



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN ( $Rn-222$ ) EN  
EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

AUTOR

Bryan Steven Cuenca Espinosa

AÑO

2018



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

EVALUACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN ( $Rn^{222}$ ) EN  
EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTÓRICO DE QUITO

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos  
establecidos para optar por el título de Ingeniero Ambiental en Prevención y  
Remediación

Profesor Guía

MSc. Yasser Alejandro González Romero

Autor

Bryan Steven Cuenca Espinosa

Año

2018

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Evaluación de la Concentración de Radón ( $Rn^{222}$ ) en Edificaciones del Centro Histórico de Quito, a través de reuniones periódicas con el estudiante Bryan Steven Cuenca Espinosa, en el semestre 2018-2, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

---

Yasser Alejandro González Romero

Master en Ingeniería Ambiental

C.I: 070373762-7

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Evaluación de la Concentración de Radón ( $Rn^{222}$ ) en Edificaciones del Centro Histórico de Quito, de Bryan Steven Cuenca Espinosa, en el semestre 2018-2, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"

---

Rasa Zalakeviciute  
Doctor of Engineering Science  
C.I: 175707679-7

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes”

---

Bryan Steven Cuenca Espinosa

C.I: 175126572-7

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres, Hugo y Cecilia por guiarme y apoyarme durante la etapa universitaria. A mi hermano Alexander por toda la motivación. A mi familia por todos los buenos consejos y deseos que me han llevado a ser una mejor persona. Al Ing. Alejandro González por todo el apoyo y conocimiento brindado durante este trabajo de titulación, y a todos mis amigos por las inmemorables historias.

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis padres por el infinito amor y esfuerzo que ha relucido en mi vida. A mis abuelitos Enriquito y Marujita, y a mi tía Elizabeth por todos los valores y cariño que me han dado durante mi crianza. A mi hermano Alexander por darme vigor con cada palabra y por guiarme por el buen camino. A Fabricio por todos los momentos compartidos y los mejores consejos.

## RESUMEN

El presente estudio consistió en evaluar la concentración de radón ( $Rn^{222}$ ) en edificaciones del Centro Histórico de la ciudad de Quito – Ecuador y determinar la tasa de dosis; para lo cual se tomó en cuenta la determinación de dosis anual efectiva, puntos críticos y el área superficial que cubre cada tipo de material de construcción mediante correlaciones de los diferentes sitios analizados. Se utilizaron las normas técnicas de la Asociación Americana de Científicos y Tecnólogos del Radón (AARST) y las del equipo RAD7. El monitoreo fue realizado durante los meses de marzo, abril y mayo del año 2018. Los equipos utilizados fueron el detector activo de radón RAD7 el cual proporciona datos cada 30 minutos durante el período de 24 horas, este equipo incorpora una cámara de medición de campo electrostático la cual muestra los descendientes que deja a su paso el radón ( $Rn^{222}$ ). También se usó el equipo LUDLUM para mediciones de tasa de dosis Gamma y Beta. Se encontró que los niveles de radiación en la edificación de la Iglesia de la Catedral Primada de Quito varían de  $817 \text{ Bq/m}^3$  a  $1490 \text{ Bq/m}^3$  y sobrepasan los límites permisibles de la concentración de radón ( $Rn^{222}$ ) establecidos por varias normativas internacionales como la del Diario Oficial de la Unión Europea #143 ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), EPA ( $148 \text{ Bq/m}^3$ ), OMS ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) y OIEA ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ). Por otro lado, las edificaciones del Museo de la Catedral y la Iglesia de San Francisco de Quito se encuentran en el rango de los límites permisibles para construcciones existentes. Mediante el programa RStudio se observó la correlación que tuvo el área superficial cubierta por el tipo de material de construcción y la concentración de radón, concluyendo que las áreas de mayor influencia son en la Iglesia de la Catedral.

**Palabras clave:** concentración de radón, radón ( $Rn^{222}$ ), edificaciones, material de construcción.

## ABSTRACT

The present study consisted in evaluating the radon concentration ( $Rn^{222}$ ) in buildings of the Historical Center of the city Quito - Ecuador and determining the dose rate; the determination of the effective annual dose, critical points and the surface area covered by each type of construction material were taken into account through correlations of the different analyzed sites. The technical standards of the American Association of Radon Scientists and Technologists (AARST) and those of the RAD7 equipment were used. The monitoring was carried out during the months of March, April and May of the year 2018. The equipment used was the radon active detector RAD7 that provides data every 30 minutes during the 24-hour period, this equipment incorporates an electrostatic field measuring camera, which shows the descendants left by radon( $Rn^{222}$ ). The LUDLUM equipment was also used for Gamma and Beta dose rate measurements. It was found that the levels of radiation at the Church of the Cathedral of Quito construction's varied from  $817 \text{ Bq/m}^3$  to  $1490 \text{ Bq/m}^3$  and exceeded the permissible limits of radon concentration ( $Rn^{222}$ ) established by several international regulations such as the Official Journal of the European Union #143 ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), EPA ( $148 \text{ Bq/m}^3$ ), OMS ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) and OIEA ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ). On the other hand, the buildings of the Cathedral's Museum and San Francisco de Quito's Church are within the range of permissible limits for existing buildings. Through the RStudio program, the correlation of the surface area covered by the type of construction material and the concentration of radon was observed, concluding that the areas of greatest influence are in the Cathedral's Church.

**Keywords:** radon concentration, radon( $Rn^{222}$ ), buildings, construction material.

# ÍNDICE

1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Justificación.....	2
1.3. Alcance .....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo General .....	4
1.4.2. Objetivos Específicos.....	5
2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Tipos de Radiaciones .....	5
2.1.1. Radiación Ionizante.....	6
2.1.2. Radiación no Ionizante.....	7
2.2. Período de Decaimiento Radiactivo.....	7
2.3. Tipos de Partículas Radiactivas.....	8
2.3.1. Emisores Alfa .....	9
2.3.2. Desintegración Alfa .....	9
2.4. Radón .....	9
2.4.1. El Radón y la Salud.....	11
2.4.2. Factores que Influyen la Entrada de Radón en Edificaciones .....	12
2.5. Métodos de Detección del Radón.....	13
2.5.1. Detectores Pasivos .....	13
2.5.2. Detectores Activos .....	14
2.6. Seguridad Radiológica .....	15
2.7. Normativa .....	16
2.7.1. Cuerpo Regulador en Ecuador.....	16
2.7.2. Normativas Internacionales.....	17
3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA .....	18
3.1. Esquema de Metodología.....	18
3.2. Selección de las Áreas de Estudio.....	19
3.2.1. Descripción del Área de Estudio .....	20

3.3. Identificación de los Tipos de Materiales de Construcción....	24
3.3.1. Concentraciones de los Diferentes Materiales de Construcción Relacionadas al Radón .....	24
3.3.2. Materiales Usados en la Construcción de las Áreas a Analizar ...	25
3.4. Evaluación de la Concentración de Radón .....	26
3.4.1. Detector de Radón Durrige RAD7 .....	26
3.4.2. Técnica de Medición .....	29
3.4.3. Protocolo para realizar mediciones de Radón .....	29
3.4.4. Tasa de Dosis .....	31
3.5. Relación entre los Tipos de Materiales de Construcción.....	32
3.5.1. Dimensionamiento de las Áreas Estudiadas .....	32
3.5.2. Correlación de Datos.....	42
3.6. Ecuaciones Relacionadas a la Concentración de Radón .....	42
3.6.1. Potencial de Concentración de Energía Alfa en Términos de WL	42
3.6.2. Exposición a los Descendientes de Radón .....	43
3.6.3. Dosis Anual Efectiva .....	43
3.6.4. Casos de Cáncer de Pulmón por Año/Millón de Personas.....	44
<b>4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>44</b>
4.1. Evaluación de la Concentración de Radón .....	48
4.1.1. Primera Edificación - Iglesia de San Francisco .....	48
4.1.2. Segunda Edificación - Museo de la Catedral Primada .....	56
4.1.3. Tercera Edificación - Iglesia de San Francisco de Quito.....	68
4.2. Correlación entre la concentración de radón y el área superficial del tipo de material de construcción.....	82
4.3. Dosis Anual Recibida.....	89
4.4. Puntos Críticos de las Edificaciones.....	91
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>92</b>
5.1. Conclusiones .....	92
5.2. Recomendaciones.....	94
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>104</b>

## 1. CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Antecedentes

A lo largo de la historia el ser humano ha estado expuesto a concentraciones radiactivas, muchas de estas son de origen natural, principalmente las emanadas de la corteza terrestre, el sol y por actividad antropogénica (episodios nucleares) (Miranda y Sajo, 2004). En el transcurso del tiempo se han ido investigando los diferentes tipos de aplicaciones con fines pacíficos de los diferentes tipos de emisores de radiaciones (Alfa, Beta y Gamma) (Carpio, 2016).

