.240 \text{ bq kg}^{-1} \text{ h}$, y $12.45 \text{ bq m}^{-2} \text{ h}$) los más bajos. Estos resultados justifican estudios posteriores más detallados.

ÍNDICE GENERAL

Introducción	10
Planteamiento del problema.....	11
Delimitación.....	13
Explicación del problema	14
Objetivo General.....	14
Objetivo Específico.....	14
Marco Teórico.....	14
1. Movimiento de átomos y transporte de materia, introducción a la difusión.....	14
1.1 Antecedentes de la Difusión: El movimiento Browniano.....	15
1.2 Velocidad de Difusión.....	17
1.3 Energía de activación para la difusión	18
1.4 Mecanismos de difusión.....	19
1.5 Difusión por vacancia:	19
1.6 Difusión intersticial:.....	19
1.7 Factores que afectan la difusión y energía de activación	20
1.8 Difusión del Radón a través de materiales de construcción.....	20
2. Radioactividad y sus orígenes.....	22
2.1 Radioactividad natural:	23
2.2 Fuentes antropogénicas:	24
2.3 Unidades de Radiación.....	26
3. Tipos de Radiación	26
3.1 Desintegración Alfa.....	27
3.2 Desintegración Beta	27
3.3 Desintegración Gamma.....	27
3.4 Ley de decaimiento Radiactivo.....	28
4. Interacción de la radiación con la materia.....	29
4.1 Absorción Fotoeléctrica:	30
4.2 Dispersión Compton y efecto Compton.....	31
4.3 Producción de pares (electrón-positrón) o materialización.....	33
5. Radio y Radón.....	34
5.1 El Radio y sus Generalidades.....	34

5.2	Fuentes de radio.....	34
5.3	Afecciones a la salud.....	35
5.4	El radón y sus generalidades.....	36
5.5	Fuentes de radón.....	36
5.6	Afecciones a la salud.....	37
6.	Dosimetría Interna, Generalidades.....	37
6.1	Dosimetría Interna: Radio.....	39
6.2	Dosimetría Interna: Radón.....	39
7.	Dosis límite permitida para personas ocupacionalmente expuestas a la radiación en Ecuador.	41
8.	Marco Metodológico.....	42
8.1	Toma de muestras.....	42
8.2	Construcción del contenedor de muestras.....	42
8.3	Preparación de la muestra.....	44
8.4	Tratamiento químico de los detectores sólidos de trazas nucleares DSTN.....	45
8.5	Conteo de trazas nucleares.....	47
8.6	Cuantificación de la exhalación de radón y concentración de Radio.....	48
9.	Resultados y discusión.....	52
10.	Conclusiones.....	59
11.	Bibliografía.....	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Movimiento Aleatorio Browniano, Fuente: Laboratorio Nacional de Investigación y Servicios de Resonancia Magnética en Sólidos, 2005.....	16
Figura 2: Fenómeno de la difusión, estado inicial y final; Fuente: Universidad de Valencia; Dpto. de Química Física.	17
Figura 3: Perfiles de la evolución de concentración en función del tiempo del fenómeno de Difusión. Fuente: Universidad de Valencia; Dpto. de Química Física.	17
Figura 4: Energía de Activación Q. Mayor demanda de energía en la difusión Intersticial en comparación a la difusión por vacancia. Fuente: Askeland, 1998.....	18
Figura 5: Mecanismo de difusión por vacancias (Izquierda); Mecanismo de difusión Intersticial. Fuente UTN, 2011	20
Figura 6: Esquema de fuentes típicas de radón y rutas de entrada, fuente: NTP 440: Radón en ambientes interiores.	21
Figura 7: Fuentes de exposición a la radiación de la población mundial y distribución promedio. (Fuente: OMS, 2004)	23
Figura 8: Ley de decrecimiento o decaimiento radioactivo. Fuente: Instituto Latinoamericano de la comunicación educativa.....	29
Figura 9: Esquema de un átomo tras la interacción fotoeléctrica, Fuente: (Pharoah, 2002)	30
Figura 10: Esquema del efecto Compton tras la interacción de un fotón con un átomo. Fuente: White & Pharoah, 2002.....	32
Figura 11: Dispersión Compton de un electrón, en donde cede energía experimenta un cambio de dirección. Fuente: Medicina Nuclear, Tercera Edición, 2006.	32
Figura 12: Interacción entre el campo nuclear y un fotón, en donde se aniquila el fotón y se generan partículas con cargas opuestas (electrón y positrón). Fuente: SERGAS, 2006	33
Figura 13: Regiones de predominancia de los tres tipos de interacciones, (Número atómico eje de las ordenadas y energía del fotón incidente eje de las básicas). Fuente: UNMSM, 2006.	34
Figura 14 (Izquierda): Adaptación de imanes en la cubierta del envase.	43
Figura 15(Derecha): Lámina de metal que aislará el detector por quince (15) días.	43
Figura 16: Construcción y almacenamiento de la muestra	44
Figura 17: Detectores sumergidos en solución de hidróxido de Sodio.....	45
Figura 18: Equipo empleado para el baño maría y revelado de detectores	45
Figura 19: Detectores sumergidos en agua destilada y en agitación magnética.	46
Figura 20: Etapa final de revelado, secado de detectores LR-115.....	46
Figura 21: Microscopio empleado para el conteo de trazas nucleares.....	47
Figura 22: Detector con menor número de trazas, perteneciente a la sub-muestra 1 de arena.	48
Figura 23: Detector procedente de la sub-muestra 2 de ladrillo, cuyo número de trazas fue el mayor de entre todas las muestras.....	48
Figura24: Correlación entre la concentración de Radón y la Exhalación por área; donde el factor de correlación R2 es igual a 1.	55
Figura25: Correlación entre la concentración de Radón y la Exhalación por Masa; donde el factor de correlación R2 es igual a 1.	55
Figura 26: Gráfica comparativa entre espacio poroso y concentración de radón.	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites de Dosis para radiación en Ecuador.	41
Tabla 2: Resultados de concentración de radio226 y radón222, además de la exposición al radón integrado	52
Tabla 3: Resultados de exhalación de radón226 por masa y por área, además de índice alfa y exposición anual en unidades rem.	54
Tabla 4: Propiedades físicas de los materiales de construcción investigados.	56
Tabla 5: Exposición a las concentraciones de radón en unidades rem, y periodos anuales.	58

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Decaimiento o desintegración Alfa.....	27
Ecuación 2: Decaimiento o desintegración Beta.....	27
Ecuación 3: Decaimiento o desintegración Gamma.....	28
Ecuación 4: Ley de Decaimiento Radiactivo.....	28
Ecuación 5: Absorción Fotoeléctrica, y Compton.....	31
Ecuación 6: Densidad de trazas.....	48
Ecuación 7: Tasa de densidad de trazas.....	49
Ecuación 8: Exposición al radón Integrado.....	49
Ecuación 9: Exhalación de radón por área.....	50
Ecuación 10: Exhalación de radón por masa.....	50
Ecuación 11: Concentración de radón.....	50
Ecuación 12: Concentración de radio.....	50
Ecuación 13: Índice alfa.....	51
Ecuación 14: Exposición anual a la radiación por exhalación de radón.....	52

Introducción

En primer lugar, debemos reconocer que los seres humanos y el ecosistema en general se encuentran diariamente expuestos en menor o mayor medida a concentraciones de radioactividad; Esto se debe a que nuestro mundo es radiactivo por naturaleza desde su origen (González A. J., 2011), y por otro lado ciertos episodios nucleares antropogénicos han influenciado al crecimiento de manifestaciones de radioactividad (González & Rabin, 2011). Para el estudio de este fenómeno radiactivo se emplea la radioecología, ésta ciencia estudia las sustancias radioactivas y su interacción con la naturaleza, es decir; estudia su origen, su forma de transferencia y cómo actúa el ecosistema tras ciertos periodos de exposición (IPSN, 2001).

Aunque la interacción de las emisiones radioactivas de origen antropogénico o natural con el entorno sean las mismas (Pascual, 2000), las emisiones radioactivas a las que mayormente estamos expuestos son de origen natural. La primera fuente de radiación natural es el espacio que a través del bombardeo de rayos cósmicos aporta con radiación gama, partículas alfa y beta, además de protones y núcleos pesados a la tierra, aunque en pequeñas cantidades gracias a la atmósfera que actúa como un filtro ante estos elementos (González & Rabin, 2011). La segunda fuente reside en la tierra, ya que algunos elementos que la conforman son emisores directos o indirectos de radiación, tal es el caso de Uranio³²⁸, Torio²³², y el Potasio⁴⁰ (Sharma, Singh, Chinna, & Tripathi, 2016).

Esta información presentada con brevedad sobre la exposición a la radioactividad es suficiente para realizarnos la pregunta: ¿Qué tanto conocemos acerca de las concentraciones naturales radioactivas a las que estamos expuestos?

El presente trabajo nace en función esta pregunta ya que se enfoca en la detección de las concentraciones de Radio²²⁶ y exhalación de Radón²²² en materiales de construcción dado que

muchos de estos materiales contienen pequeñas cantidades de Elementos Radiactivos naturales provenientes de cadenas de decaimiento del U^{238} y Th^{232} (Sharma, Singh, Chinna, & Tripathi, 2016).

El estudio se realizó en la ciudad de Cuenca, desde el sector de San Pedro del Cebollar hasta el centro de Racar ya que esta zona alberga locales destinados al comercio de materiales de construcción y fabricación de ladrillos, bloques, entre otros (JSP, 2011). Al ser esta una zona estratégica de abastecimiento y producción de materiales de construcción fue seleccionada como origen de las muestras a analizar.

Es importante recalcar que al no existir información, recolección de datos o experimentación previa en este ámbito no sabe con certeza cuál es el grado de concentración de elementos radiactivos en los materiales de construcción en la ciudad de Cuenca. Además es de suma importancia la determinación del riesgo al cual se expone la comunidad al inhalar los elementos radiactivos provenientes de la desintegración radiactiva del radio-226.

El muestreo abarcó la recolección de cinco tipos de materiales de construcción y tres sub-muestras de cada uno de ellos, en total quince muestras en las que se presentan ladrillo, bloque, arena, cemento blanco y cemento gris, a través de este trabajo se pretende dar inicio a una nueva línea de investigación en la carrera de ingeniería ambiental de la universidad politécnica salesiana, sede cuenca, ecuador, como es la radioecología.

Planteamiento del problema.

La corteza terrestre alberga muchas clases de elementos, en donde muchos de ellos al estar en contacto con elementos químicos como el Uranio (^{238}U), el Torio (^{232}Th) y los productos resultantes de su decaimiento poseen cierta cantidad de elementos NORM (por sus siglas en inglés

Naturally Occurring Radioactive Materials), es decir son materiales radiactivos de origen naturales (Belafrites, 2008). Estos materiales se convierten en una amenaza cuando la concentración NORM es elevada, ya que al ser radiactivos son agentes precursores de eventos cancerígenos (Lavinia, Constantin, & Dorin, 2014).

Los materiales de construcción son elementos que se extraen o se procesan a partir del suelo (ladrillos, cemento, yeso, arena, entre otros), muchos de ellos presentan radionucleidos que son átomos con un núcleo radiactivo. Estos materiales de construcción son precursores de la radiación dentro y fuera de los hogares, en función de las características geoquímicas de los materiales de construcción, y de la geología de la zona (Lavinia, Constantin, & Dorin, 2014). Pacheco *et. Al* (2011) afirma: que en la actualidad varios edificios o viviendas contienen materiales de construcción tóxicos, esto se debe a que muchos de los profesionales o responsables de ciertas obras de construcción desconocen o no tienen los medios para cuantificar la toxicidad de los materiales de construcción.

Un caso importante de contaminación radioactiva natural se relaciona con el radón, el cual es un gas incoloro, inodoro e insípido que proviene generalmente de zonas graníticas o con presencia de ciertos fosfoyesos (Chen, Rahman, & Atiya, 2010). Identificado en el año de 1900 por Friederich Dorn y catalogado como cancerígeno por el Centro Internacional de Investigadores sobre el Cáncer en 1988 (CIIC, 1988).

El radón tras ser inhalado no sufre procesos de metabolización ya que es un gas inerte y los productos de desintegración del radón de vida corta (^{218}Po y ^{214}Po) tienden a disolverse o concentrarse en los tejidos biológicos pulmonares afectando el ADN, las células afectadas por esta irradiación pueden sufrir modificaciones o incluso morir. Este gas al ser gas precursor de las radiaciones ionizantes y afectar al sistema respiratorio como se explicó con anterioridad representa

un riesgo para el desarrollo de cáncer pulmonar (Pascual, 2000)(...) (OMS, Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública, 2015)(...) (Zielinski, A.C, Shilnijova, & Veiga, 20008).

La medición de las concentraciones de radio (Ra^{222}) y radón (Rn^{226}) en los diferentes materiales de construcción es primordial ya que tras cuantificar las concentraciones de estos elementos puede ser el primer paso para evaluar los posibles riesgos radiológicos para la salud humana, y desarrollar una normativa que se aplique al momento de usar o manejar estos materiales (Lavinia, Constantin, & Dorin, 2014). Por otro lado se conoce que los seres humanos permanecen en el interior de un domicilio el 80% de su tiempo, lo que aumenta la posibilidad de exposición a la radiación natural en caso de que los materiales de construcción contengan NORM (UNSCEAR, 2000) e intensifica la importancia de conocer las concentraciones de estos elementos Radiactivos en los materiales de construcción ya que se considera que para la aparición de cáncer se requiere solamente una mutación y la proliferación de la misma (OMS, Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública, 2015).

Delimitación

- **Espacial:** El estudio en se desarrolló en la parroquia San Pedro del Cebollar, ciudad de Cuenca, las muestras se adquirieron en este sector que se consideró estratégico por la fabricación de tejas, ladrillos, bloques además de distribuir materiales de construcción.
- **Académica:** Bibliotecas virtuales y físicas, además de los laboratorios de Ingeniería Ambiental, y también de información indexada colgada en la red.

Explicación del problema

El problema consiste en el incremento del riesgo de adquirir cáncer de pulmón al exponernos a la progenie del radio-226 contenido en los materiales de construcción, exhalados por éste durante el proceso de decaimiento y acumulados en los poros de los mismos.