En nuestro planeta existen dos tipos de radiaciones, las terrestres y las cósmicas, denominadas como fondo radiactivo natural, entre estos están los isótopos ingeridos en el agua, en los alimentos y los inhalados (principalmente el  $Rn^{222}$  y sus descendientes) (Piedecausa, Chinchón, Morales, y Barbudo, 2011). El radón es un gas radiactivo, por lo que es nocivo para la salud en altas concentraciones y a largo plazo (exposición aguda), este elemento químico gaseoso que se caracteriza por carecer de color, olor y sabor, procede de la serie de desintegración del Uranio ( $U^{238}$ ) que contiene las rocas de la corteza terrestre, y es emanado desde el subsuelo por lo suele acumularse en espacios cerrados (Colmenero y Villalba, 2010).

Una de las características del radón es que es más denso que el aire, su concentración es más alta en pisos más bajos como por ejemplo casas con sótanos, las catacumbas (criptas) de las iglesias, bodegas de almacenamiento, garajes, etc., otros factores que influyen son los materiales de construcción, tipo de suelo, condiciones de ventilación, la geología del lugar y la antigüedad del edificio (Torres, 2017). El radón tiene tres isótopos que son el  $Rn^{219}$ ,  $Rn^{220}$  y  $Rn^{222}$ , de los cuales este último es el que se lo puede encontrar en mayor proporción en el medio ambiente con aproximadamente el 80% (Ruano et al., 2014).

El radón aparte de sus tres isótopos naturales, tiene otros 22 isotopos que han sido sintetizados por medio de reacciones nucleares artificiales como en

aceleradores lineales y ciclotrones, sin embargo ninguno de estos tiene el periodo de vida tan largo como el  $Rn^{222}$  (Lenntech, 2018). En varios países este elemento radiactivo puede provocar hasta la muerte, como en los Estados Unidos la cifra de fallecimiento por Radón ( $Rn^{222}$ ) oscila entre 7.000 a 30.000 personas por presencia en hogares o lugares de trabajo (Villalba y Jarrín, 2001).

Además, estudios epidemiológicos confirman que el radón en los hogares aumenta el riesgo de cáncer de pulmón en la población general, la mayoría de los cánceres de pulmón inducidos por el radón son causados por concentraciones bajas y moderadas en lugar de concentraciones altas, porque en general, menos personas están expuestas a altas concentraciones de radón en interiores (Amorrín, 2013). El radón se reconoció por la Organización Mundial de la Salud como el primer causante de cáncer de pulmón en personas no fumadoras (OMS, 2016).

En la actualidad, en la ciudad de Quito no se han realizado análisis para evaluar la concentración de radón en edificaciones patrimoniales como las que existen en el Centro Histórico de Quito (CHQ), siendo necesarias para mantener los límites permisibles en cuanto a exposición para turistas, miembros locales, guías y al público en general que se encuentran expuestos en un largo período de tiempo.

## **1.2. Justificación**

En el país, la mayoría de las personas no tiene conocimiento del riesgo a la salud por la exposición al radón. Por esta razón es importante y necesario el análisis de la concentración de este gas radiactivo. Sin embargo, en nuestro país no existe un marco legal social basado en estudios locales para interiores, este requisito ha sido fijado por la Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) para mantener un lugar seguro para los habitantes. El área patrimonial del CHQ es frecuentada por un sinnúmero de personas diariamente por lo que

se busca establecer un precedente y conocer los niveles de concentración a los que está expuesto el público en general.

A nivel mundial se estima que el Radón constituye aproximadamente entre el 48% al 53% de la exposición de radiación natural (Villalba y Jarrín, 2001). Su período de semidesintegración de 3.82 días, pero el decaimiento del mismo pone en riesgo al ser humano con otros isótopos radiactivos como el Plomo, Polonio y Bismuto, partículas que se mezclan con el aire y al momento de ser inhalados son retenidos en el interior de los pulmones (Egey y Matatgui, 2015).

Según la Organización Mundial de Salud (OMS), el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón después del tabaco, por lo que el ser humano corre el riesgo a padecer esta enfermedad con el aumento de  $100 \text{ Bq/m}^3$  a una exposición aguda o largo plazo (OMS, 2016). La relación dosis-respuesta del Radón a padecer una patología aumenta proporcionalmente, es decir entre más tiempo de exposición el riesgo de contraer cáncer de pulmón es más probable (WHO Handbook on Indoor Radon, 2009). No obstante, el Consejo de la Unión Europea estableció el promedio anual de concentración de actividad en el aire que no superará los  $300 \text{ Bq/m}^3$  en recintos cerrados en lugares de trabajo (EPA, 2017).

Estudios previos de radón por García (2004) se llevó a cabo con la finalidad de determinar las concentraciones de radón en interiores en la ciudad de Zacatecas, las pruebas fueron hechas dentro de casas. En general se obtuvo una media de  $55.28 \text{ Bq/m}^3$ , con un máximo de  $85.96 \text{ Bq/m}^3$  y un mínimo de  $33.83 \text{ Bq/m}^3$ . Estos valores se encuentran por debajo de la norma de la EPA cumpliendo con los límites permisibles para la salud del ser humano. Otro estudio que realizaron la medición de gas radón en tres iglesias ubicadas en San Giovanni in Fiore al sur de Italia donde se encontró concentraciones máximas de  $739.54 \pm 32.16 \text{ Bq/m}^3$  en la iglesia Abbey Firenze,  $115.22 \pm 4.98 \text{ Bq/m}^3$  en la iglesia Padri Cappuccini (construida en 1639) y  $2058.57 \pm 89.55 \text{ Bq/m}^3$  en la iglesia de Santa Maria delle Grazie (reconstruida en 1770). Los resultados analizados en las criptas son de una concentración que va de 168.1 a  $644.1 \text{ Bq/m}^3$  en la iglesia San Giovanni in Fiore y concentraciones similares en la iglesia de Santa Maria

delle Grazie. Estas edificaciones tienen como material de construcción macizo de granito común de la ciudad de Sila, Italia (Nastro, Carní, Vitale, Lamonaca y Vasile, 2016).

Este estudio se realizó para evaluar el nivel de exposición de los trabajadores de museos e iglesias del Centro Histórico de Quito. El personal que se considera más expuesto son los guías turísticos, de esta manera se contribuirá con información relevante para la salud del personal ocupacional y proceder a contribuir con medidas de mitigación si las concentraciones son muy elevadas de este gas radiactivo.

### **1.3. Alcance**

En el presente proyecto se evaluó la concentración de gas Radón en distintas edificaciones del Centro Histórico de Quito, basándose primordialmente en lugares más turísticos como Iglesias y museos. Se usó el equipo DurrIDGE RAD7 siendo un detector de método activo de gas radón. Los puntos analizados son edificaciones que por la antigüedad y los materiales que fueron empleados en su construcción tienden a aumentar los niveles de radón en el ambiente que laboran las personas. El análisis se realizó en varios puntos de cada edificación con el fin de sacar el promedio de dosis que reciben las personas para poder proponer una mitigación si así se requiere.

### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1. Objetivo General**

Determinar la concentración de Radón en edificaciones del Centro Histórico de Quito.

### 1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar los diferentes tipos de materiales de construcción de los lugares en estudio.
- Evaluar en los puntos identificados la concentración de radón.
- Analizar la relación entre los tipos materiales de construcción y la concentración de radón en las diferentes áreas estudiadas.

## 2. CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Tipos de Radiaciones

La radiación es la propagación o el movimiento de energía en forma de ondas o partículas por el espacio. Estas se clasificaron entre el año de 1892 y 1902, adoptando letras griegas como Alfa y Beta por la identificación de dos tipos de radiaciones que fue investigado por Ernest Rutherford. Se definió que cada tipo de radiación tiene propiedades penetrantes en la materia, una más que la otra, siendo la Alfa menos penetrante que la Beta y, finalmente a mediados del año 1902 se añadió otro tipo de radiación que es la Gamma. Estos rayos Gamma son un tipo de radiación formada por fotones de alta energía que tienen propiedades aún más penetrantes que la Alfa y Beta (Cano, 2006).

Las partículas radiactivas se caracterizan por ser invisibles pero tienen un peso por el cual pueden tener cargas positivas o negativas, algunas de estas ondas de radiación pueden ser sentidas por el ser humano como la luz o el calor y otras solo se pueden detectar mediante instrumentos especiales como las ondas de rayos X (Radiation Answer, 2007). A lo largo del tiempo se fue estudiando el tipo de radiación que recibe el ser humano tanto la de origen natural y la sintetizada o artificial (actividades creadas por el hombre), lo cual se ha buscado llegar a alcanzar el equilibrio, observando los beneficios que la radiación da a la sociedad como en la medicina y los riesgos que impone a la biota (Nuclear safety, 2015).

Posteriormente se estudió que las radiaciones se dividen por su frecuencia en radiación ionizante y no ionizante. Las radiaciones ionizantes son ondas electromagnéticas de alta frecuencia teniendo la energía fotónica suficiente para romper enlaces químicos a nivel celular, mientras las no ionizantes no tiene la energía fotónica suficiente para romper enlaces, pero si tiene efectos como el de inducción de corrientes eléctricas en células y tejidos (Guerrero y Pérez, 2006).

### **2.1.1. Radiación Ionizante**

La radiación ionizante es un tipo de energía liberada en forma de partículas donde encontramos las Alfa, Beta y Gamma o por ondas electromagnéticas que son por rayos X o rayos Gamma, teniendo periodos de desintegración espontánea de los átomos produciendo elementos inestables denominándolos radionúclidos (OMS, 2016). Además, la radiación ionizante proveniente de fuentes naturales es la que contribuye con aproximadamente la dosis media anual a nivel global, donde podemos encontrar a diferentes radionúclidos que buscan la estabilidad por medio de su semidesintegración (Alonso, 2015).

Cada uno de estos radionúclidos tiene diferentes tipos de vidas medias y diferente tipo de radiación emitida. La actividad de cada radionúclido se expresa en la unidad de Becquerel (Bq) (desintegración por segundo). El periodo de vida media de un radionúclido puede diferir de segundos a millones de años, como el del Uranio ( $U^{238}$ ) su vida media es de  $4.47 \times 10^9$  años (OMS, 2016). La exposición a la radiación puede ser por dos tipos que son externa e interna. La primera es aquella que tiene la cantidad suficiente de energía para atravesar el cuerpo y dañar a las células o al material genético, como por ejemplo los rayos X. Partículas Beta que tengan energía superior a los 300 KeV y la exposición interna es aquella que se puede contaminar a través de las vías de introducción al cuerpo como por un corte en la piel, inhalación e ingesta (Imbroda, Miró y Mena, 2010, p.220).

### **2.1.2. Radiación no Ionizante**

La radiación no ionizante es aquella que no puede producir fenómenos de ionización ya que no cuenta con la energía suficiente para remover electrones desde los átomos. Entre este tipo de radiación no ionizante encontramos las radiaciones infrarrojas, microondas, ultravioleta, luz visible, campos de radiofrecuencia y láser (Secretaria de Medi Ambient i Salut Laboral de la UGT de Catalunya, 2010).

### **2.2. Período de Decaimiento Radiactivo**

El proceso del decaimiento radiactivo (Figura 1) depende en su gran mayoría del núcleo del radionúclido. Por otra parte, el núcleo puede ser inestable si tiene demasiados protones, demasiados neutrones o demasiados neutrones y protones.

Los radionúclidos pueden pasar el núcleo al nivel más bajo de energía denominado estado basal que corresponde al núcleo hijo caracterizándolo por ser estable y por ser el proceso de desintegración final, pero en muchos de los radionúclidos prosigue estados excitados para poder alcanzar el estado estable, el cual el núcleo hijo puede emitir rayos Gamma de energías exactas para poder estar en estado basal. Entonces el decaimiento radiactivo no es más que la reducción exponencial del número de átomos de cualquier fuente radiactiva o un radionúclido cuando experimenta desintegración radiactiva (núcleo de un radionúclido es inestable) disminuyendo exponencialmente su actividad con el tiempo (Towson y Cormack, s.f, pp.10).

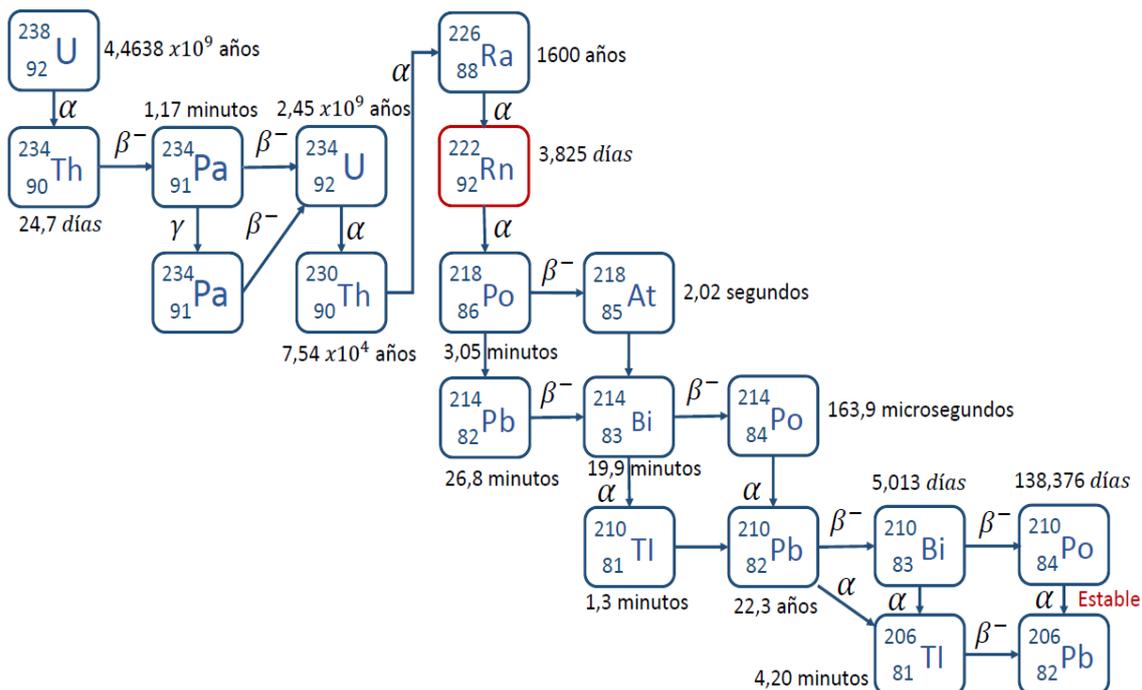


Figura 1. Cadena de desintegración del  $\text{U}^{238}$ .

Adaptado de Alonso, 2015.

### 2.3. Tipos de Partículas Radiactivas

**Partícula Alfa -  $\alpha$**  (el núcleo original se convierte en otro): tiene un núcleo de helio formado por dos neutrones y dos protones (Figura 1).

**Partícula Beta -  $\beta$**  (el núcleo original se convierte en otro): si el núcleo emite un positrón se lo denomina Beta más ( $\beta^+$ ) y al contrario si el núcleo es inestable emite un electrón y se le denomina Beta menos ( $\beta^-$ ) (Figura 1).

**Partículas Gamma -  $\gamma$**  (el núcleo original pierde energía): está formando por fotones de muy alta energía, por lo general son emitidos por núcleos inestables (González y Rabin, 2011) (Figura 1).

### **2.3.1. Emisores Alfa**

Las partículas Alfa son aquellas que pueden ser absorbidas a pocos centímetros de la fuente radiactiva o en espacios que estén expuestos a estas partículas. Estas partículas no son de riesgo de contaminación externa para el ser humano, pero pueden ser muy peligrosas cuando penetran el cuerpo mediante vías respiratorias u oral, que por lo general se da por inhalación, ingestión o por alguna herida (Imbroda et al., 2010, p.221). Estas partículas provienen de los elementos más pesados de la tabla periódica como el uranio, polonio y radio; por ser más grandes y pesadas que otras partículas causan un mayor daño en el interior del cuerpo ya que liberan toda su energía en unas cuantas células haciendo el daño más leve en las células y el ADN (EPA, 2017).

### **2.3.2. Desintegración Alfa**

La desintegración Alfa sucede cuando un átomo emite una partícula Alfa compuesta de dos protones y dos neutrones que consta directamente de su núcleo. Esta partícula es el equivalente del núcleo del átomo de helio teniendo masa de 4 en la razón de estos dos protones y dos neutrones, que también le da una carga eléctrica positiva, donde estará sometida a intensas fuerzas atractivas nucleares de corto alcance, dando como resultado la emisión de partículas Alfa con energía variando entre 4 y 10 MeV (USEPA, 2001).