Objetivo General

Detectar los niveles de radio-226 y exhalación de radón-222 presentes en algunos materiales de construcción que se expenden y utilizan en la ciudad de Cuenca.

Objetivo Específico

- Seleccionar muestras representativas de los materiales de construcción.
- Determinar los niveles de concentración de radio-226 y exhalación de radón-222 en las muestras seleccionadas.
- Generar una base de datos.
- Analizar los resultados obtenidos.

Marco Teórico

1. Movimiento de átomos y transporte de materia, introducción a la difusión.

La difusión es un fenómeno físico por el cual los átomos se mueven a través de un material buscando el equilibrio de sus concentraciones. Es una modalidad de transporte de materia donde las partículas de un soluto migran bajo la acción de choques aleatorios con las partículas del disolvente y viceversa, hasta que los átomos del soluto y solvente queden uniformemente distribuidos (Askeland, 1998)(...) (Vázquez & Leonardo, 2010). Para comprender de mejor forma este movimiento de partículas es necesario revisar sus bases, ya que para deducir el fenómeno de

la difusión y muchos otros más fue necesario estudiar el denominado Movimiento Browniano (Lavenda, 2005).

1.1 Antecedentes de la Difusión: El movimiento Browniano

El movimiento Browniano llamado así en honor al botánico Robert Brown en 1887 es la manifestación del movimiento aleatorio de partículas inmersas en un fluido; Brown observó a través del microscopio que partículas de polen y sustancias inorgánicas suspendidas en líquidos realizan movimientos caóticos, posteriormente observaba que este comportamiento se repetía en partículas pequeñas de vidrio y minerales, descartó el origen orgánico de este evento y señaló que se trataba de un fenómeno físico sin ahondar en el tema (Ramírez, 2007) (...) (Santamaría, 2013).

El trasfondo de este movimiento y su explicación tuvo lugar a principios del siglo XX, cuando Albert Einstein en 1905 a través de las bases teóricas y experimentales de la teoría atómica afirmó que una partícula macroscópica inmersa en el fluido seguirá el movimiento aleatorio descrito por Brown, además Einstein establecería las primeras implicaciones cuantitativas de la teoría cinética del movimiento Browniano (Lavenda, 2005).

Einstein explicó este fenómeno por medio de la naturaleza atómica de los fluidos. Su trabajo enunciaba que si los componentes básicos de un fluido (átomos o moléculas) tienen un movimiento aleatorio, entonces una partícula intrusa en este fluido colisionará con los componentes básicos sin dirección e intensidad establecida, esto explica el movimiento al azar de las moléculas sobre el medio de suspensión líquido o gaseoso (Ver Figura 1), además del desencadenamiento de una marcha tridimensional al azar (Gennaro, 2003).

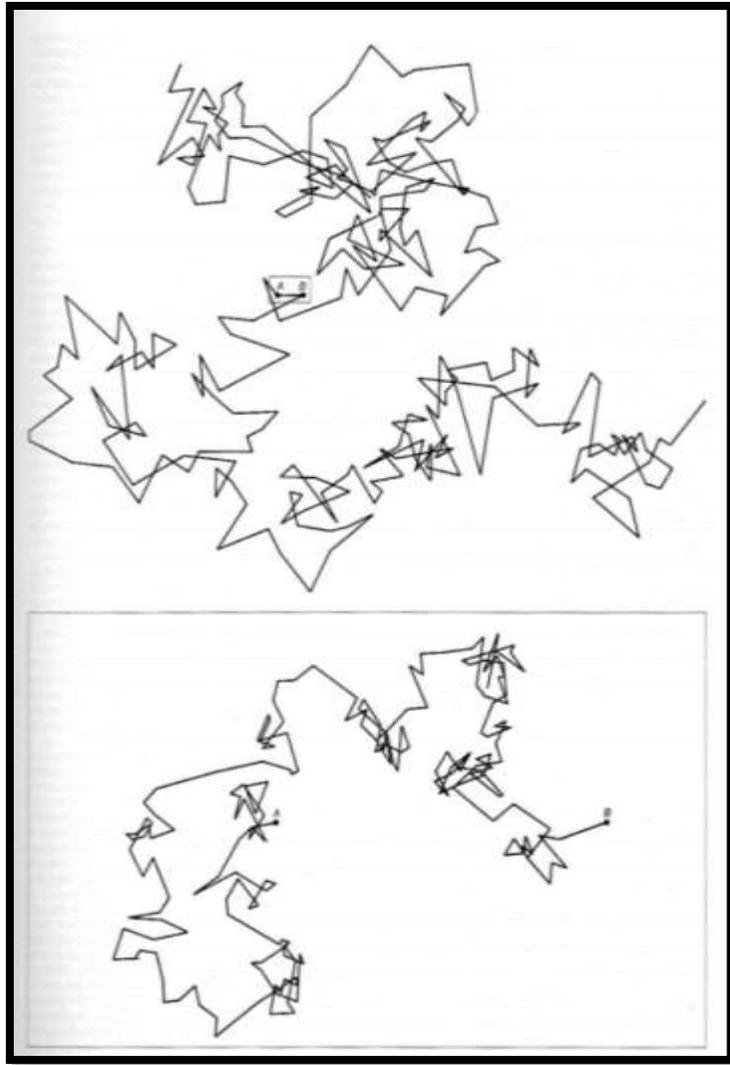


Figura 1: Movimiento Aleatorio Browniano, Fuente: Laboratorio Nacional de Investigación y Servicios de Resonancia Magnética en Sólidos, 2005

Tras esta afirmación Einstein logró segmentar en dos partes sus resultados. La primera parte, enfocada a las matemáticas deducía una ecuación que permitía conocer la trayectoria de una partícula browniana en suspensión a través de un fluido; y la segunda parte relaciona la tasa cuantificable de la difusión de la partícula con respecto a magnitudes físicas (Lavenda, 2005).

1.2 Velocidad de Difusión.

Para resumir como se realiza el transporte de masa o átomos mediante difusión nos ayudamos con la primera ley de Fick, se debe suponer que existen dos contenedores separados por un elemento impermeable (Ver Figura 2).

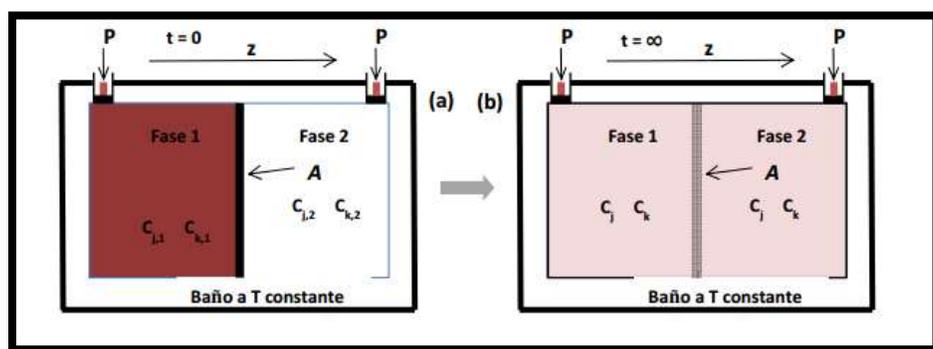


Figura 2: Fenómeno de la difusión, estado inicial y final; Fuente: Universidad de Valencia; Dpto. de Química Física.

Cada uno de ellos posee concentraciones de dos tipos de sustancias (j y k). Al retirar el elemento impermeable ambas concentraciones entran en contacto y el movimiento molecular crea un flujo llamado difusión (Tuñón & Silla., 2010). La velocidad a la cuál sucede este evento según Fick viene dada por: $J = -D \Delta C \Delta x^{-1}$; En donde J representa el flujo (átomos/cm² * s), D es el coeficiente de difusión (cm²/s) y $\frac{\Delta c}{\Delta x}$ representa el o gradiente de concentración (átomos/cm³ * cm) este flujo está en función de magnitudes como presión, temperatura y tamaño de los átomos (Ver Figura 3).

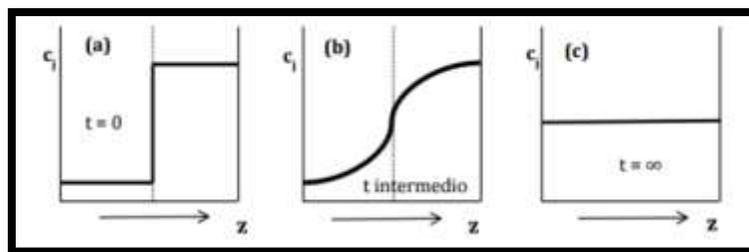


Figura 3: Perfiles de la evolución de concentración en función del tiempo del fenómeno de Difusión. Fuente: Universidad de Valencia; Dpto. de Química Física.

Es importante destacar que el coeficiente de difusión es la relación entre: la diferencia de concentración versus la distancia recorrida antes de lograr el equilibrio; este fenómeno ocurre al momento cuando dos materiales de distinta composición (gas o líquido) entran en contacto con una superficie sólida (Askeland, 1998).

1.3 Energía de activación para la difusión

Ya que la difusión es un mecanismo de transporte, es necesario que exista una energía de fondo que permite el movimiento de átomos (Ver Figura 4). La energía que permite el movimiento o el cambio de posición se denomina energía de activación (Q), esta energía debe ser lo suficientemente elevada para romper la barrera de equilibrio inicial en la que se encuentra el átomo, generalmente la difusión intersticial requiere menor energía que la difusión por vacantes (Askeland, 1998). Al tratarse un fenómeno que está en función de la temperatura, a mayor calor mayor energía capaz de inducir al movimiento de átomos (Valdez, 2001).

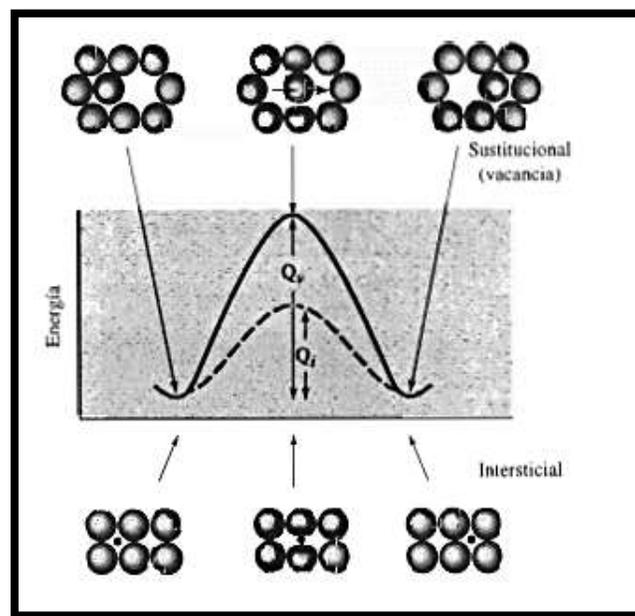


Figura 4: Energía de Activación Q . Mayor demanda de energía en la difusión Intersticial en comparación a la difusión por vacancia. Fuente: Askeland, 1998.

1.4 Mecanismos de difusión

Está comprobado que aún en los materiales sólidos más puros existe un movimiento de átomos, a este fenómeno se lo conoce como autodifusión, los átomos se mueven de una manera predecible con la finalidad de generar composiciones homogéneas y uniformes llegando a un estado de equilibrio (Salcido, Rechtman, & Calles, 1990). Se tiene conocimiento que existen dos mecanismos (Ver Figura 4) principales de difusión de átomos la difusión por vacancia y difusión intersticial (Askeland, 1998).

1.5 Difusión por vacancia:

Se refiere al abandono de un átomo de su red para llenar una vacante cercana, dando lugar a una vacante en la red de la cual se desprendió. A lo largo del tiempo se forma un flujo de vacancias en ambos sentidos y se lo denomina difusión por vacancia, el número de vacancias aumenta al aumentar la temperatura (Valdez, 2001).

1.6 Difusión intersticial:

Cuando en el elemento está presente un átomo intersticial pasa a otro sitio intersticial sin necesidad de vacancias, ya que la cantidad de espacios intersticiales es mayor al número de vacancias, siendo este método de transferencia mucho más rápido que la difusión por vacancia (Askeland, 1998), en el caso del radón el gas emplea este mecanismo de difusión, el gas a través de intersticios del material de construcción alcanza la superficie de separación y llega al aire que respiramos (Quindós, y otros, 1989).

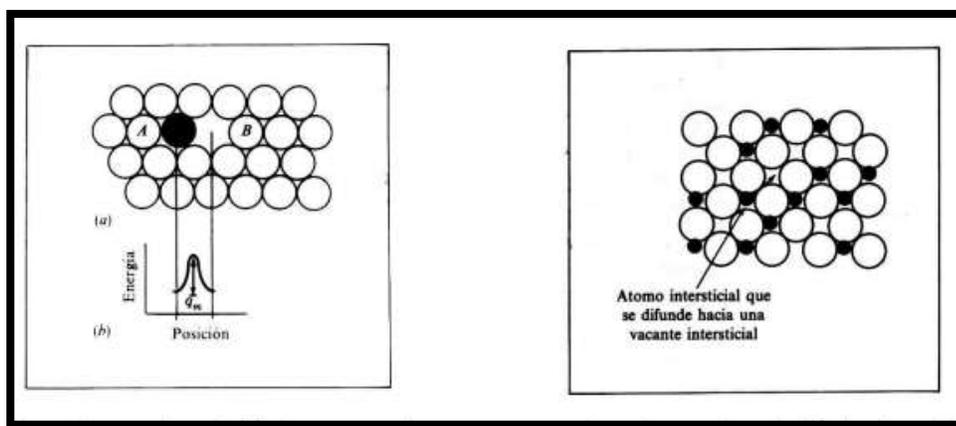


Figura 5: Mecanismo de difusión por vacancias (Izquierda); Mecanismo de difusión Intersticial. Fuente UTN, 2011

1.7 Factores que afectan la difusión y energía de activación

Como se mencionó la difusión depende de una cantidad de energía llamada energía de difusión, la cantidad requerida está en función principalmente del tipo de mecanismo de difusión así como de los elementos en contactos. El mecanismo que mayor energía demanda es el de vacantes. Por otro lado los elementos que presentan estructuras abiertas requieren menos energía para dar lugar a la difusión, así como los átomos de menor tamaño. Finalmente la difusión requiere tiempo para formar el flujo responsable del intercambio de átomos, el tiempo depende de la temperatura, a mayor temperatura menor periodo (Askeland, 1998).