## **2.4. Radón**

El Radón fue descubierto por Friederich Ernst Dorn en el año de 1900, se determinó su peso atómico por Ramsay y Whytlaw-Gray a fines del siglo XX. A partir del siglo XX se ha analizado que el radón tiene 22 isotopos, que han sido estudiados mediante reacciones nucleares realizadas en aceleradores lineales para diversos fines (Rizo, 2017). El radón es un elemento radiactivo que surge

por la desintegración de uranio principalmente de las rocas y suelos. Se encuentra en diversas áreas, al aire libre y en áreas cerradas; el radón conforma la radiación emitida naturalmente, la cual ocupa las tres cuartas partes de toda la radiación emitida (natural y producida por el hombre) en todo el mundo (UKradon, s.f). Otro de los problemas que causa el radón es a la salud humana por inhalación del gas o ingesta en algún alimento, el riesgo de contraer cáncer es seguro si la concentración es alta y el periodo de exposición es largo en un área establecida, dañando el material genético (ADN) y mutándolo (Lubin et al., 1995).

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas y el Consejo de Seguridad Nuclear dicen que la dosis media de radiación es de 3.7 mSv/año, y este valor se lo obtiene por variaciones de diversos factores en la media anual en una persona; por ejemplo los 2.4 mSv corresponden a la radiación natural o denominado fondo radiactivo (Consejo de Seguridad Nuclear, 2010).

## Porcentaje de Radiación Recibida Anualmente



Figura 2. Porcentaje de radiación recibida.

Adaptado de CSN, 2010.

### 2.4.1. El Radón y la Salud

En la actualidad existen diversos estudios de los problemas de salud que ocasiona el radón, por lo que se han creado normativas, guías de protección y parámetros para mitigar este gas radiactivo. La Agencia de Protección Ambiental en el 2018 indica que el riesgo a la exposición al radón es prevenible con un análisis en su hogar mitigando niveles altos de radón, y aprendiendo de los riesgos que puede ocasionar este elemento a la salud humana. Se demostró que en la población minera de varios países la incidencia de cáncer al pulmón es 50 veces superior a la media de la población que no está expuesta (Normas Técnicas de Protección 533, 1999). Existe una extensa evidencia epidemiológica de personas que han trabajado en minas subterráneas y datos complementarios de animales, documentando que el radón causa cáncer de pulmón en personas fumadoras y no fumadoras (Samet, 1989).

Uno de los principales problemas es la alteración del ADN, ya que la radiación Alfa puede romper o destruir los enlaces que forman al ADN de esta forma se producen células cancerígenas (Al-Zoughool y Krewski, 2008). Según la Asociación Americana de Científicos y Tecnólogos del Radón (AARST) en el 2014 se pronosticó que 21.000 personas mueren por cáncer al pulmón cada año por inhalación del gas en sus hogares, sin embargo, se debe tomar en cuenta la exposición individual que tiene cada una de estas personas ya que se exponen en lugares de trabajo y escuelas, por lo que tiende a combinar la concentración y riesgo de este gas.

Según AARST (2014), datos históricos de 1950 confirman mediante estudios el incremento de incidentes causados por el radón en minas de uranio. En los años 80' según estudios, la exposición al radón en casas puede exceder la exposición encontrada en estudios en minas (AARST, 2014). Además, Estados Unidos en 1988 autoriza una ley para reducir el radón en interiores y actividades para reducir el riesgo a contraer cáncer al pulmón. En 1999 la Academia Nacional de Ciencias confirma que cualquier exposición al radón presenta riesgos a la salud. En 2009 OMS (WHO Handbook on Indoor Radon) confirma que existe relación

entre el radón en interiores y el cáncer al pulmón incluso con concentraciones bajas. En 2010 se crea una acción para eliminar el cáncer inducido por radón (AARST, 2014). Además, el radón se encuentra en estado gaseoso por ende no es retenido significativamente en el tracto respiratorio, el 90% de los descendientes pueden estar unidos a partículas aerosoles que se encuentran en el medio y serán retenidas en distintas zonas del sistema respiratorio según su tamaño (NTP440, 1999).

#### 2.4.2. Factores que Influyen la Entrada de Radón en Edificaciones

Según AARST (2014), señala que los siguientes factores son los causantes de incrementar la concentración de radón en interiores:

- **Fortaleza de la fuente:** Concentración de radón que existe en el suelo y escapa en forma de gas. La concentración de radón en el gas del subsuelo puede variar mucho de un edificio a otro, incluso puede variar en diferentes partes del edificio.
- **Movilidad del gas:** Se dan por ciertas características geológicas debajo de un edificio como grietas, fisuras o cavidades de solución, estas pueden servir como una conexión directa entre los minerales productores del radón y la base del edificio.
- **Estructura y construcción:** Cualquier edificio puede tener un problema de radón, incluso cuando el diseño y la construcción del edificio entra el radón como impacto y en los materiales que son usados en la construcción.
- **Sistemas mecánicos:** Tipo, diseño, sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado.

## 2.5. Métodos de Detección del Radón

### 2.5.1. Detectores Pasivos

#### Detector de Trazas Electrónico

Es un método pasivo muy usado para la medición de radón por un largo periodo de tiempo, su función se basa en que el radón deja sus descendientes por lo que deja una huella o también llamada traza sobre un material plástico que está compuesto por carbonato o bicarbonato y nitrato de celulosa, situado en el interior de un contenedor. La huella visible que deja el radón se contabiliza mediante microscopía, en la actualidad existen muchos detectores de trazas electrónicos y son muy comerciales (García, 2016).

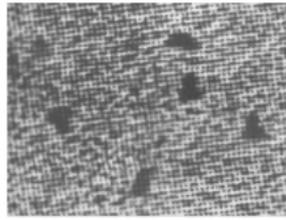


Figura 3. Detector de trazas electrónico pasivo marca SARAD.

Tomado de SARAD, 2002.

#### Detector de Huellas Nucleares (SSNTDs)

Es un detector pasivo para medir radón, el material que contiene en su interior es nitrato de celulosa LR115 Tipo 2 (Figura 4), con un espesor de 112  $\mu\text{m}$ , es muy sensible, pueden ser almacenados en periodos extensos incluso superiores a un año; otra de sus características es que no les afecta la radiación electromagnética como los rayos X y radiación Gamma (Pereyra, López, Vilcapoma, Pérez y Rojas, 2015).



Alpha partides in cellulose nitrate

*Figura 4.* Partículas Alfa en nitrato de celulosa.

Tomado de UNAM, s.f.

### 2.5.2. Detectores Activos

#### AlphaGUARD

El detector AlphaGUARD es un monitor de método activo para medir radón, se caracteriza por tener una cámara de ionización de 0.5L, los tiempos de muestreo van de diez minutos hasta una hora, también se pueden incorporar sondas para la medición de presión atmosférica, humedad relativa y temperatura (Figura 5) (Bertinstruments, 2016).



*Figura 5.* Detector de radón ALPHAGUARD.

Tomado de Bertinstruments, 2016.

#### RAD7 Monitor de Radón Electrónico

El RAD7 es un detector activo de radón (Figura 6), puede realizar mediciones de 1 a 2 días en cuanto a radón en aire y mediciones de 4 horas en agua, proporciona datos cada 30 minutos de las mediciones realizadas proporcionando datos de temperatura y humedad. Por otro lado muestra los descendientes que deja a su paso el  $Rn^{222}$  (NATS-USA, s.f).



Figura 6. Detector de radón electrónico RAD7.

Tomado de DurrIDGE, 2014.

## 2.6. Seguridad Radiológica

Existen varios métodos empleados para mantener un buen ambiente laboral para personas que están expuestas principalmente al radón, como en lugares de trabajo, sus hogares y puestos educativos. Las medidas de protección que se usan como por ejemplo son el uso protección personal (mascarillas), rotación de turnos (disminución del tiempo de exposición), ventilación mecánica con fines de dilución y confinamiento de alguna fuente de radiación. Mediante estas medidas ayudan a disminuir parcialmente la concentración del radón que puede ocasionar problemas a la salud por medio de la inhalación y en otros casos de ingesta (Ahmed, s.f).

La Organización Mundial de la Salud en el 2015 propone varias estrategias de prevención de radón, que son las siguientes:

1. **Despresurización activa del suelo (DAS):** consiste en uno o dos puntos de aspiración del aire por debajo del piso.
2. **Despresurización pasiva del suelo (DPS):** consiste en un tubo de ventilación que emplea la flotabilidad térmica del aire para despresurizar ligeramente el suelo de la edificación.
3. **Sellado de superficies:** ayuda al aumento de la inversión del diferencial de presión de aire que existe entre el interior de la edificación y el suelo.

4. **Uso de barreras y membranas:** limitan la penetración del radón y humedad al interior.
5. **Ventilación de espacios habitables y no habitables:** mediante extractores de aire, purificadores y ventilación normal.

## **2.7. Normativa**

### **2.7.1. Cuerpo Regulador en Ecuador**

Actualmente el Ecuador no cuenta con una normativa para el control de radiación de origen natural (radón) en hogares, en edificios existentes o futuros. El único documento que regula el control del uso de radiaciones ionizantes de origen natural es el Registro Oficial creado el 8 de marzo de 1979 para Seguridad Radiológica, controlando la dosificación que debe estar expuesto un organismo ocupacionalmente expuesto a materiales radiactivos (Reglamento de Seguridad Radiológica, 1979).

Por otra parte, el Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER), a través de la Subsecretaría de Control y Aplicaciones Nucleares (SCAN), es la entidad que se encarga de reglamentar y controlar las fuentes de exposición a radiaciones ionizantes, brindando servicios técnicos en cuanto a seguridad radiológica (Suarez y González, 2010).

### **Norma Técnica para la Gestión Segura de los Desechos Radiactivos y Fuentes Radiactivas Selladas en Desuso**

El Acuerdo Ministerial 283 redacta las siguientes actividades que generan materiales radiactivos de origen natural (NORM) y diferentes artículos para la gestión de residuos radiactivos en caso de industrias o empresas y como se deben sellar y tratar luego del uso. El artículo No. 20 del Acuerdo Ministerial 283 dice que debe haber procedimiento de los desechos radiactivos desde su

recolección hasta su tratamiento y el artículo No. 31 habla sobre la gestión de materiales radiactivos de origen natural (MEER, 2016).

## **2.7.2. Normativas Internacionales**

### **Normas básicas internacionales de seguridad Organismo Internacional de Energía Atómica**

Según el Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (2000), recomiendan que la dosis de radiación media anual a nivel mundial por la exposición de radiación de origen natural donde hace referencia al Rn<sup>222</sup> es de 2,4 mSv. Por otro lado, se establecen niveles de referencia para el radón<sup>222</sup> en lugares de trabajo, donde existan miembros públicos por lo que no debe exceder el promedio anual de concentración de 300 Bq/m<sup>3</sup>, o si hay un factor de equilibrio que sea de 0,4 y la tasa de ocupación anual laboral sea de 2000 horas, el valor de la concentración de radón será 300 Bq/m<sup>3</sup> correspondiendo a una tasa de dosis efectiva anual de 10 mSv/año dependiendo del trabajo ocupacional (OIEA, 2011).

### **Diario Oficial de la Unión Europea**

La Directiva Europea 2013/59/EURATOM, aprobó en el 2013 que el radón junto al tabaquismo son las causas principales que tiene riesgo a desarrollar cáncer de pulmón. La nueva normativa establece que se deben realizar mediciones en lugares de trabajo ubicadas en áreas de riesgo, generando niveles de referencia de concentraciones, el nivel de referencia de promedio anual para la concentración de actividad en lugares de trabajo y viviendas no deberá superar los 300 Bq/m<sup>3</sup>, y por otro lado, la Recomendación 1990/143/EURATOM establece 400 Bq/m<sup>3</sup> para viviendas existentes y 200 Bq/m<sup>3</sup> para nuevas viviendas (Diario Oficial de la Unión Europea, 2014).

### **Organización Mundial de la Salud**

Según la Organización Mundial de la Salud estableció que el nivel de referencia media anual nacional de radón es  $100 \text{ Bq/m}^3$ , si el nivel nacional de radón no puede alcanzar el límite establecido por diferentes condiciones de cada país, el nivel no debe superar los  $300 \text{ Bq/m}^3$  (OMS, 2016).

## Environmental Protection Agency

Según la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos, establece que los niveles de radón no deben ser superiores a  $148 \text{ Bq/m}^3$ , de ser así debe emplear planes de mitigación o arreglo de la casa o edificio donde pueda estar penetrado el gas (EPA, 2017).

### 3. CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

#### 3.1. Esquema de Metodología

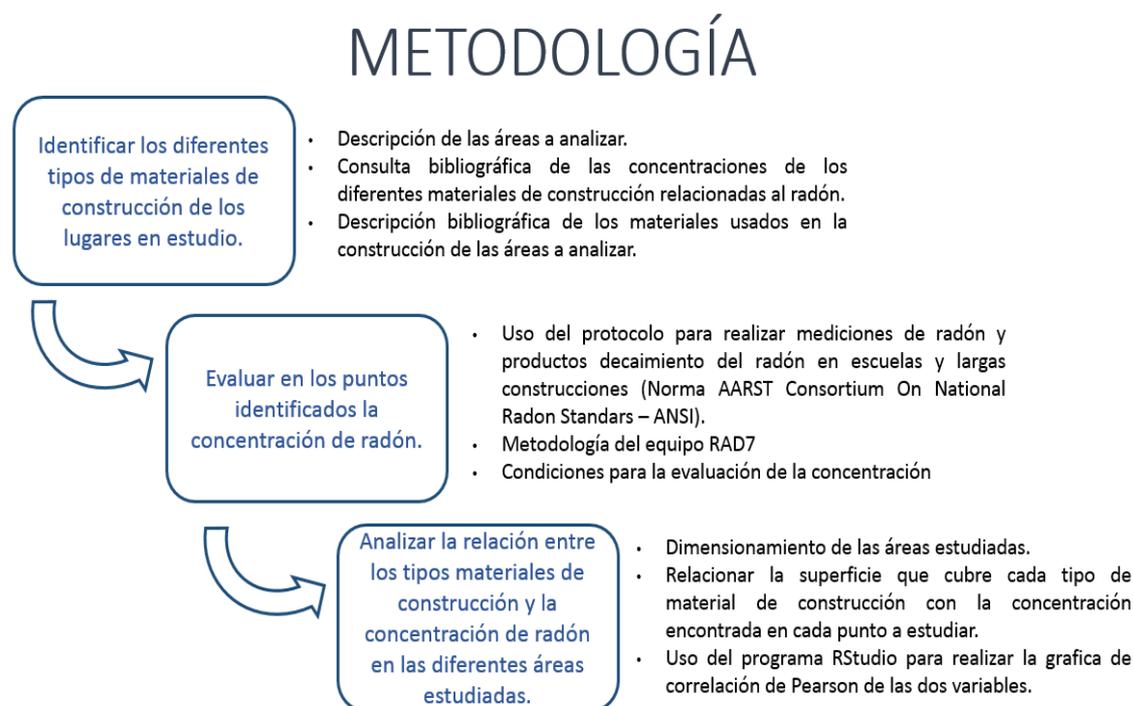


Figura 7. Esquema de metodología.

### 3.2. Selección de las Áreas de Estudio

El área de estudio fue ubicada el Centro Histórico de Quito por la antigüedad de las edificaciones, los materiales que fueron usados en su construcción, los hábitos de vivienda y el flujo de turistas que visitan las diferentes edificaciones. Respectivamente se eligieron edificaciones más destacables del centro de Quito (Figura 8): la Iglesia y Museo de la Catedral Primada de Quito, Iglesia de San Francisco de Quito. En estas edificaciones se analizó la presencia de gas radón, para tener el conocimiento de cuál es la dosis a las que están expuestas las personas del lugar, principalmente los guías turísticos que cumplen un papel fundamental en las instalaciones por un lapso largo de tiempo.



*Figura 8.* Mapa de puntos estudiados por su antigüedad y los materiales empleados en su construcción, puntos destacables del Centro Histórico de Quito en cuanto a turismo.

Adaptado de Google Earth, 2018.