1.8 Difusión del Radón a través de materiales de construcción.

En resumen se puede decir que la difusión es el movimiento, o migración de átomos desde zonas de alta concentración hasta aquellas donde la concentración es baja, siendo un movimiento molecular espontaneo y al azar (Borja, 2009), el radón al ser un gas noble posee esta característica de migración por medio de la difusión, el radón se mueve con respecto al medio ocupando todo el espacio del cual se pueda disponer (IAEA, 1990).

A nivel general se estima que los materiales de construcción aportan un 20% de concentración total de radón en domicilios gracias al fenómeno de difusión molecular (Ver Figura 6), la migración o difusión de radón no depende solamente de la procedencia del material y la radiactividad que posee, existen otros factores como el tamaño y forma del soluto, viscosidad del aire dentro de la vivienda, temperatura y porosidad de los materiales que determinarán la facilidad de difusión de radón (Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanguán, 2011).



Figura 6: Esquema de fuentes típicas de radón y rutas de entrada, fuente: NTP 440: Radón en ambientes interiores.

Por lo tanto definir la exhalación de radón a través de materiales de construcción por medio de una constante sería erróneo ya que se debe estudiar el comportamiento de difusión de este gas a través de todas sus variables, solamente en el caso de presentarse condiciones controladas se podrá determinar un valor constante de migración de gas radón desde los materiales de construcción hacia interiores (IAEA, 1990).

Por otro lado existen ecuaciones capaces de determinar la difusión efectiva de ^{222}Rn en materiales de construcción, a esta medición se la denomina tasa de exhalación y viene dada por condiciones como la humedad de la muestra, la temperatura del aire, el tamaño del grano entre otros; la determinación de la tasa de exhalación es fundamental en caso de necesitar la concentración exacta de radón en el ambiente ya que se estima una corrección del 30% en las cuantificaciones de este gas (Tuccimei, Moroni, & Norcia, 2006). La precisión en la medición de difusión de radón viene dadas por la sofisticación del modelo de cuantificación y las variables que intervengan en ellas y puedan ser controladas (Alrabaia, 2015).

2. Radioactividad y sus orígenes.

El fenómeno de la radiactividad ha existido y existirá a lo largo del tiempo de una forma natural, sin embargo no fue detectada hasta el año de 1895 por el Francés Henry Becquerel en 1865 (Ahad, 2010). En resumen es un fenómeno por el cual ciertos átomos cambian su estructura; puede ser originado por fuentes naturales y antropogénicas (Ver Figura 1), la radioactividad ocasiona la emisión espontánea de partículas y/o radiación electromagnética por medio de un núcleo padre, que se transmuta por lo general en otro núcleo distinto, llamado núcleo hijo (Núñez-Lagos, 2011).

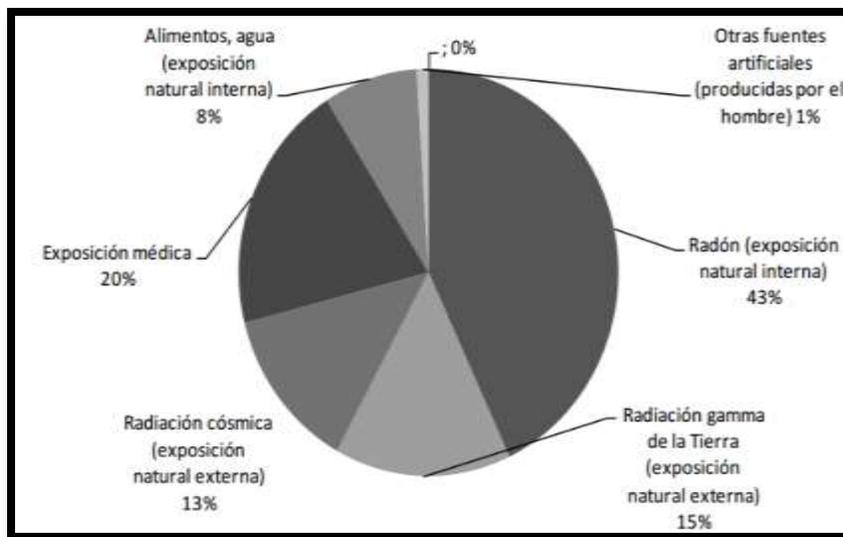


Figura 7: Fuentes de exposición a la radiación de la población mundial y distribución promedio. (Fuente: OMS, 2004)

A estos núcleos generadores de radiaciones ionizantes se los denomina núcleos atómicos inestables, y reciben el nombre de radionucleidos o radioisótopos. Estos átomos pueden emitir espontáneamente partículas cargadas energéticamente o fotones, rompiéndose en núcleos más pequeños perdiendo la identidad inicial (González & Rabin, 2011). Las dos fuentes principales de radiactividad son:

2.1 Radioactividad natural:

Al tocar el tema de radioactividad natural, nos referimos a todo el medio ambiente en el cual nos desenvolvemos ya que el suelo, el aire y el agua contienen una multitud de radionucleidos y por lo tanto son fuentes emisoras de radioactividad; además muchos de sus núcleos hijos también poseen características radioactivas dando origen a largas familias de radionucleidos (Núñez-Lagos, 2011).

Los radionucleidos que se encuentran en la naturaleza se los denomina radionucleidos naturales, estos átomos tuvieron su origen desde la formación de la tierra. Se han detectado 15

especies de radionucleidos primordiales, entre los cuales sobresale la actividad del potasio (K^{40}), dos isótopos del uranio que son (U^{238}), y (U^{232}); además el uranio es el predecesor de radio y radón, los cuales tienen alta significancia para los seres humanos ya que el periodo de vida para el radio es 1.600 años lo que significa que tiene una vida larga, siendo un emisor constante de radón, el mismo que tiene un tiempo de vida promedio de 3.8 días pudiendo acumularse aumentando la concentración y los riesgos de contraer cáncer de pulmón (Rafat A. M., 2015). Sumado al potasio y el uranio la serie de decaimiento del torio (Th^{232}) representa la última fuente representativa de emisiones ionizantes ya que en la tierra su contenido es elevado, (Tzortzis, Svoukis, & Tsetos, 2004).

Además de la radiación proveniente del medio ambiente existe una fuente externa denominada radiación cósmica, consiste en el bombardeo de rayos cósmicos que son protones altamente cargados energéticamente, núcleos pesados y electrones, al interactuar con la atmósfera y sus componentes estos rayos cósmicos generan nuevos núcleos, especialmente electrones con energía alta generadores de diversas reacciones (Núñez-Lagos, 2011).

2.2 Fuentes antropogénicas:

El hombre en sus diversas actividades ha generado un sinnúmero de radionucleidos artificiales, sin embargo los resultados arrojan átomos con periodos de vida muy cortos, sin embargo estas prácticas tienen problemas de trasfondo ya que una vez utilizados el almacenamiento y disposición final no tienen un mecanismo de control eficiente (OMS, Guías para la calidad de agua potable, 2003). Las emisiones antropogénicas se pueden clasificar en cuatro fuentes, la primera fuente de radionucleidos artificiales son los procedentes de pruebas nucleares, además de los hospitales, laboratorios; la tercera son elementos combustibles que han recibido irradiación de plantas nucleares, y finalmente la cuarta fuente de radionucleidos son aquellas

industrias que trabajan con los elementos NORM, que en el proceso industrial tienden a liberar radiaciones ionizantes (Núñez-Lagos, 2011).

Los seres humanos carecemos de mecanismos u órganos que nos hagan perceptibles o capaces de detectar la radiación, sin embargo no estamos libres de las afecciones de las mismas (González & Rabin, 2011). Sin embargo se han encontrado propiedades generales de los elementos Radiactivos que nos permiten identificarlos (González, 1971):

- a. Impresionan la emulsión sensible de una placa fotográfica: Esto se da gracias que la radiación penetra la envoltura de la placa, al momento de revelar la placa fotográfica se evidencian puntos negros generados por la acción de la radiación. Esta atraviesa diferentes elementos como tejidos, madera, y metales delgados.
- b. Ionizan el aire circundante: Se da por el proceso de fijación de electrones del ambiente al material Radiactivo, este proceso genera iones.
- c. Producen fluorescencia en ciertos compuestos: Los materiales Radiactivos producen destellos de luz al alcanzar ciertos compuestos, por ejemplo el bromuro de radio junto al sulfuro de zinc causa la fluorescencia del mismo.
- d. Producen efectos fisiológicos: La radiación de diferente tipo puede ocasionar la muerte de tejidos vivos, plantas, bacterias, e incluso pequeños animales en función de la concentración y el tiempo de exposición. Pueden quemar la piel y su sanación es lenta.
- e. Emisores continuos de energía: Cuando la radiación es elevada, y en presencia de oscuridad se puede captar una luminosidad, además de calor. Esto se relaciona a la pérdida de masa, al desintegrarse los núcleos del material Radiactivo.

2.3 Unidades de Radiación

Para cuantificar o medir la radiación se emplea diversas aplicaciones entre las cuales tenemos: actividad de la fuente, exposición, dosis absorbida y dosis biológicamente equivalente (Kane & Sternheim, 2007).

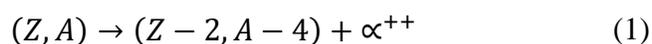
- a. La actividad de la fuente: Es la tasa de decaimiento de un material Radiactivo, es decir el número de núcleos que disminuyen del elemento original, su unidad física es el *curie*, y viene dado por: $1 \text{ Curie (Ci)} = 3.7 \times 10^{10}$ desintegraciones por segundo. Mientras que en el SI la unidad es el *becquerel* (Bq) que cuantifica una desintegración por segundo.
- b. La exposición: Indica la cantidad de radiación que llega a un material, depende plenamente de las características del haz de radiación.
- c. Dosis absorbida – magnitudes físicas: El material absorbe energía proveniente del haz Radiactivo, depende únicamente de las propiedades del material. Sus unidad física es el *gray*: $1 \text{ gray (gy)} = 1 \text{ J kg}^{-1}$.
- d. Dosis absorbida – magnitudes biológicas: En esta sección las magnitudes dependen de los efectos, ya que organismos expuestos a las mismas dosis presentan efectos biológicos diferentes. Para cuantificar estas dosis es necesario conocer el factor de eficacia biológica equivalente (EBR) que relaciona el efecto Radiactivo con un efecto de referencia.

3. Tipos de Radiación

La radioactividad es parte de la vida cotidiana, cuyo origen puede ser antropogénico como natural. Este fenómeno en donde los núcleos inestables se transmutan de forma espontánea a otros núcleos emite partículas alfa, beta y gama (Pallavicini, 2011).

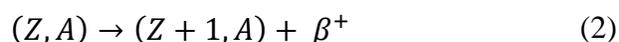
3.1 Desintegración Alfa.

Un núcleo Radiactivo alfa está compuesto por partículas alfas, que a su vez contiene dos protones y dos neutrones. Si el núcleo emite esta partícula alfa (${}^4_2\alpha$) pierde un par de protones y neutrones, generando un cambio en el núcleo del elemento y dando origen a otro elemento con un número atómico dos unidades menores (Sutton, 1988). Las partículas alfas al interactuar con la materia depositan su energía en ella, un ejemplo de este decaimiento se da en el (Rn^{222}), es un elemento producto del decaimiento del (Ra^{226}), el radio se desintegra emitiendo una partícula alfa dando lugar al radón (Peterson, MacDonell, Haroun, & Monette, 2007).



3.2 Desintegración Beta

En este decaimiento, un neutrón se convierte en protón o viceversa y una partícula beta es expulsada para mantener el balance de cargas eléctricas. Otra forma de alcanzar la estabilidad es el proceso llamado Desintegración Betaplus y consiste en la conversión de un protón a un neutrón, un positrón y un neutrino.

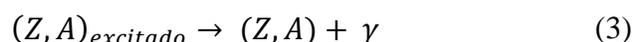


Otra desintegración es la denominada Decaimiento Beta-minus, este decaimiento ocurre cuando se emite a partir del núcleo un electrón negativo, ocurre con generalidad en núcleos Radiactivos con neutrones en exceso (Pallavicini, 2011). Esta partícula es 7 mil veces más pequeña que la radiación alfa, sin embargo su trayectoria se ve frenada ante la presencia de aluminio o varios centímetros cúbicos de agua (Soria, 2006).

3.3 Desintegración Gamma

Los dos anteriores decaimientos Alfa y Beta no aseguran la estabilidad del núcleo, por lo que el mismo en búsqueda de estabilidad libera energía en forma de rayos gamma. Esta emisión

de energía es de largo alcance y generalmente son fotones cargados energéticamente. Esta forma de desintegración no altera la identidad del núcleo, solamente involucra la pérdida de energía (González & Rabin, 2011). Estos rayos por lo general provienen del núcleo cuando se encuentra excitado, esta radiación puede interactuar con las capas electrónicas de los átomos ocasionando la pérdida de cierta energía, este tipo de radiación es detenido solamente por capas de un volumen considerable de hormigón, plomo o agua (Sharpe, 1996).