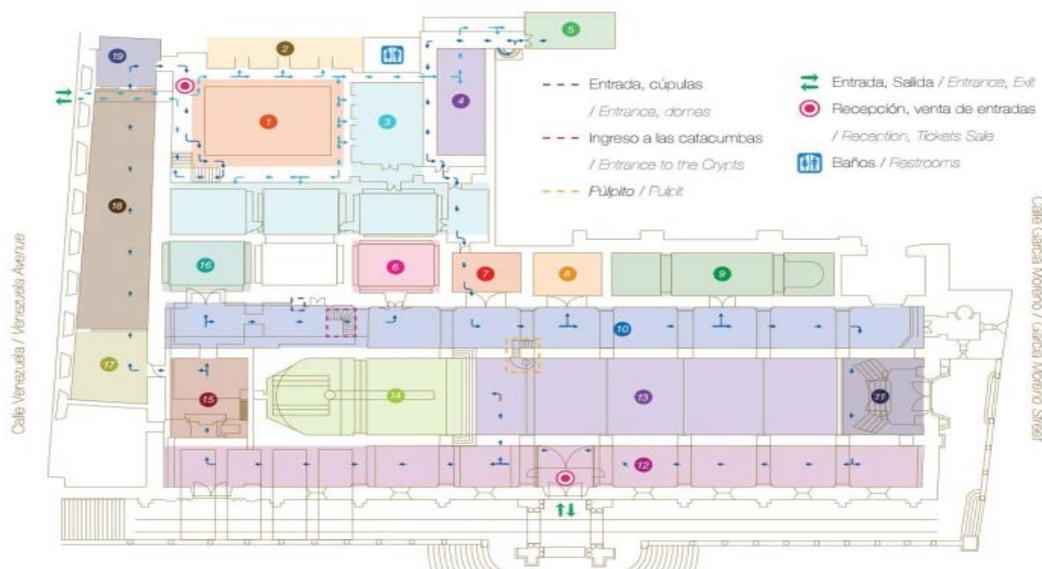
### **3.2.1. Descripción del Área de Estudio**

El área de estudio corresponde al Centro Histórico del Distrito Metropolitano de Quito, está ubicado en la provincia de Pichincha. El Centro Histórico de Quito actualmente comprende 376 hectáreas de espacio urbano teniendo en una población aproximada de 40.000 habitantes, en el año de 1978 fue declarado por la UNESCO como el primer Patrimonio Cultural de la Humanidad. Este centro histórico considerado como uno de los conjuntos más antiguos e importantes de América Latina con 130 edificaciones de carácter monumental de las cuales las Iglesias ocupan el 18,89% del área patrimonial (MIDUVI, 2015).

#### **Iglesia de la Catedral Primada**

La Iglesia de la Catedral fue fundada en 1535, sus paredes eran de barro y el techo de paja, en 1545 fue nombrada Catedral. Comienza su construcción a cargo del primer cura que estaba en su administración conocido como el padre dominicano Reginaldo de Lizárraga. El edificio mayor es de adobe y la cubierta de madera labrada. El obispo García Díaz Arias comienza la construcción en el año de 1557. Sus bases de piedra, paredes de ladrillo y el techo cubierto con teja; estas bases fueron realizadas en 1562 cuando se derribó la primera construcción para construir uno nuevo y se considera que es la primera restauración.

El 29 de junio de 1572 fue inaugurada por el obispo Pedro de la Peña. En 1660 hubo un terremoto por lo que tuvo que ser restaurada por segunda vez, en la que se añadieron dos naves laterales llamadas sacristía de mayor tamaño y la sala del capítulo canonical (Figura 9). Luego de los sismos de 1755 y 1795 tuvo que ser restaurada una tercera vez por el español Antonio García, introduciendo arquitectura de neoclasicismo, conectando el atrio con la plaza mayor o también llamada plaza grande (Escudero, 2006).



*Figura 9.* Mapa del interior de la Iglesia de la Catedral, se ubica las naves de la iglesia, las entradas y salidas a la Iglesia y parte del museo.

Tomado de Alemán, Díaz, Gómez y Gáneas, 1998.

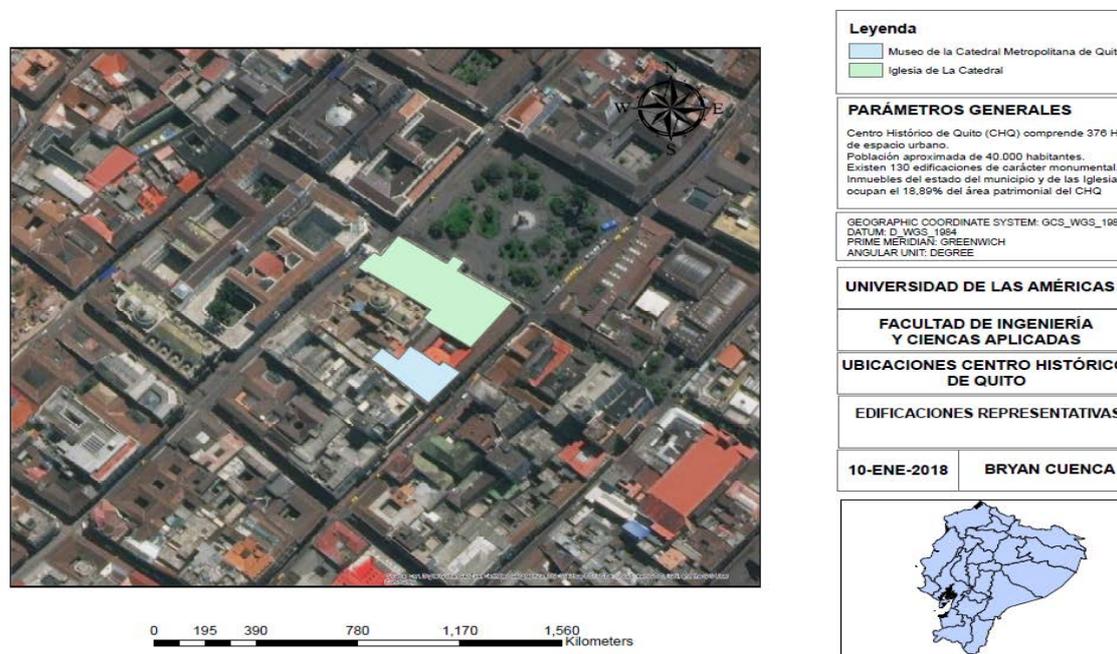
### **Museo de la Catedral Primada**

El Museo de la Catedral se remonta desde la construcción de la Iglesia de la Catedral, cuando se construye la casa de casillas llamada así por qué servía de correo público. La casa de casillas se construyó sobre los rellenos de la quebrada Jerusalén que desciende de las faldas del Pichincha. El primer piso servía para el correo, luego se construye una segunda planta en el siglo XVII y XVIII que servían para los señores canónigos y bodegas de la iglesia. Posteriormente se construye una tercera planta a finales del siglo XIX, que servían para la mampostería de vivienda para el Sacristán Mayor de la Iglesia de la Catedral, el cual se encargaba del mantenimiento de la iglesia. En los años del 2004 a 2006 se adecuó que se establezca en toda la planta inferior el Museo de la Iglesia de la Catedral (Catedral Metropolitana de Quito, 2016).

En el Museo de la Catedral (Figura 10) se puede encontrar desde objetos de culto, objetos sagrados, galerías de pinturas y vestimenta de los obispos de la religión católica. En la sala del tesoro se pueden encontrar ornamentos bordados a mano con hilo de oro, plata, cobre y bronce, usados por los sacerdotes para

eventos especiales, también hay una sala donde poseen 33 lienzos de los obispos, arzobispos de la Ciudad de Quito (Catedral Primada de Quito, 2016).

#### IGLESIA Y MUSEO DE LA CATEDRAL DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO



*Figura 10.* Mapa geolocalización del Museo e Iglesia de la Catedral. Están ubicados en el Centro Histórico de Quito cerca de la Plaza de la Independencia.

Adaptado de Google Earth, 2018.

Actualmente el museo y la iglesia cuentan con cuatro guías turísticos, el flujo mensual de turistas y residentes es de 180 personas, en ciertas ocasiones llega hasta 500 personas en temporadas altas como las de agosto a diciembre. Los lugares más confinados son las criptas que pasan cerradas de lunes a miércoles, están abiertas al público en general desde el día jueves a sábado, los horarios de atención son de 9:30 am a 17:00 pm.

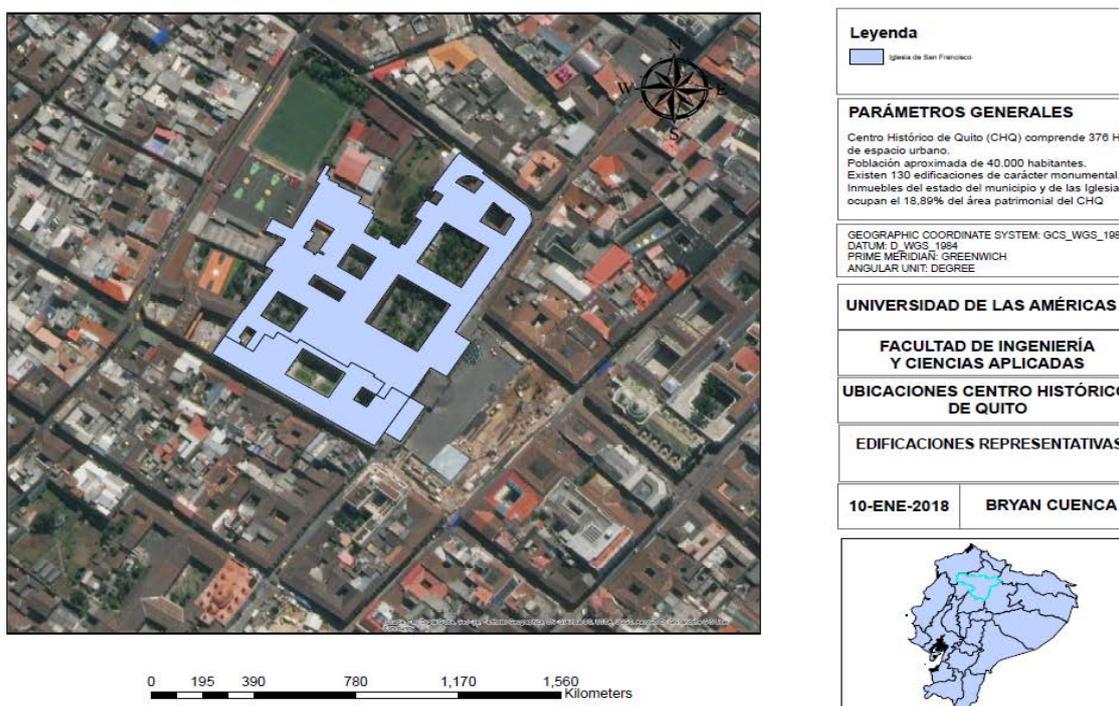
#### Iglesia de San Francisco de Quito

La Iglesia de San Francisco de Quito (Figura 11) es una de las iglesias más antiguas de Latinoamérica, su construcción inició en el siglo XVI alrededor del

año 1537 y culminó en el año 1680, sumándose a más de 150 años en su construcción (Webster, 2012).

Entro los materiales de construcción que se observan en los cimientos son piedras de cantera con mortero de cal y arena, la iglesia cuenta con una amplia plaza y un atrio de piedra sillar con una dimensión de 12 m de ancho por 110 m de largo. Su altura varía por la inclinación de la plaza teniendo un espacio de más de 4 m de altura, donde da espacio a 12 habitaciones abovedadas en su interior construidas con ladrillo y cal (Navarro, 1925).

#### IGLESIA SAN FRANCISCO DE QUITO



*Figura 11.* Mapa geolocalización Iglesia de San Francisco, una de las iglesias más antiguas de la ciudad de Quito, popular por la historia de Cantuña.

Adaptado de Google Earth, 2018.

### 3.3. Identificación de los Tipos de Materiales de Construcción

#### 3.3.1. Concentraciones de los Diferentes Materiales de Construcción Relacionadas al Radón

Los materiales de construcción que son usados generalmente son producidos a través de la materia prima que se encuentra en nuestro entorno, entre estas encontramos varias materias primas que tienen concentraciones radiactivas (Tabla 1), principalmente el  $U^{238}$  y el  $Th^{232}$  que por su desintegración en cierto lapso de tiempo llegara a descender a  $Rn^{222}$ .

Tabla 1.

##### *Materias primas*

<b>MATERIA</b>	<b>URANIO 238 (en ppm)</b>	<b>TORIO 232 (en ppm)</b>
Roca Areniscas	0.5	1.7
Rocas Carbonatadas	0.5	1.7
Rocas Basálticas	1	4
Suelo	1	6
Arcillas	3.5	11
Rocas Graníticas	5	12

Tomado de Quindos, 1995, pp.11.

Además, se han realizado estudios en la ciudad de Cuenca de los diferentes materiales de construcción como ladrillo, bloque, arena, cemento blanco y cemento gris, encontrando diferentes concentraciones que se relacionan a la densidad del material de construcción (Tabla 2). Los materiales que presentaron mayor concentración de radón fueron los bloques y ladrillos, y los materiales que presentaron menos concentración fue el cemento blanco, esto se puede relacionar a que materiales de construcción con menos concentración involucran más procesos para su elaboración por tal motivo la concentración de radón

puede desaparecer en su elaboración. Los materiales que se tomaron para este análisis fueron aleatorios de diferentes distribuidores y es muy difícil saber su procedencia; pero así mismo puede variar la concentración respecto al mapa geológico de uranio.

Tabla 2.

*Propiedades físicas de los materiales de construcción en concentración de radón en diferentes materiales de construcción.*

MUESTRA	SUB-MUESTRA	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Espacio Poroso (%)	CONCENTRACIÓN DE RADÓN (Bq/m <sup>3</sup> )
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 <sup>3</sup> ± 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

Tomado de Carpio, 2016.

### 3.3.2. Materiales Usados en la Construcción de las Áreas a Analizar

Se analizó el tipo de material de construcción de cada punto donde se realizó la evaluación de radón. La forma de análisis de los materiales de construcción fue

visualizando la superficie que cubren cada punto, de esta manera se saca el total del área que cubre.

### **3.4. Evaluación de la Concentración de Radón**

En la evaluación de la concentración de radón que se realizó en las edificaciones se usó el detector de radón RAD7. Las pruebas realizadas en los diferentes puntos de muestreo fue durante un día tomando en cuenta los lugares más cercanos al suelo donde la concentración de radón pueda ser más notable por contacto directo con el suelo. También se empleó el uso de protocolo para realizar mediciones de radón en largas construcciones de la norma establecida por la Asociación Americana de Científicos y Tecnólogos del Radón (AARST). Mediante la norma AARST se aplicó los requerimientos para realizar las mediciones donde se toma en cuenta el alto, la distancia de la puerta y ventanas, entre otras. Además se usó el equipo LUDLUM modelo 3-97 (Centellador de Yoduro de Sodio) y LUDLUM modelo 44-38 (Geiger-Müller) en cada punto estudiado para saber la tasa de dosis que se está expuesto en cuanto a radiación Beta y Gamma.

#### **3.4.1. Detector de Radón DurrIDGE RAD7**

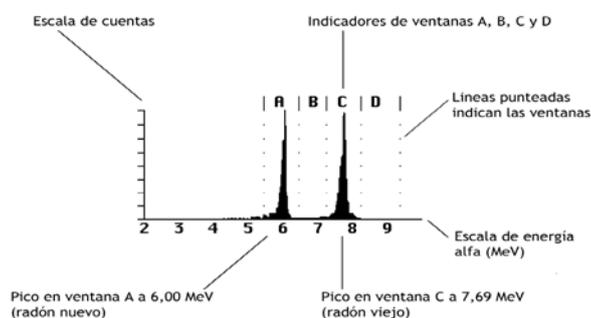
El equipo DurrIDGE RAD7 es un detector de radón versátil, es usado ampliamente en casas u hogares sino también en laboratorios y sitios de campo según sea la configuración del equipo. El RAD7 incorpora una bomba, una batería recargable y una impresora infrarroja inalámbrica (Figura 12), construido para resistir el uso exigente en el campo con una carcasa resistente y protectora. Más de 3000 equipos de RAD7 son usados en todo el mundo, abarcando desde evaluadores de radón hasta departamentos universitarios de investigación, gobiernos nacionales, municipalidades, y desde minas subterráneas de uranio hasta

instituciones de investigación de oceanografía. El RAD7 ha sido implementado en desiertos, volcanes a temperaturas y humedades extremas (DurrIDGE, 2014).



*Figura 12.* Detector electrónico profesional de radón RAD7.

El RAD7 incorpora una cámara de medición que contiene un campo electroestático, internamente los átomos de radón entran en el RAD7 y se desintegran, se depositan átomos de  $\text{Po}^{218}$  en la superficie plana de un ion implantado de silicio de detector Alfa. Las partículas Alfa subsecuentes de la cadena de decaimiento se cuentan y se registran su energía (Figura 13). Se identifican los isótopos de manera individual. Después de alrededor de 4.3 vidas medias o 13 minutos, la tasa de conteo del RAD7 es del 95% del valor de su equilibrio. Esto hace que el RAD7 sea especialmente adecuado para pruebas de radón cuando el tiempo es escaso o para seguir los cambios rápidos en la concentración de radón (DurrIDGE, 2014).



*Figura 13.* Espectro de energía Alfa, logra identificar los descendientes de  $\text{Rn}^{222}$  mediante canales de energía.

Tomado de DurrIDGE, 2014.

El RAD7 cuenta con un bomba interna la cual permite la entrada de aire al equipo por donde pasan los gases por medio de un filtro de fibra vidrio. Para realizar las mediciones debe contar con una humedad de aire inferior al 10%, esto se logra mediante la columna desecante de Drierita (Figura14) que está en el interior del filtro (Durrige, 2014). Otra de las características que hace un equipo notable es el espectrómetro Alfa que sirve para el rastreo o localización del radón, ya que busca los descendientes de vida corta como el  $Rn^{222}$  (Ashokkumar et al., 2013). La espectrometría se realiza mediante conversión de energía de la radiación Alfa del radón y sus descendientes por medio de una señal eléctrica directamente proporcional a su energía, abarcando rango de energías de 2 a 10 MeV.