3.4 Ley de decaimiento Radiactivo

Esta ley conocida como ley de decaimiento o decrecimiento radioactivo tuvo lugar en el año de 1902 y fue descrita por Rutherford y Soddy tras la observación de que la cantidad de núcleos iniciales (N_0) disminuía con el tiempo, esta disminución era de carácter exponencial en donde intervenía el tiempo de decrecimiento (t) y una constante de decaimiento o desintegración (λ). Este proceso es estocástico, de manera que cada núcleo excitado puede emitir un fotón dando paso al decaimiento (Dolores & Ruiz, 2009) (...) (Ortíz, 2012). Para explicar de mejor manera este decaimiento se puede observar la Figura 2, donde se presencia el decaimiento exponencial donde se cumple:

$$N = N_0 * e^{-\lambda t} \quad (4)$$

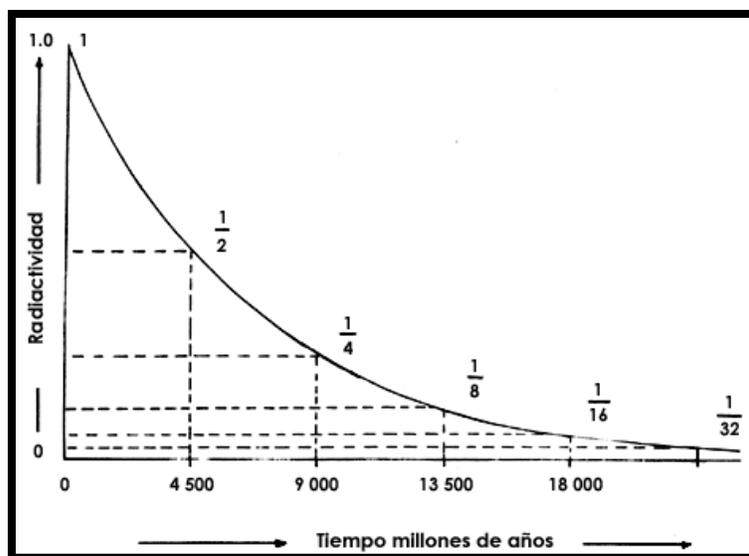


Figura 8: Ley de decrecimiento o decaimiento radioactivo. Fuente: Instituto Latinoamericano de la comunicación educativa

La constante de desintegración (λ) es una característica propia de cada sustancia radiactiva, es una constante que mide el ritmo fijo de desintegración de las partículas radiactivas; el resultado de la inversa de λ se lo denomina como periodo de vida media ($\tau = \frac{1}{\lambda}$) y por lo tanto nos indica el tiempo medio que se necesita para que cierto elemento radiactivo se desintegre, la unidad del Sistema Internacional en la que este proceso de decrecimiento se expresa es el becquerel (Bq) (Dolores & Ruiz, 2009).

4. Interacción de la radiación con la materia.

Para explicar cómo interactúa la materia con la radiación en una síntesis podemos ayudarnos del “modelo de átomo de Lorenz”, en donde la materia está constituida por átomos y asociaciones de los mismos, que a su vez se componen de cargas positivas y negativas que se enlazan de manera estable. Esta estabilidad se debe a la distribución de cargas negativas en torno al núcleo; es por esto que cuando incide una carga electromagnética sobre el átomo da lugar a una deformación e induce a un momento dipolar (Carreño & Antón, 2001).

En este proceso tres eventos de interacción entre fotones de alta energía con los átomos núcleos y electrones, las tres intervenciones son la absorción fotoeléctrica, la dispersión Compton y producción de pares electrón-positrón (Longair, 2004).

4.1 Absorción Fotoeléctrica:

Para que se produzca este fenómeno debe existir una colisión entre un fotón de radiación incidente y un electrón de un átomo perteneciente a un material absorbente, toda la energía del fotón radiado se transfiere a un electrón orbital. La energía del fotón debe ser superior a la energía de enlace del electrón; que tras recibir esta energía se desplaza de su órbita o capa llegando a un nivel de capa superior o desprendiéndose del átomo receptor (Ver Figura 8); en caso de que el electrón sea expulsado recibe el nombre de electrón de retroceso o *Fotoelectrón* (White & Pharoah, 2002) (...) (Ziessman, O'Malley, & Thrall, 2007).

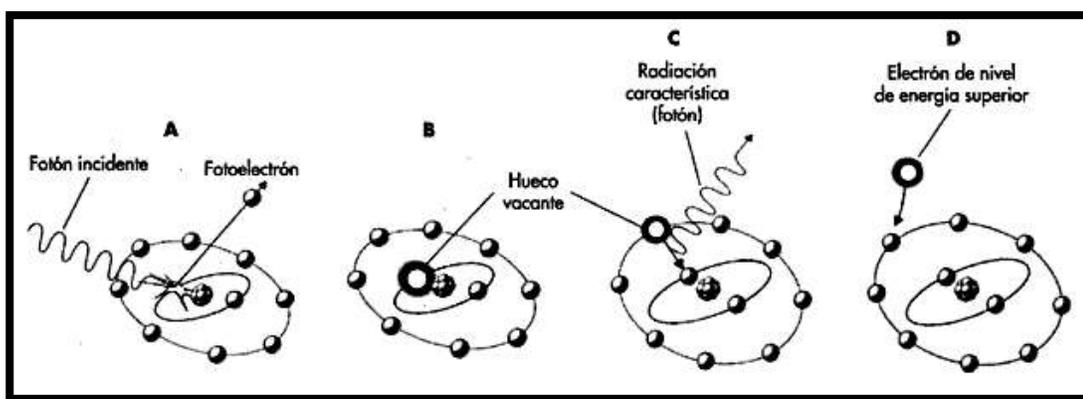


Figura 9: Esquema de un átomo tras la interacción fotoeléctrica, Fuente: (Pharoah, 2002)

La probabilidad de ocurrencia de la interacción fotoeléctrica depende de la cantidad de energía fotónica irradiada, si los niveles son altos la probabilidad disminuye notablemente ya que esta absorción es significativa en energía alrededor de 50 keV, es por ello que generalmente el electrón que interactúa pertenece a la capa K, ya que la densidad de la nube electrónica es mayor en esta región (Hall & Giaccia, 2006) (...) (Ziessman, O'Malley, & Thrall, 2007).

En cuanto al balance energético el átomo absorbente pasa a ser ionizado dejando un lugar libre y emanando rayos X mientras resultado de la transición electrónica entre capas. Mientras tanto el electrón de retroceso obtiene una energía cinética que es igual a la diferencia entre la energía del fotón incidente menos la energía perteneciente al electrón irradiado (Ziessman, O'Malley, & Thrall, 2007):

$$KE = h\nu - E_B \quad (5)$$

En donde $h\nu$ es la energía incidente del fotón y E_B es la energía perteneciente al electrón y a la órbita que pertenece (Hall & Giaccia, 2006), cabe recalcar que la ecuación trabaja de igual forma para la interacción fotoeléctrica y el efecto Compton.

4.2 Dispersión Compton y efecto Compton.

En esta interacción un fotón incide sobre un electrón unido a una capa externa de forma débil. Tras el bombardeo del fotón el electrón no se libera y continúa existiendo pero con su dirección de órbita desviada (Ver Figura 9). Este tipo de interacción es el modo predominante de la interacción de los rayos gamma y los rayos X; el rango de energía en donde sucede este tipo de interacción oscila entre los 30keV y los 30MeV; la energía del fotón dispersado se estima de igual forma que en el caso de la interacción fotoeléctrica, equivale a la energía del fotón incidente, menos la energía cinética ganada por el fotoelectrón más su energía de enlace. Tras este evento el átomo es separado de uno de sus electrones y al mismo tiempo resulta ionizado (White & Pharoah, 2002)(...) (Ziessman, O'Malley, & Thrall, 2007) .

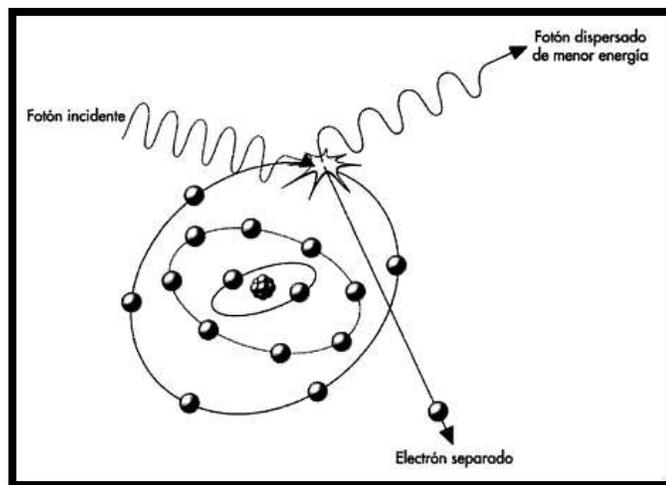


Figura 10: Esquema del efecto Compton tras la interacción de un fotón con un átomo. Fuente: White & Pharoah, 2002.

Por la energía cedida del electrón dispersado tras el efecto Compton la longitud de aumenta. Esta dispersión puede ser estimada mediante la relación: $\Delta\lambda = 0.0243 (1 - \cos \phi)$. En donde $\Delta\lambda$ es la variación de longitud de onda, además ϕ representa el ángulo de dispersión del fotón, el rango de desviación puede ser mínimo así como de 180° (Ver Figura 10).

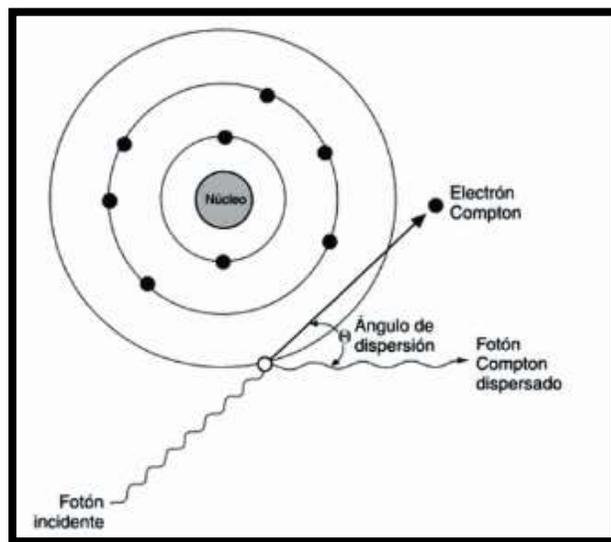


Figura 11: Dispersión Compton de un electrón, en donde cede energía experimenta un cambio de dirección. Fuente: Medicina Nuclear, Tercera Edición, 2006.

4.3 Producción de pares (electrón-positrón) o materialización.

Se genera en el momento que colisiona un fotón (generalmente gamma) con un átomo, el mismo lo absorbe por completo dando como resultado la generación de un electrón y un positrón (Ver Figura 11). Esta interacción ocurre cuando la energía del fotón incidente supera los 1.02MeV (García & Haro del Moral, 2004). En la producción de pares interviene un factor que se relaciona con el número atómico, si el número atómico Z incrementa, la producción de pares se eleva en el campo eléctrico del núcleo, dejando exento a la formación de pares en los campos eléctricos de los electrones orbitales.

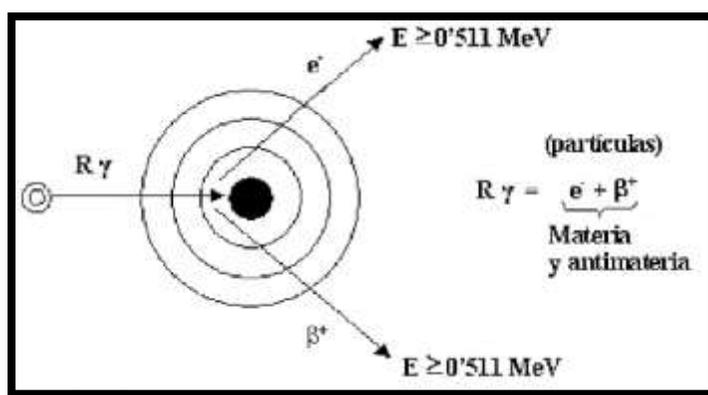


Figura 12: Interacción entre el campo nuclear y un fotón, en donde se aniquila el fotón y se generan partículas con cargas opuestas (electrón y positrón). Fuente: SERGAS, 2006

Tras la materialización de protones y electrones puede producirse la aniquilación de las mismas, emitiendo por lo menos dos fotones diferentes al fotón de incidencia inicial y que se dirigen en sentidos distintos (SERGAS, 2006). En la creación y destrucción de pares interviene la mayor cantidad de energía, en comparación con las interacciones fotoeléctricas y Compton, por lo tanto es el proceso en donde se alcanzará una considerable cantidad de energía (Ver Figura 11). Esta materialización tiene mayor probabilidad de incidencia con absorbentes cuyo número atómico sea elevado y los rayos gammas incidentes tengan energía superiores a los 5MeV (Glasstone & Sesonke, 1990).

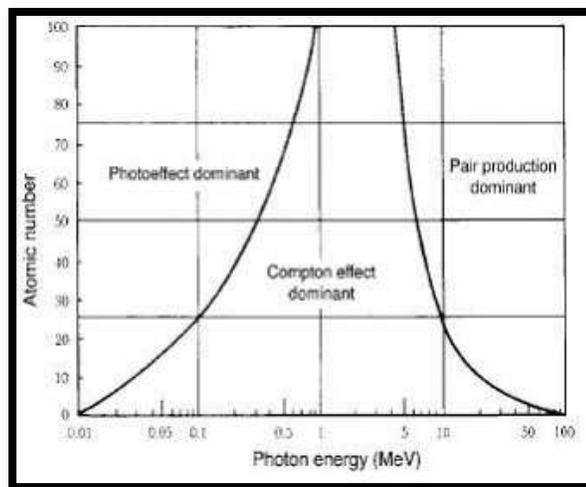


Figura 13: Regiones de predominancia de los tres tipos de interacciones, (Número atómico eje de las ordenadas y energía del fotón incidente eje de las básicas). Fuente: UNMSM, 2006.

5. Radio y Radón

5.1 El Radio y sus Generalidades.

El radio fue descubierto en el año 1898 por el matrimonio Curie, es un metal alcalinotérreo pesado de color blanco plateado proveniente del decaimiento del uranio, fácilmente oxidable tras la exposición al aire, las concentraciones de radio estimadas en el planeta tierra son de una parte por billón (Peterson, MacDonell, Haroun, & Monette, 2007). Este elemento Radiactivo tiene más de 25 isótopos diferentes, sin embargo se pueden encontrar cuatro de ellos en la naturaleza (^{223}Ra , ^{224}Ra , ^{226}Ra , ^{228}Ra), el resto fue creado por el hombre (Rodríguez, 2013).

5.2 Fuentes de radio.

El radio (^{226}Ra) se encuentra principalmente en procesos donde se emplea como materia prima compuestos de torio y dióxido de titanio, generalmente en procesos de excavación y explotación petrolera, industrias de fosfatos, minerías de carbón e industrias de pigmentos, de forma natural se los encuentra en las zonas colindantes a volcanes (Rodríguez, 2013), aunque a inicios del siglo veinte, por la falta de conocimientos se lo utilizaba en productos de consumo

diario como pastas dentales, productos para el cabello e incluso alimentación ya que se consideraba que tenía propiedades benéficas para la salud (U.S.NRC, 2008).

Diversos estudios se concentran en la detección de radio en aguas subterráneas, ya que se considera esta como la segunda mayor fuente de radiación en los medios acuosos (Correa, Kappke, PAschuk, Schelin, & Denyak, 2006), llegando a establecerse en el 2011 un límite de radiación alfa en aguas minerales de $0.5 \frac{Bq}{l}$ (WHO, 2011). Además por sus condiciones alcalinotérreas, su transporte se beneficia en los medios acuosos ya que se transforma en forma de sales al correlacionarse con otros elementos como cloruros u otros alcalinotérreos (Sturchio, Banner, Binz, Heraty, & Musgrove, 2001).

5.3 Afecciones a la salud

El radio ingresa al cuerpo humano a través de la ingesta de alimentos o aguas contaminadas con este material, en donde aproximadamente el 80% se elimina por las heces, mientras que el 20% restante se disemina por el torrente sanguíneo (Peterson, MacDonell, Haroun, & Monette, 2007).

Sobre la importancia en cuanto a la salud el radio según la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) afirma que la exposición al radio (^{226}Ra) ocasiona cáncer de hueso, ya que el comportamiento de este elemento es similar al calcio, por lo que se distribuye y se concentra en los huesos y dientes del cuerpo humano, sobre todo cuando se encuentra en época de crecimiento, siendo un hecho de importancia para la salud de los niños (UESEPA, 2000). El volumen de hueso disminuye alrededor del 1% anualmente en personas expuestas a este tipo de radiación, es decir se presenta un caso de sarcomas óseos, teniendo un periodo de latencia mínimo de 7 años luego de una exposición crónica.

5.4 El radón y sus generalidades

Este gas noble fue descubierto en 1908, pero no es hasta 1923 que se lo denomina como un nuevo elemento y se lo nombra radón (López, 2003); en condiciones normales es un gas que carece de olor, color y sabor, es un gas fácil de licuar por su facilidad de condensación, por lo que permite ser disuelto en la mayoría de gases, agua y otros disolventes (Garzón, 1992), sin embargo en comparación con el radón que entra al organismo a través del agua, el radón que se inhala representa un riesgo más grave (EPA, 2015).

En la naturaleza existen tres isótopos del gas radón, el ^{222}Rn (cuyo tiempo medio de vida es 3.82 días proveniente de la serie de decaimiento del Uranio; el ^{220}Rn (tiempo medio de vida 54.5 segundos) que se produce en la desintegración del Torio y el ^{219}Rn isótopo resultante de la desintegración del Actino. De entre estos tres isótopos de radón, el proveniente del decaimiento del Uranio es aquel que más significancia tiene ya que el periodo de vida es relativamente amplio en comparación con sus otros dos isótopos permitiéndole transportarse mayores distancias y acumularse en ambientes de escasa o nula ventilación (CSN, 2014).

5.5 Fuentes de radón

Al ser un producto del decaimiento del uranio el radón se encuentra de forma natural en la atmósfera, siendo esta la fuente de radiación más importante; sin embargo ciertas actividades como los tratamientos médicos, residuos peligrosos y plantas nucleares aportan con aproximadamente el 13% del total de emisiones de este gas (Pascual, 2000).

Entre las principales fuentes naturales podemos encontrar las rocas que conforman la corteza terrestre, esencialmente aquellas que contienen concentraciones de uranio de trazas de 2 a 4 partes por millón (Estrada, 2007). Entre las principales fuentes de radón están las milonitas, granitos, gneises, esquistos, pizarras y algunas areniscas y glaciares enriquecidos en Uranio, en el

mar se lo puede encontrar en lutitas negras y yacimientos de fosfato (Nuhfer, Proctor, & Moser, 1997).

En el suelo la exhalación de radón se produce aproximadamente en los diez primeros metros, en donde interviene la porosidad del suelo, la humedad, las condiciones meteorológicas, las propiedades físicas, entre las más importantes, se conoce además que las concentraciones tienen valores más altos en la noche por las condiciones de estabilidad atmosféricas.

5.6 Afecciones a la salud

Los principales riesgos de la inhalación o ingesta de radón son al nivel pulmonar ya que estas partículas se descomponen en el tejido pulmonar, al descomponerse liberan energía que puede dañar las paredes pulmonares, si un individuo fuma y es víctima de la exposición al radón tiene un riesgo más elevado de contraer cáncer de pulmón (EPA, 2015).

Estudios toxicológicos apuntan que individuos que se han expuesto a una dosis alta de radón generalmente sufren de congestiones pulmonares, parálisis en extremidades posteriores (en caso de animales), además de hiperactividad a nivel pulmonar, dermis y glándulas suprarrenales (Pascual, 2000).

6. Dosimetría Interna, Generalidades.

Según Raabe (1994) podemos definir a la dosimetría interna como "*... la metodología científica utilizada para medir, calcular, estimar, ensayo, predecir, y de otra manera de cuantificar la energía de radiación absorbida por la ionización y excitación de los átomos en los tejidos humanos como resultado de la emisión de radiación energética por radionucleidos internamente depositados...*". Para comprender de mejor manera la dosimetría interna es necesario conocer los tres supuestos básicos: En primer lugar que toda energía emitida por radiaciones alfa y beta sobre un órgano o tejido se absorbe sobre el órgano o tejido irradiado, el segundo supuesto

es que el elemento depositado en el tejido u órgano tendrá una distribución instantánea luego de haber sido irradiado, la distribución será de uniforme en toda la masa del tejido u órgano, el supuesto final es sobre la tasa de cambio de un material en el órgano irradiado es proporcional a la cantidad total de material en ese órgano o tejido preestablecidos (Potter, 2005).

La finalidad de la dosimetría interna se puede simplificar en tres puntos (Potter, 2005) detallados a continuación:

- a. Proporcionar retroalimentación oportuna sobre el control del lugar de trabajo:** Hace referencia a la protección de los trabajadores, mediante programas de dosimetría interna; el programa debe estar compuesto por el monitoreo de la exposición que proporcionará ideas claves que conlleven a mitigar los peligros de exposición a ambientes de trabajo, y proporcionará pautas para el control oportuno del ambiente de trabajo.
- b. Iniciar intervención médica:** Se aplica a casos en donde la exposición ha sido alta, la intervención médica tiene el objetivo de reducir la absorción por órganos y tejidos sistémicos, y la dosis que se irradia posterior a la exposición.
- c. Certificar el cumplimiento de la normativa.** La dosimetría interna se emplea para llevar un control de las buenas prácticas en cuanto a materiales radioactivos y dosis recibidas por individuos, la dosis a controlar es la suma de todas las dosis que se presenta al interior del área de trabajo, en Ecuador el organismo encargado de lo que respecta a la radiactividad es la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), y el reglamento a aplicar en la república del Ecuador es el Reglamento de seguridad radiológica presentado por el gobierno ecuatoriano desde 1979.

6.1 Dosimetría Interna: Radio.

La primera observación sobre la afección a la salud por radiación interna se llevó a cabo por Blum, un dentista en el año de 1929. El fenómeno observado fue necrosis de mandíbula en pintores de diales de radio, los pintores tenían la costumbre de obtener puntos más finos mediante la torcedura de pinceles con sus labios, sin embargo desconocían que con esta práctica altas cantidades de radio ingresaban a su organismo (Blum, 1929).

En cuanto se responsabilizó la ingesta de radón como causa de la necrosis de mandíbula se propuso determinar la cantidad de radio en el cuerpo, la primera técnica de cuantificación de radio se implementó en 1934, Robley Evans con ayuda de la técnica de metros de arco cuantificó la deposición de radio en los pintores afectados por la radiación, el mecanismo empleaba un tubo Geiger-Mueller para obtener cuatro mediciones e inferir la cantidad de Radio (Ra^{226}) en el individuo (Evans, 1937); Con el avance del tiempo se actualizó esta técnica y se obtuvo un límite de tolerancia corporal al radio, el cual fue $0.1 \mu\text{Ci}$ (NBS, 1941).

6.2 Dosimetría Interna: Radón

Para reconocer el radón como agente precursor del desarrollo de cáncer pulmonar fue necesario un periodo de estudio de este gas, las primeras observaciones afirmaban que los trabajadores que trabajaban en minas con alta presencia y exhalación de radón desarrollaban cánceres del aparato respiratorio (Hueper, 1942). Las primeras acusaciones hacia el radio y exhalaciones de radón como agentes cancerígenos datan del año 1921, finalmente en la década de 1930 diversos estudios afirmaron y demostraron por medio del estudio en mineros afectados por betas de radio y exhalaciones de radón que estos elementos, y la radiación que emanan son responsables del desarrollo de cánceres de pulmón (Newell, 1988).

En cuanto a la dosimetría interna del radón no datan de artículos o metodologías aprobadas, sin embargo la ICRP (Comisión Internacional de Protección Radiológica) redacta metodologías que permiten estimar el radón en ambientes por medio de diversos métodos a seguir en caso de que se necesite el conocimiento de la concentración de este gas:

- a. **Concentración de radón:** Para conocer la concentración de radón en ciertos ambientes como minas, industrias, entre otros se puede emplear el método denominado dos-filtros. La metodología inicia con la toma de muestras en frascos, o cajas de metal herméticos, o en carbón activado por medio de adsorción. Posteriormente el aire colectado se pasa por un tubo que contiene dos extremos con filtros para derivados del radón. En el primer filtro se atrapan los productos del decaimiento del radón, mientras que en la segunda es proporcional la concentración de radón (ICRP, Inhalation Toxicology Research Institute Annual report., 1979).
- b. **Hijas del radón:** Para determinar la concentración proveniente del decaimiento del radón es necesario la toma de muestras en flujos de velocidad constante. Las muestras deben pasar por papel filtro y el almacenamiento requiere condiciones herméticas, el método a emplearse es conocido como el método Kusnetz que consiste en la desintegración del radón en un papel filtro en periodos de 5, 10, o 30 minutos, se deja reposar la muestra por aproximadamente treinta o cuarenta minutos, mediante cálculos estadísticos y el conteo de las trazas en el papel filtro sensible al radón se obtiene las concentraciones de las hijas de radón (ICRP, 1976).

7. Dosis límite permitida para personas ocupacionalmente expuestas a la radiación en Ecuador.

El registro oficial 891 del gobierno del Ecuador que data del año 1979 habla sobre la protección contra la radiación, en donde establece un límite de irradiación interna para personas que por su situación ocupacional se encuentra expuesta a este tipo de energía:

Tabla 1: Límites de Dosis para radiación en Ecuador.

Órgano	Dosis Máxima permitida
Cuerpo entero, gónadas, médula ósea	5 rem*/año - 3 rem/trimestre
Hueso, Piel de todo el cuerpo, tiroides	30 rem/año - 15 rem/trimestre
Manos, antebrazos, pies, tobillos	75 rem/año - 40 rem/trimestre
Todos los otros órganos	15 rem/año - 8 rem/trimestre

*Información recopilada del registro oficial sobre el reglamento de seguridad radiológica del consejo supremo de gobierno de Ecuador redactado el año de 1979. En donde *Rem equivale a una dosis absorbida de un (1) rad de radiación X, o gamma o beta. Un rad equivale a la absorción de cien ergios por gramo de material (100 erg/gr).*

Es de relevancia recalcar que el Ecuador no dispone de un documento legal que regule o ejerza el control, monitoreo y buen uso de las radiaciones ionizantes que aseguren al público no estar expuestos a este tipo de radiaciones, la legislación que rige momentáneamente al Ecuador es un extracto de recomendaciones internacionales dadas por el Organismo Internacional de Energía Atómica y la Comisión Internacional de Protección Radiológica de Biología y Medicina Nuclear y Oncológica y Ciencias Afines (SCAN, 1979).

Además, a pesar de que se haya demostrado que el radón sea el segundo agente responsable de muertes por cáncer de pulmón por debajo del tabaquismo debido a las radiaciones ionizantes que producen (OMS, 2015), y que los materiales de construcción aportan con un 20% de la concentración total de radón en domicilios (Piedecausa, Chinchón, Morales, & Sanguán, 2011) no existen indicios de una normativa que proteja a las personas que estén relacionadas a la fabricación o manipulación de materiales de construcción.

8. Marco Metodológico.

8.1 Toma de muestras

La toma de muestras necesita tener significancia en cuanto al mercado de materiales de construcción, en este caso el muestreo se realizó de forma aleatoria en dos etapas donde se empleó el muestreo aleatorio simple, ya que brinda confiabilidad al desarrollarse en poblaciones grandes (Casal & Mateu, 2003), en la primera etapa se establecieron las muestras a estudiarse, las cuales son cinco: ladrillo, bloque, cemento gris, arena y cemento blanco.

En la segunda etapa de muestreo que consistía en encontrar tres sub-muestras por cada una de las cinco principales, se identificaron proveedores de los materiales anteriormente mencionados y se adquirieron en total quince sub-muestras de forma aleatoria simple.

8.2 Construcción del contenedor de muestras.

Para la medición de radón se empleó un método pasivo en conjunto con detectores de trazas nucleares. Este método consiste en un envase contenedor de la muestra, el cual debe estar sellado. Y dentro del mismo a una altura conocida debe ubicarse un detector de trazas nucleares sólido (Ramola & Choubey, 2004), el detector seleccionado fue de nitrato de celulosa LR-115 ya que es un detector muy eficiente para el registro de partículas alfa por su superficie sensible al contacto de partículas alfa (Mohamed, 2012), tras culminar esta etapa en donde se generarán las trazas

nucleares fué necesario un revelado químico con la finalidad de que las trazas sean directamente visibles (Hussam, 2016). El proceso que se llevó a cabo fue el siguiente:

- a. Contenedor del detector LR-115: Consiste en ubicar al detector en el cierre del envase, de manera que la radiación alfa impacten al detector y formen las trazas nucleares. Sin embargo, el detector debe permanecer aislado por un periodo de tiempo, para lo cual se adaptó una lámina de metal que trabajaría en conjunto con otra adaptación explicada a continuación.
- b. Aislamiento del detector LR-115: Con el fin de exponer los detectores lr-115 tipo II, una vez alcanzado el equilibrio secular, se diseñó un sistema de aislamiento de los detectores a las partículas alfa, el cual consistió en una lámina de metal sobre el detector la cual se sujetó con un par de imanes ubicados en el lado exterior del contenedor de vidrio, como se muestra en la figura 14. los detectores estuvieron cubiertos por 15 días, después de este tiempo se retiraron los imanes permitiendo la exposición de los detectores a las radiaciones alfa provenientes del radón y su progenie.



Figura 14 (Izquierda): Adaptación de imanes en la cubierta del envase.

Figura 15(Derecha): Lámina de metal que aislará el detector por quince (15) días.

8.3 Preparación de la muestra

La preparación de muestras abarcó dos etapas, en primer lugar cada sub-muestra tuvo que ser triturada hasta conseguir una consistencia granular fina, luego de ello todas las sub-muestras fueron tamizadas en forma independiente y controlando que no se añadan impurezas o elementos ajenos a la muestra a estudiar, el número de malla empleado en este proceso fue de 40, en este punto además se cuantificó el espacio poroso además de la densidad de cada una de las quince muestras. Posteriormente fue necesario pesar doscientos gramos (200g) de cada muestra sub-muestra para envasarlos en los contenedores construidos con anterioridad, la muestra fue previamente secada por periodos de entre tres a cuatro horas a temperaturas 160°C , esto con la finalidad de evitar el vapor de agua y que se distorsione los resultados de trazas nucleares.

Para el cierre hermético, en los envases se colocó grasa fibrosa que por sus propiedades aislaba el contenido de cada recipiente, luego se empleó cinta para evitar el movimiento o alteración del cierre, teniendo como resultado quince contenedores con su respectiva muestra sellados para evitar contaminación externa (Ver Figura 16). Tras este proceso arrancó el tiempo de exposición de los detectores a cada material de construcción, el mismo fue de cien (100) días.



Figura 16: Construcción y almacenamiento de la muestra

8.4 Tratamiento químico de los detectores sólidos de trazas nucleares DSTN

Una vez que se cumplió el tiempo de exposición de cien días, los detectores debían extraerse de cada contenedor y pasar por una etapa de revelado químico que permitiría contabilizar trazas nucleares formadas a partir de la radiactividad presente en cada material de construcción.

Se extraían los detectores y se sumergían en una solución de hidróxido de sodio 2.5N por un periodo de ochenta y cinco (85) minutos en baño maría (Ver Figura 17 y 18), este baño maría debía realizarse a temperatura constante de 60°C.



Figura 17: Detectores sumergidos en solución de hidróxido de Sodio



Figura 18: Equipo empleado para el baño maría y revelado de detectores

Una vez que se haya cumplido el periodo de revelado, el detector se retiraba de la solución de hidróxido de sodio y se sumergía en agua destilada sobre agitador magnético que mantenía en movimiento la solución (Ver Figura 20), este proceso se mantenía por diez (10) minutos. Para culminar este proceso de revelado los detectores se dejaban secar (ver Figura 19) para poder almacenarlos y etiquetarlos.



Figura 19: Detectores sumergidos en agua destilada y en agitación magnética.



Figura 20: Etapa final de revelado, secado de detectores LR-115.

8.5 Conteo de trazas nucleares.

El análisis estadístico comienza con el conteo de las trazas en cada uno de los quince detectores a trabajar, el campo de visión en donde se contabilizaron las trazas fue de veinte milímetros cuadrados aproximadamente (20mm^2), esta área se dividió en veinte sectores una décima de milímetro (0.9mm^2) con un objetivo de aumento 10x, que permitió visualizar las trazas dejadas por las partículas alfa (Ver Figura 21).



Figura 21: Microscopio empleado para el conteo de trazas nucleares

El conteo de trazas en los detectores se llevó a cabo sub-dividiendo la zona central del detector en 20.

Cada una de las sub-muestras mostraba un número de trazas diferente, con diferencias sustanciales entre ellas, como por ejemplo entre la sub-muestra 1 de arena y la sub-muestra 2 de ladrillo. (Ver Figura 22 y 23).



Figura 22: Detector con menor número de trazas, perteneciente a la sub-muestra 1 de arena.

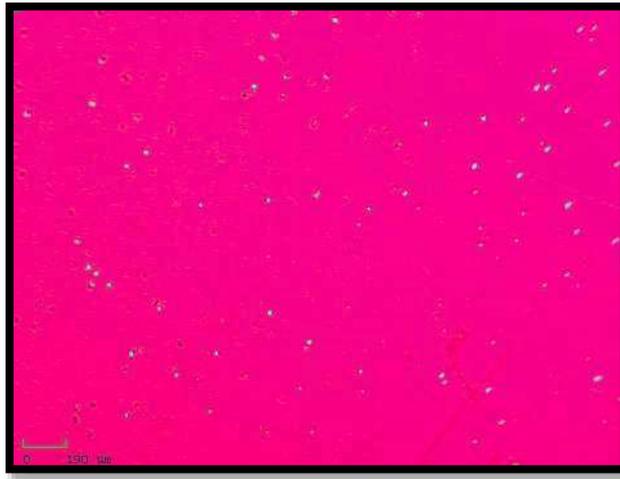


Figura 23: Detector procedente de la sub-muestra 2 de ladrillo, cuyo número de trazas fue el mayor de entre todas las muestras.

8.6 Cuantificación de la exhalación de radón y concentración de Radio

Para la cuantificación de radón se emplearon diversas ecuaciones recopiladas en trabajos relacionados con el tema que se han realizado a lo largo del tiempo, en primer lugar se estimó la densidad de trazas existentes en los detectores:

$$\rho \left(\frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2} \right) = \frac{\sum Tr}{A} \quad (6)$$

En donde ρ es la densidad de trazas, valor propio de cada detector; $\sum Tr$ es la sumatoria de todas las trazas del campo de visión del detector, y A representa el área de visión (Mohamed, 2012).

Conocida la densidad de trazas, se prosiguió en los cálculos de la Tasa de densidad de trazas, la cual relacionaba la formación de trazas nucleares con los días de exposición, para obtener el valor de esta tasa se empleó la siguiente relación:

$$\rho Tr \left(\frac{\text{trazas}}{\text{cm}^2 \cdot \text{día}} \right) = \frac{\sum T}{A * d} \quad (7)$$

Como se observa en la ecuación de la parte superior la tasa de densidad (ρTr) solo agrega la variable d , la misma que representa el tiempo de exposición en días (Ferreira, B.R.S, & Aquino, 2012). De manera seguida se calculó la exposición al radón integrado, el mismo que viene dado por:

$$C \left(\frac{\text{Bq} \cdot \text{h}}{\text{m}^3} \right) = \frac{\rho * t}{d * K} \quad (8)$$

La exposición al radón integrado C se obtiene de multiplicar la densidad de trazas ρ (trazas día^{-1}) por el tiempo de exposición del detector en horas (t), y dividirlo para el resultado de la multiplicación entre el factor de calibración (K) del detector plástico LR-115 ($0.020 \frac{\text{traza} \cdot \text{m}^3}{\text{cm}^2 \cdot \text{Bq} \cdot \text{d}}$) por la exposición en días (d), que en nuestro caso fueron 100 (Mohamed, 2012)(...) (Somogyi, Hafez, Hunyadi, & Szilagly, 1986)(...) (Barooah, Phukan, & Baruah, 2011)(...) (Kant, Upadhyay, Sonkawade, & Chakarvarti, 2006).

La exposición al radón integrado nos permite calcular la exhalación de este gas por área (E_A) y por masa (E_m), para lo cual se establecen las siguientes ecuaciones respectivamente:

$$E_A \left(\frac{Bq \cdot h}{m^3} \right) = \frac{C * V * \lambda}{A \left[t + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \right]} \quad (9)$$

$$E_m \left(\frac{Bq \cdot h}{m^3} \right) = \frac{C * V * \lambda}{m \left[t + \frac{1}{\lambda} (e^{-\lambda t} - 1) \right]} \quad (10)$$

Donde λ es la constante de decaimiento para el radón Rn^{222} (h^{-1}), C es la exposición al radón integrado ($Bqm^{-3}hr$); V es el volumen del vacío entre las muestras y el detector de nitrato de celulosa (m^3); t representa el tiempo de exposición al detector (hr); en el caso de la exposición por área A es la superficie de la muestra (m^2), y m representa la masa de la muestra (kg) en la ecuación que revela la exposición por masa (Jarad, 1988); (Khan, Rajenda, & R.K., 1992); (Kumar & Kaur, 2014). Con el conocimiento de la exhalación de radón por área y por masa se puede ya estimar la exhalación de radón, el mismo viene dado por:

$$C_{Rn} \left(\frac{Bq}{m^3} \right) = \frac{\rho}{K d} \quad (11)$$

La concentración de radón C_{Rn} , se obtiene tras relacionar la densidad de trazas ρ (Trazas/ cm^2) sobre el factor de calibración K $\left(0.020 \frac{traza \cdot m^3}{cm^2 \cdot Bq \cdot d} \right)$ por el periodo de exposición d (días).

Además se puede conocer la concentración de radio en las muestras de materiales de construcción, para lo cual se emplea otra ecuación que viene dada por (Kumar & Kaur, 2014); (Somogyi, Hafez, Hunyadi, & Szilagly, 1986):

$$C_{Ra} \left(\frac{Bq}{kg} \right) = \left(\frac{\rho}{T} \right) \left(\frac{h A}{M} \right) \quad (12)$$

En donde ρ representa la densidad de trazas (Trazas/ cm^2), K es la constante de calibración de los detectores sólidos empleados en la medición pasiva $\left(0.020 \frac{traza \cdot m^3}{cm^2 \cdot Bq \cdot d} \right)$ por el periodo de

exposición d (días); eso multiplicado por la relación entre la altura h del vacío entre la muestra y el detector (m) y por la superficie de la muestra A (m^2) (Kumar & Kaur, 2014); (Somogyi, Hafez, Hunyadi, & Szilagly, 1986).

Además, se vio conveniente calcular un índice de exposición alfa, el mismo que representa un nivel máximo de concentración de radio proveniente de materiales de construcción, en donde se recomienda que el índice no supere la unidad ya que la cantidad de exhalación sobrepasaría los 200Bq m^3 (Rafat A. R., 2015), para calcular este índice se tiene la siguiente relación.

$$I_{\alpha} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{Kg}} \right) = \frac{C_{Ra}}{200} \quad (13)$$

En donde C_{Ra} expresa la concentración de radio en Bq kg^{-1} , y la constante de 200 es la dosis de radio máxima permitida para obtener una exhalación en interiores relativamente segura (Rafique, y otros, 2011). Finalmente se cuantificó la exposición potencial alfa en periodos anuales, esto se obtuvo gracias a la concentración de radón y otras constantes que se explican a continuación:

$$Ep \left(\frac{\text{WLM}}{\text{año}} \right) = \frac{8760 * n * F * C_{Rn}}{170 * 3700} \quad (14)$$

En donde 8760 es el número de horas que contiene un año, n es la fracción de tiempo que las personas permanecen en interiores, C_{Rn} es la concentración de radón en Bq m^{-3} , y F que es el factor de equilibrio para radón, el valor empleado para esta variable es de 0.4 como recomendación de UNSCEAR (UNSCEAR, 2000); todo ello dividido para el producto entre 170 que es el número de horas empleadas en trabajo; además para obtener las unidades de radiación en sievert se empleó un factor de conversión de $3.88\text{mSv} * (\text{WLM}^{-1})$ recomendado por ICRP (Sharma, y otros, 2014).

Esta exhalación alfa se la puede estudiar junto a la normativa ecuatoriana ya que se conoce que la equivalencia de un mili-sievert (mSv) es una décima de unidad rem (Pasler, 1991).

9. Resultados y discusión.

Antes de compartir los resultados obtenidos es necesario aclarar que dos sub-muestras pertenecientes a Ladrillo-2 y Cemento Gris-2 no fueron consideradas ya que presentaban datos anómalos con respecto al resto de resultados; se presume que esto se ocasionó por fallas en el cierre hermético de los envases contenedores.

a. Estimación de las concentraciones de Radio, y la exposición al radón integrado.

Tabla 2: Resultados de concentración de radio226 y radón222, además de la exposición al radón integrado

MUESTRA	SUB-MUESTRA	DENSIDAD DE TRAZAS (trazas/cm ²)	CONCENTRACIÓN DE RADIO (Bq/kg)	Índice Alfa (Bq/kg)
Arena	Arena 1	13,11 x 10 ³	94,62	32,78
	Arena 2	11,12 x 10 ³	80,31	27,82
	Arena 3	0,297 x 10 ³	2,143	0,742
Bloque	Bloque 1	11,67 x 10 ³	84,20	29,17
	Bloque 2	0,359 x 10 ³	2,594	0,899
	Bloque 3	17,48 x 10 ³	126,1	43,69
Ladrillo	Ladrillo 1	2,803 x 10 ³	20,23	7,008
	Ladrillo 2	26,02 x 10 ³	187,8	65,06
Cemento Blanco	Cemento Blanco 1	0,421 x 10 ³	3,040	1,053
	Cemento Blanco 2	0,304 x 10 ³	2,190	0,761
	Cemento Blanco 3	6,191 x 10 ³	44,67	15,48
Cemento Gris	Cemento Gris 1	11,567 x 10 ³	83,47	28,92
	Cemento Gris 3	8,022 x 10 ³	57,89	20,06

En primer lugar se muestra el número de trazas ya que de este valor depende el resto de magnitudes relacionadas con la concentración de radio y exhalación de radón. Además se presenta la concentración de radio en cada muestra y el índice alfa (Ver Tabla 2).

Al existir una densidad de trazas en la superficie del nitrato de celulosa de los detectores LR-115 tipo II, se afirma que los materiales de construcción poseen concentraciones de radio, y por lo tanto exhalación de radón, como era de esperarse debido al gran número de publicaciones sobre el tema.

Como se observa en la tabla superior la sub-muestra que presenta la mayor densidad de trazas es Ladrillo-2 ($26,02 \times 10^3$), mientras que la que menor trazas presentó fue la muestra de cemento Arena-3 ($0,297 \times 10^3$). Esto nos quiere decir que la presencia de radio y radón tendrá variaciones significativas en cada una de las sub-muestras, exceptuando el caso del cemento gris cuya densidad de trazas no presenta variación comparativa entre las sub-muestras uno y dos.

En cuanto al índice alfa, indica la potencialidad de exhalación de 200Bq m^{-3} y se recomienda que el valor de este índice se mantenga por debajo de la unidad (Rafat A. M., 2015), sin embargo los valores que se presentan en la tabla 2 sobrepasan esta umbral, exceptuando el caso del cemento blanco 2 (0.76), arena 3 (0.742) y bloque 2 (0.89). El resto de materiales de construcción presenta valores elevados en comparación con estudios en Egipto, Hungría, Irán, Bangladesh (Khandoker, y otros, 2015); (Bavarngegin, Vahabi, & Fathabadi, 2016); (Estokova, 2013); sin embargo se asume que estos valores son superiores ya que los otros estudios presentaban metodología en base a detectores CR-39 y la naturaleza de las muestras es diferente ya que en este proyecto los materiales de construcción previamente triturados y secados lo cual aumenta la capacidad de difusión del radón permitiendo mayores concentraciones, y para finalizar se debe contar con el cierre hermético en las muestras lo cual permite la concentración en el interior del recipiente; mientras que los interiores de edificios, casas y demás construcciones suelen presentar ventilación en interiores reduciendo esta concentración.

Por lo tanto se impulsa al estudio de las concentraciones de radio e índice alfa in-situ, con las propiedades físicas propias del ambiente de manera que los resultados reflejen de mejor forma la realidad radiológica en interiores de la Ciudad de Cuenca.

b. Cálculo de exhalación de radón, y exposición anual a las partículas alfa.

A continuación se muestran las magnitudes relacionadas con la exhalación por área y por masa del radón, de los materiales de construcción estudiados en el proyecto. (Ver tabla 3).

Tabla 3: Resultados de exhalación de radón²²⁶ por masa y por área, además de índice alfa y exposición anual en unidades rem.

MUESTRA	SUB-MUESTRA	EXPOSICIÓN AL RADÓN INTEGRADO (Bq*h/m ³)	EXHALACIÓN POR MASA (Bq/kg*h)	EXHALACIÓN POR ÁREA (Bq/m ² *h)
Arena	Arena 1	7,386 x 10 ⁶	8,078	419,9
	Arena 2	8,098 x 10 ⁶	8,856	460,2
	Arena 3	0,213 x 10 ⁶	0,233	12,09
Bloque	Bloque 1	8.347 x 10 ⁶	9,177	476,9
	Bloque 2	0,273 x 10 ⁶	0,309	15,62
	Bloque 3	12,16 x 10 ⁶	13,37	689,4
Ladrillo	Ladrillo 1	2,071 x 10 ⁶	2,277	118,3
	Ladrillo 2	19,38 x 10 ⁶	21,32	1107
Cemento Blanco	Cemento Blanco 1	0,292 x 10 ⁶	0,321	16,67
	Cemento Blanco 2	0,218 x 10 ⁶	0,240	12,45
	Cemento Blanco 3	4,531 x 10 ⁶	4,981	259
Cemento Gris	Cemento Gris 1	8,172 x 10 ⁶	8,984	467
	Cemento Gris 3	5,687 x 10 ⁶	6,253	324,9

En la tabla tres se puede observar que la exhalación de radón tanto en área como en masa están ligadas a las concentraciones de radio presentes en cada una de las muestras ya que de igual

forma las muestras que mayor y menor exhalación presentan son el ladrillo-2 ($1107 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$; $21,31 \text{ Bqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$) y Arena-3 ($12,09 \text{ Bqm}^{-2}\text{h}^{-1}$; $0,233 \text{ Bqkg}^{-1}\text{h}^{-1}$), respectivamente.

Afirmando lo dicho con anterioridad sobre la relación entre presencia de radio y exhalación de radón, se muestra las figuras 24 y 25, que indican un factor de correlación igual a uno. Esto nos dice que las exhalaciones de radón se presentarán en mayor o menor medida según la cantidad de radio presente en la muestra.

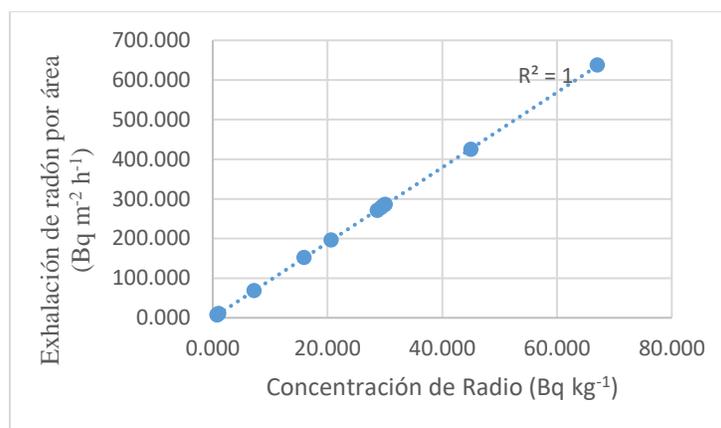


Figura24: Correlación entre la concentración de Radón y la Exhalación por área; donde el factor de correlación R^2 es igual a 1.

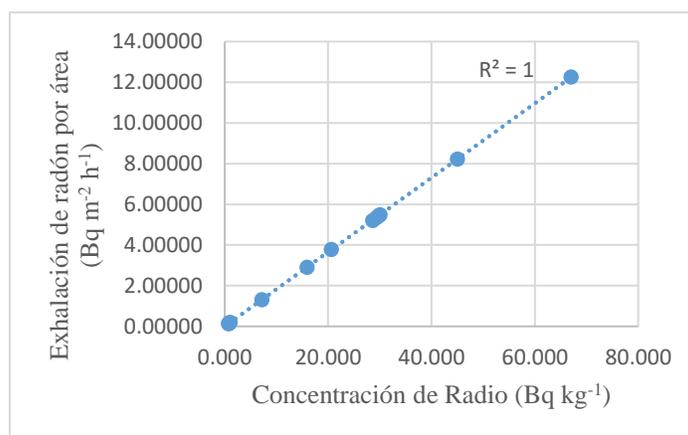


Figura25: Correlación entre la concentración de Radón y la Exhalación por Masa; donde el factor de correlación R^2 es igual a 1.

c. Estimación de las propiedades físicas de las muestras y su análisis versus la concentración de radón.

Las propiedades físicas que se estudiaron fueron densidad y porosidad de las muestras, se seleccionaron estos dos elementos ya que la teoría asienta que mientras exista mayor porosidad y menor densidad la difusión de radón permite que exista una mayor concentración de este gas. La estimación de lo mencionado con anterioridad se presenta en la tabla a continuación (Ver tabla 4):

Tabla 4: Propiedades físicas de los materiales de construcción investigados.

MUESTRA	SUB-MUESTRA	Densidad (kg/m ³)	Espacio Poroso (%)	CONCENTRACIÓN DE RADÓN (Bq/m ³)
Arena	Arena 1	1257	21	6556 ± 393.056
	Arena 2	1296	22	5564 ± 168.534
	Arena 3	1286	19	148.5 ± 7.700
Bloque	Bloque 1	763.7	41	5834 ± 177.146
	Bloque 2	750	39	179.8 ± 7.708
	Bloque 3	782.6	40	8739 ± 167.744
Ladrillo	Ladrillo 1	943.2	33	1402 ± 28.800
	Ladrillo 2	872.3	35	13,01 x 10 ³ ± 324.361
	Ladrillo 3	1193	21	474.7 ± 12.824
Cemento Blanco	Cemento Blanco 1	926.2	38	210.7 ± 9.363
	Cemento Blanco 2	1019	33	152.154 ± 7.291
	Cemento Blanco 3	947.9	37	3095 ± 91.826
Cemento Gris	Cemento Gris 1	850.5	40	5784 ± 172.432
	Cemento Gris 2	836.3	42	4890 ± 127.192
	Cemento Gris 3	981.2	32	4011 ± 119.634

Sin embargo los resultados extraídos en este proyecto no muestran una tendencia que asevere que a mayor porosidad y menor densidad las concentraciones de radón se incrementen, y se asume que las concentraciones solamente dependen del material y su materia prima (Ver figura 26).

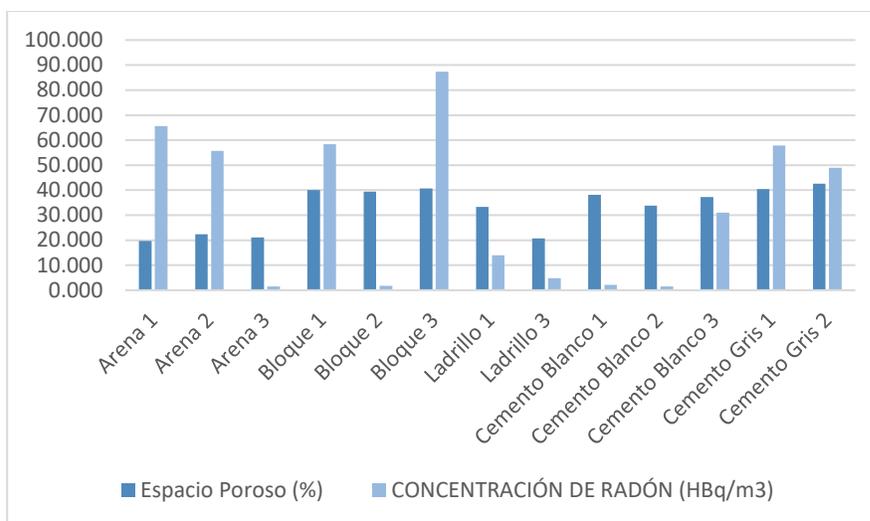


Figura 26: Gráfica comparativa entre espacio poroso y concentración de radón.

Por otro lado, se recomienda continuar esta investigación ya que la exhalación podría comportarse de manera diferente en materiales de construcción compactos. Además la gráfica nos indica que existen muestras, especialmente el cemento gris que presenta baja porosidad y alta concentración de radón, permitiéndonos conjeturar sobre si el gas radón no pudo exhalarse por completo de la muestra por la escasa porosidad.

d. Análisis sobre la exposición a partículas alfa en comparación con la normativa Ecuatoriana

Finalmente se presenta una tabla que expresa la concentración de radón en unidades establecidas en la legislación ecuatoriana (Ver Tabla 5) la misma que establece el límite de exposición en función del órgano, tejido o extremidad expuesta; de manera general la norma establece que no debe existir exposición anual que supere los 15 rem (SCAN, 1979):

Tabla 5: Exposición a las concentraciones de radón en unidades rem, y periodos anuales.

MUESTRA	SUB-MUESTRA	ÉXPOSICIÓN ANUAL (rem)
Arena	Arena 1	11.334
	Arena 2	9.622
	Arena 3	0.257
Bloque	Bloque 1	10.09
	Bloque 2	0.311
	Bloque 3	15.11
Ladrillo	Ladrillo 1	2.424
	Ladrillo 2	22.50
	Ladrillo 3	0.821
Cemento Blanco	Cemento Blanco 1	0.364
	Cemento Blanco 2	0.263
	Cemento Blanco 3	5.353
Cemento Gris	Cemento Gris 1	10.01
	Cemento Gris 2	8.456
	Cemento Gris 3	6.936

Los estudios demuestran que el bloque y el ladrillo son aquellos que presentan una dosis absorbida en unidades rem superiores a las 15 unidades; sin embargo no se puede considerar como riesgo radiológico por la composición de la muestra cómo se habló con anterioridad; por lo que se recomienda tener mayor vigilancia en la fabricación de cemento, y la producción de arena ya que contienen valores que superan las 10 unidades rem, y las propiedades con las que se trabajó en el presente escrito se ajustan a las propiedades encontradas en condiciones normales.

10. Conclusiones

Como era de esperarse, se encontraron concentraciones de radio y exhalaciones de radón en todos los materiales de construcción examinados, ya que la materia prima proviene del suelo y en él se encuentra uranio en diferentes concentraciones.

Estos resultados son de gran importancia debido a que son las mediciones pioneras, de este tipo, en la provincia del Azuay, permitiendo obtener los primeros datos de línea base. Estos resultados no pueden considerarse como concluyentes y se recomienda realizar una mejor caracterización de los detectores, analizar una mayor muestra de los materiales de construcción y correlacionarlos con sus propiedades físico-químicas.

Se puede establecer la necesidad de un análisis más exhaustivo desde el punto de vista geográfico y en variedad de materiales de construcción, que permita conocer la fuente primaria de los materiales de construcción, y que permitiría generar un mapa radiológico de aquellos lugares de donde proviene la materia prima para la elaboración de los materiales de construcción.

Los resultados de este proyecto nos llevan a pensar en la posibilidad de extender las investigaciones al área de la radio química con el fin de determinar la sinergia o compatibilidad de los diferentes elementos de la cadena de decaimiento con los elementos que conforman la tierra, para de esta manera asociar las concentraciones de ellos con el tipo de suelo, lo que nos puede generar como resultado un catálogo radiológico para los diferentes suelos, el mismo que puede ser de utilidad para profesionales en construcción, y así para evitar concentraciones elevadas de elementos radiactivos en interiores de edificaciones, hogares, y demás.

Las altas concentraciones relativas de radio y exhalación de radón encontradas en las muestras de bloque y ladrillo, no pueden ser tomadas para los cálculos de las dosis anuales a las

cuales se exponen los habitantes de los recintos construidos con ellos, ya que las muestras analizadas en este trabajo fueron pulverizados, incrementado de esta manera la exhalación radón. Los valores de las dosis anuales correspondientes a la exhalación de radón, provenientes de los ladrillos y bloques pulverizados si resultan ser relevantes para las personas que laboran en la fabricación de estos productos, esto último también es válido para los que laboran con la arena y el cemento.

Las tasas de exposición a las partículas alfa en estos materiales de construcción son elevadas en comparación con la normativa ecuatoriana, sin embargo se debe considerar que un estudio realizado en las condiciones exactas que se presentan en el interior de las construcciones nos permitirá un mayor acercamiento a la realidad radiactiva que se presenta en el interior de los recintos, esto también aplica en el caso del índice alfa, ya que según la literatura las concentraciones en los recintos serán superiores a los 200Bqm^{-3} , lo cual representa un riesgo radiológico.

11. Bibliografía

- Ahad, A. (2010). *Measurement of natural radioactivity in soil, indoor radon level and excess cancer risk in Bahawalpur division*. Bahawalpur: PhD thesis, Islamia University of Bahawalpur.
- Alrabaia, H. (2015). Modeling Radon Diffusion across Some Areas of Southern Jordan. *Applied Mathematics*, N°6, 1271-1275.
- Askeland, D. R. (1998). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. México: ITP, International Thomson Editores.
- Barooah, D., Phukan, S., & Baruah, R. (2011). Study of radon exhalation rates using LR-115 (II) nuclear track detectors in coal-mining area of the foothills of Mokokchung District, Nagaland. *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 655-668.
- Belafrites, A. (2008). Natural Radioactivity in Geological Samples from Algeria by SSNTD and γ -Ray Spectrometry. *IX Radiation Physics & Protection Conference, 15-19 November 2008, Nasr City - Cairo, Egypt* (págs. 205-209). Cairo, Egipto: Université de Jijel.
- Blum, T. (1929). Osteomyelitis of the mandible and maxilla. *Mon Labor Rev*: 28, 802.
- Borja, V. F. (2009). *Estudio experimental sobre la efectividad y la viabilidad de distintas soluciones constructivas para reducir la concentración de gas radón en edificaciones*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Carreño, F., & Antón, Á. M. (2001). *Óptica Física. Problemas y ejercicios resueltos*. Madrid: Prentice Hall.
- Casal, J., & Mateu, E. (2003). Tipos de muestreo. *Rev. Epidem. Med. Prev.*, 3-7.
- Chen, J., Rahman, N., & Atiya, I. (2010). Radon exhalation from building material for decorative use. *Journal of Environmental Radioactivity*, 101., 317-322.
- CIIC. (1988). H.R. 3915 (100th): Radon Gas Tax Relief Act of 1998. *Center International Investigation of Cancer*. New York.
- Correa, J., Kappke, J., PAschuk, S., Schelin, H., & Denyak, V. (2006). Present Status of Radon and Radium Activity Measurements in Well and Bottled Water at the Federal University of Technology (UTFPR, Brazil). *Journal of Environmental Radioactivity*, 71-83.
- CSN. (2014). *Protección radiológica frente a las fuentes naturales de radiación*. España: Consejo de Seguridad Nuclear.
- Dolores, M. M., & Ruiz, R. M. (2009). *Física Moderna: Introducción a la física nuclear y de las partículas elementales*. Murcia.
- EPA. (2015). *Manual Informativo sobre el Radón. La guía para proteger a su familia y a usted del radón*. CDC.
- Estrada, A. (2007). Medición de Radón-222 en Ambientes geohidrológicos en la fracción central de México. México: Universidad Autónoma de México. .

- Evans, R. (1937). Radium poisoning II: The quantitative determination of radium content and radium elimination rate of living persons. *Am J Roentegenol Radium Ther Nucl Med*, 368-378.
- Ferreira, A., B.R.S, P., & Aquino, R. (2012). Application of a "Sealed Can Technique" and CR-39 detectors for measuring radon emanation from undamaged granitic ornamental building materials. *Radioprotection* 46 (6).
- García, D. C., & Haro del Moral, F. J. (2004). *Técnicas de exploración en Medicina Nuclear*. España: Masson.
- Garzón, R. L. (1992). *Radón y sus riesgos*. España: Universidad de Oviedo.
- Gennaro, A. R. (2003). *Remington Farmacia*. Buenos Aires: Panamericana.
- Glasstone, S., & Sesonke, A. (1990). *Ingeniería de reactores nucleares*. Barcelona: Reverté.
- González, C. V. (1971). *Física fundamental*. México: Progreso S.A.
- González, A. J. (2011). Una mirada a la radiación natural. *IEDS: Ambiente* , 41-42.
- González, G., & Rabin, C. (2011). *Para entender las Radiaciones*. Montevideo: DIRAC.
- Hall, E. J., & Giaccia, A. J. (2006). *Radiobiology for the Radiologist*. Philadelphia, USA: Lippincott Williams & Wilkins.
- Hesham, Y. A., & El-Farrash, A. A. (2015). Measurement of Radon Exhalation Rate in Some Building Materials Using Nuclear Track Detectors. *World Jpurnal Of Nuclear Science and Technology* 5, 141-148.
- Hueper, W. C. (1942). *Cancers of the respiratory system. In Occupational tumors and allied diseases*. Springfield, Ill.: C.C. Thomas.
- Hussam, A. (2016). Modeling Radon Difussion across Some Areas of Southern Jordan. *SciRes* 6 , 1271-1275.
- IAEA. (1990). Comportamiento de radón y sus productos de decaimiento en medios físicos. *Conferencia, Seminario de Física Nuclear, Centro Nuclear*. Salazar, México: IAEA; Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares.
- ICRP. (1976). *Manual on Radiological Safety in Uranium and Thorium Mines and Mills*. Viena: International Atomic Energy Agency. .
- ICRP. (1979). *Inhalation Toxicology Research Institute Annual report*. Albuquerque: Lovelace Biomedical and Environmental Research Institute.
- IPSN. (2001). *Radioecology*. Francia: IPSN.
- Jarad, A. F. (1988). Application of nuclear track etch detector for radon related measurements. *Nucl. Tracks Radiant Meas.*, 525-534.
- JSP. (04 de Junio de 2011). Ladrilleros dan color a Racar. *El Tiempo*.
- Kane, J., & Sternheim, M. (2007). *Física*. Barcelona: Reverté.

- Khan, J., Rajenda, P., & R.K., T. (1992). Measurement of radon exhalation rate from some building materials . *International Journal of Radiation Application and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, 609-610.
- Kumar, A., & Kaur, A. (2014). A study of radon concentration in water and radon exhalation rate in soil samples belonging to Kapurthala district, Punjab, India . *Advances in Applied Science Research* , 5 (1); 43-47.
- Lavenda, B. H. (2005). El movimiento Browniano. *Quantum Simposium* (págs. 36-46). Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.
- Lavinia, E. M., Constantin, C., & Dorin, V. M. (2014). Measurement of natural radioactivity and radiation hazards for some natural and artificial building materials available in Romania. *Radioanal Nucl Chem*(299), 523-532.
- Longair, M. S. (2004). *High Energy Astrophysics*. Cambridge: Cambridge University.
- López, G. M. (2003). Puesta a punto de un espectómetro de Centelleo Líquido para la determinación de Radón en muestras de agua. Madrid, España: Universidad de Extremadura.
- Mohamed, A.-E. (2012). An overview on studying ²²²Rn Exhalation Rates using Pasive Technique Solid-State Nuclear Track Detectors. *American Journal of Applied Sciencies* 9 (10), 1653-1659.
- NBS. (1941). *Safe handling of radioactive luminous compound*. Washinton, DC:: U.S. Government Printing Office; NBS Handbook H-17.
- Newell, S. J. (1988). *Radioactivity and Health A Story*. Carolina : Pacific Northwest Laboratory: Raymond W. Balman, Jr. .
- Nuhfer, E., Proctor, R., & Moser, P. (1997). *Instituto Americano de Geólogos profesionales*.
- Núñez-Lagos, R. R. (2011). La radioactividad ambiental. *Revista LOGOS CIENCIA & TECNOLOGÍA*, 50-61.
- OMS. (2003). *Guías para la calidad de agua potable*. Organización mundial de la salud, 3° Edición.
- OMS. (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores: Una perspectiva de salud pública*. Ginebra: Organización mundial de la Salud.
- Ortíz, J. (Marzo de 2012). Simulación numérica de la actividad de las fuentes de Cesio 137, cobalto 60, estroncio 90 y Talio 204 como la tasa de dosis para las fuentes emisoras de radiación Gamma pertenecientes a la Universidad Pedagógica Experimental Barquisimeto, Venezuela: Universidad Pedagógica Experimental Libertador.
- Pallavicini, N. (2011). *Activity concentration and transfer factors of natural and artificial radionuclides in the Swedish conties of Uppsala and Jämtland*. Uppsala: SLU; Swedish University of Agricultural Sciences.
- Pascual, B. (2000). *NTP 728: Exposición laboral a radiación natural*. Madrid : INSHT.
- Pasler, H. (1991). *Radiología Odontológica* . Barcelona: Masson-Salvat.

- Peterson, J., MacDonell, M., Haroun, L., & Monette, F. (2007). *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analysis for Contaminated Areas*. Chicago: Agronne National Laboratory, EVS. .
- Piedecausa, G. B., Chinchón, P. S., Morales, R. M., & Sanguán, B. M. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. *CEMENTO HORMIGÓN, N°946*, 34-50.
- Potter, C. A. (2005). Internal Dosimetry: A review. *Health Physics*, 565-581.
- Quindós, L., Soto, J., Fernández, P., Villar, E., Newton, G., Peña, J. G., & Arteché, J. (1989). Radón, principal fuente de radiación natural. *Revista Española de física*, 22-27.
- Raabe, O. (1994). *Internal Radiation Dosimetry*. Medical Physics Publishing .
- Rafat, A. M. (2015). A study of radon emitted from building material using solid state nuclear track detectors. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 516-522.
- Rafat, A. R. (2015). A study of radon emitted from building materials using solid state nuclear track detectors . *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 516-522.
- Rafique, M., Rehman, H., Matiullah, Malik, F., Rajput, M., Rahman, S., & Al., e. (2011). Assessment of radiological hazards due to soil and building materials used Mirpur Azad Kashmir, Pakistan. *Iranian Jprnal of Radiation Resaarch* 9(2), 77.
- Ramírez, A. F. (2007). *Motores Brownianos: Transporte, Caos y Sincronización*. México: Coplt ArXives.
- Ramola, R., & Choubey, V. (2004). Measurement of radon exhalation rate from soul samples of garhwal himalaya. *Ondia J. Radioanal. Nucl. Chem.*, 219-223.
- Rodríguez, C. J. (Junio de 2013). Cuantificación de la actividad de radón y radio aplicando la técnica de centelleo líquido en aguas termales del cerro pacho, lago de coatepeque, departamento de Santa Ana. Santa Ana, El Salvador: Universidad del Salvador.
- Salcido, A., Rechtman, R., & Calles, A. (1990). Simulaciones de modelos de teoría cinética como recursos didáctivos. *Revista Mexicana de Física* 36; No. 1, 131-145.
- Santamaría, A. J. (2013). El movimiento Browniano: Un paradigma de la materia blanda y de la biología. *Rev.R.Acad.Cienc.Exac.Fis.Nat. (Esp)*, 40-56.
- SCAN. (8 de Agosto de 1979). Reglamento de Seguridad Radiológica. *Registro Oficial, Consejo Supremo de Gobierno*. Quito, Pichincha , Ecuador.
- SERGAS. (2006). *Técnico Especialista en Radiodiagnóstico del Servicio Gallego de Salud*. Sevilla: MAD.
- Sharma, A., Kumar, M. A., Sonkawade, R., Sharma, A., Kumar, R., & Prassad, R. (2014). Radon exhalation in some building construction materials and effect of plastering and paints on the radon exhalation rate using fired bricks . *Advances in Applied Science Research* 5 (2), 382-386.

- Sharma, N., Singh, J., Chinna, E., & Tripathi, R. (2016). A study of the natural radioactivity and radon exhalation rate in some cements used in India and its radiological significance. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 47-56.
- Sharpe, A. G. (1996). *Química Inorgánica*. Barcelona: Reverté.
- Somogyi, G., Hafez, A., Hunyadi, I., & Szilagly, M. (1986). Measurement of exhalation and diffusion parameters of radon in solids by plastic track detectors. *Nuclear Track Radiation Measure* 12, 704-704.
- Soria, A. (2006). *Física Nuclear y de Partículas*. Valencia: PUV, 2° Edición. .
- Sturchio, N., Banner, J., Binz, C., Heraty, L., & Musgrove, M. (2001). Radium geochemistry of Ground Waters in Paleozoic Carbonate Aquifers, Midcontinent, USA. *Radiation Measurement Science Direct*, 109-122.
- Sutton, C. (1988). *Inside Science: Radioactivity New Scientist*.
- Tuccimei, P., Moroni, M., & Norcia, D. (2006). Simultaneous determination of ²²²Rn and ²²⁰Rn exhalation rates from building materials used in Central Italy with accumulation chambers and a continuous solid state alpha detector: Influence of particle size, humidity and precursors concentration. *Applied Radiation and Isotopes*, 254-263.
- Tuñón, & Silla., E. (2010). *Química Física: Fenómenos de Transporte y conductividad electrolítica*. Valencia: UV: Universidad de Valencia. .
- Tzortzis, M., Svoukis, & Tsetos, H. (2004). A comprehensive study of natural gamma radioactivity levels and associated dose rates from surface soils in Cyprus. *Radiat. Prot. Dosim.*, 190-207.
- U.S.NRC. (Octubre de 2008). Frequently Asked Questions (FAQs) Regarding Radium-226 Overview. United States: United States Nuclear Regulatory Commission, U.S.NRC.
- UESEPA. (2000). National Primary Drinking Water Regulations. *Radionuclides; Final Rule*, United States Environmental Protection Agency, UESEPA.
- UNSCEAR. (2000). *Effects of atomic radiation to the general assembly*. New York: United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations.
- UNSCEAR. (2000). *Sources and effects of Ionizing Radiation*. New York: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.
- UNSCEAR. (2000). *Sources and Effects of Ionizing Radiation*. New York: UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. .
- Valdez, N. Z. (Noviembre de 2001). Influencia de la Alumina como absorbedor de microondas en la relación de formación de espinel Alimina-Magnesia. Nuevo León, México: Universidad Autónoma de Nuevo León. .
- Vázquez, V. M., & Leonardo, D. (2010). Estudio y aplicaciones de la difusión en nanoestructuras y sistemas biológicos. *Contactos. UAM-Iztpalapa. Revista Número 76*, 42-49.

- White, S. C., & Pharoah, M. J. (2002). *Radiología oral; Principios e interpretación*. Madrid: Harcourt.
- WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization, WHO.
- Zielinski, J., A.C, C., Shilnijova, N., & Veiga, L. (2008). Working towards residential Radon Survey in South América. *12th International Congress of the International Radiation Protection Association.*, (págs. 85-95). Buenos Aires, Argentina.
- Ziessman, H. A., O'Malley, J. P., & Thrall, J. H. (2007). *Medicina nuclear*. Madrid: ELSEVIER.
- Zubair, M., Shakir, K. M., & Verma, D. (2012). Measurement of radium concentration and radon exhalation rates of soil samples collected from some areas of Bulandshahr district, Uttar Pradesh, India using plastic track detectors. *Iran J. Radiant: Res.* , 83-87.