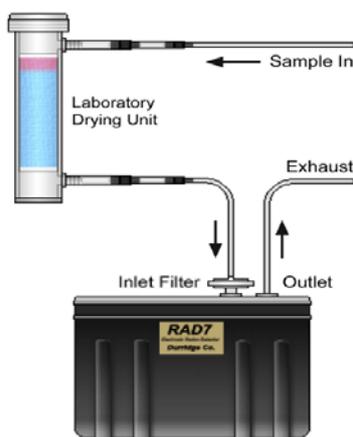


Figura 14. Monitor RAD7 y filtro de Drierita (Laboratory Drying Unit).

Tomado de Durrige, 2014.

Sumarizando, las principales ventajas del RAD7 son:

1. Respuesta rápida, detecta los niveles de acción de la EPA de  $148 \text{ Bq/m}^3$  en solo una hora.
2. Mide de forma independiente y simultanea el radón y torón.
3. Unidad compacta y portátil con estuche de transporte resistente.
4. Conexión serial y USB para uso de datos.
5. Opción de comunicación remota inalámbrica – Bluetooth (Durrige, 2014).

### 3.4.2. Técnica de Medición

Para realizar la medición con el equipo de RAD7 se debe seguir los siguientes pasos:

1. Primero se debe adosar el filtro de Drierita a la tubería del extremo del enganche, la tubería deberá estar conectada al filtro, el otro extremo estará suelto para conectarlo al monitor del RAD7 (ver Figura 14).
2. Adosar la tubería que está conectada al filtro de secado (Drierita) a la entrada de aire del monitor de radón.
3. Enchufar el RAD7 a corriente continua (luz eléctrica) y colocar la impresora bluetooth al monitor de radón.
4. Luego se debe configurar en Menú el purgado (purgar 5 a 20 minutos), ya que el equipo debe tener un índice de humedad relativa menor al 10%.
5. Después de purgar el equipo configurar en Protocolo la prueba de un día para realizar el análisis.
6. Finalmente ubicar en el menú el comienzo de la prueba.

### 3.4.3. Protocolo para realizar mediciones de Radón

**Protocolo para realizar mediciones de Radón y Productos decaimiento del Radón en Escuelas y Largas Construcciones (Norma AARST Consortium On National Radon Standards – ANSI).**

#### **Requerimientos para la evaluación de la concentración de radón**

Según AARST (2014), el lugar establecido para los detectores entre zonas generales y ubicación de los detectores deben seguir requerimientos específicos. Primero hay que localizar el detector a 90 centímetros del punto de la puerta y ventana u otro potencial de aberturas al aire libre, 50 centímetros desde el piso. Si la habitación no cuenta con ventanas será 30 centímetros del exterior de la pared de la construcción (Figura 15). Para la ubicación del equipo son 10 centímetros de otra prueba de detectores y objetos que están alado o arriba del detector. Estos requerimientos de los 10 centímetros se pueden

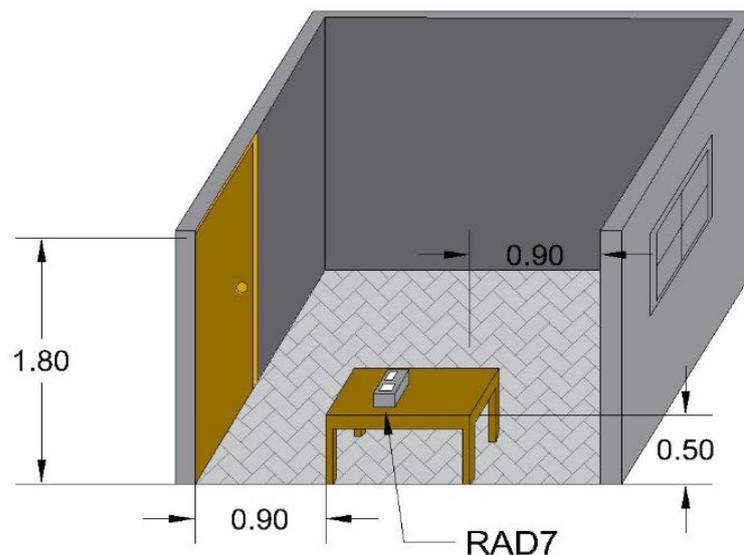
confirmar con la manufacturación o los requerimientos de laboratorio del detector. Para habitaciones que tengan más de 2.5 metros de altura la ubicación del detector será a 30 centímetros del piso.

#### Requerimientos adicionales:

- Ubicación del detector donde no sean fácilmente perturbados.
- Seleccionar una posición donde no exista perturbación del detector durante el periodo de prueba.
- Ubicar una localización de mayor preferencia donde no sea movido el detector o tener que alterar su rendimiento de prueba.

#### Ubicación del detector donde no sean influenciados por otros factores:

- No ubicar el detector dentro de armarios o espacios cerrados.
- No ubicar el detector en áreas cerradas o dentro de velocidad de aire altas como una salida de aire de edificaciones.
- No ubicar el detector entre lugares cerrados o áreas de alta humedad.



*Figura 15.* Requerimientos de distancia (en metros) para realizar la medición de radón en una habitación que cuente con ventanas.

#### **3.4.4. Tasa de Dosis**

Se realizó la medición de tasa de dosis de los diferentes puntos analizados, se usó el equipo LUDLUM (Modelo 3-97 y 44-38) (Figura 16), el cual mide radiación Beta y Gamma (de alta energía y baja energía).

##### **Modelo 3-97 Gamma**

Modelo 3-97 Gamma es un equipo portable, que incorpora un centellador interno que mide bajo niveles de radiación Gamma, también cuenta con la capacidad de incorporar un sonda externa. La carcasa del equipo es de aluminio fundido de 0.23 cm, incorpora un altavoz operativo para apreciar el aumento de radiación como una norma de seguridad. El detector interno es de un centellador de Yoduro de Sodio (NaI) de 2.5 cm x 2.5 cm, resiste voltajes ajustados desde 400 a 1500 V. Los rangos de medición van de x0.1, x1, x10 y x100, las mediciones corresponden a la configuración de respuesta Lenta (S) y Rápida (F). La medición Lenta corresponde a tiempos de 22 segundos para que el medidor se estabilice (la última lectura que el medidor toma), y la medición Rápida corresponde a tiempos de 4 segundos mediciones de alta desviación por sus valores (LUDLUM Measurements, 2016).

##### **Modelo 44-38 Beta y Gamma**

El Modelo 44-38 Beta y Gamma es la incorporación de la sonda para el modelo anterior (Figura 16). Es un detector Geiger-Müller (G-M) que mide radiaciones Beta y Gamma. La sonda incorpora una ventanilla para poder abrir y cerrar, la ventanilla abierta sirve para mediciones de radiación Beta, y cerrada para mediciones de radiación Gamma. Incluye un cámara de 30 mg/cm<sup>2</sup> de acero inoxidable con un halógeno enfriador de G-M, la sensibilidad del medidor Gamma es de 1200 CPM de Cesio-137 y de energías Beta que se aproximan a 200 keV (LUDLUM Measurements, 2016).



*Figura 16.* Detector radiación Beta y Gamma – LUDLUM (modelo 3-97).

### **3.5. Relación entre los Tipos de Materiales de Construcción**

#### **3.5.1. Dimensionamiento de las Áreas Estudiadas**

El dimensionamiento de las áreas de estudio se realizó mediante el uso de un flexómetro, midiendo cada habitación o espacio monitoreado. Para la altura de cada lugar se usó una escalera y, finalmente se pudo sacar el área total de cada sitio para conocer el material de construcción que la cubre. También se tomó en cuenta el número de ventanas, extractores de aire y puertas para disminuir el espacio de área total que cubre el tipo de material de construcción.

#### **Iglesia de la Catedral**

En la Iglesia de la Catedral se monitoreo la parte más cercana al piso que son las criptas. Los puntos que se analizaron fueron tres, al inicio de la cripta, la segunda parte de la cripta y la parte final de la cripta que es la parte más antigua (Figuras 18 y 19) y sin acceso a la ventilación, ya que las criptas cuentan con tres salidas de aire de un diámetro de 50 centímetros que se dirigen a las naves

de la iglesia cercanas al atrio, el equipo se ubicó como se ve en le Figura 17 dentro de las criptas.



*Figura 17.* Monitoreo con el equipo RAD7 en la Iglesia de la Catedral

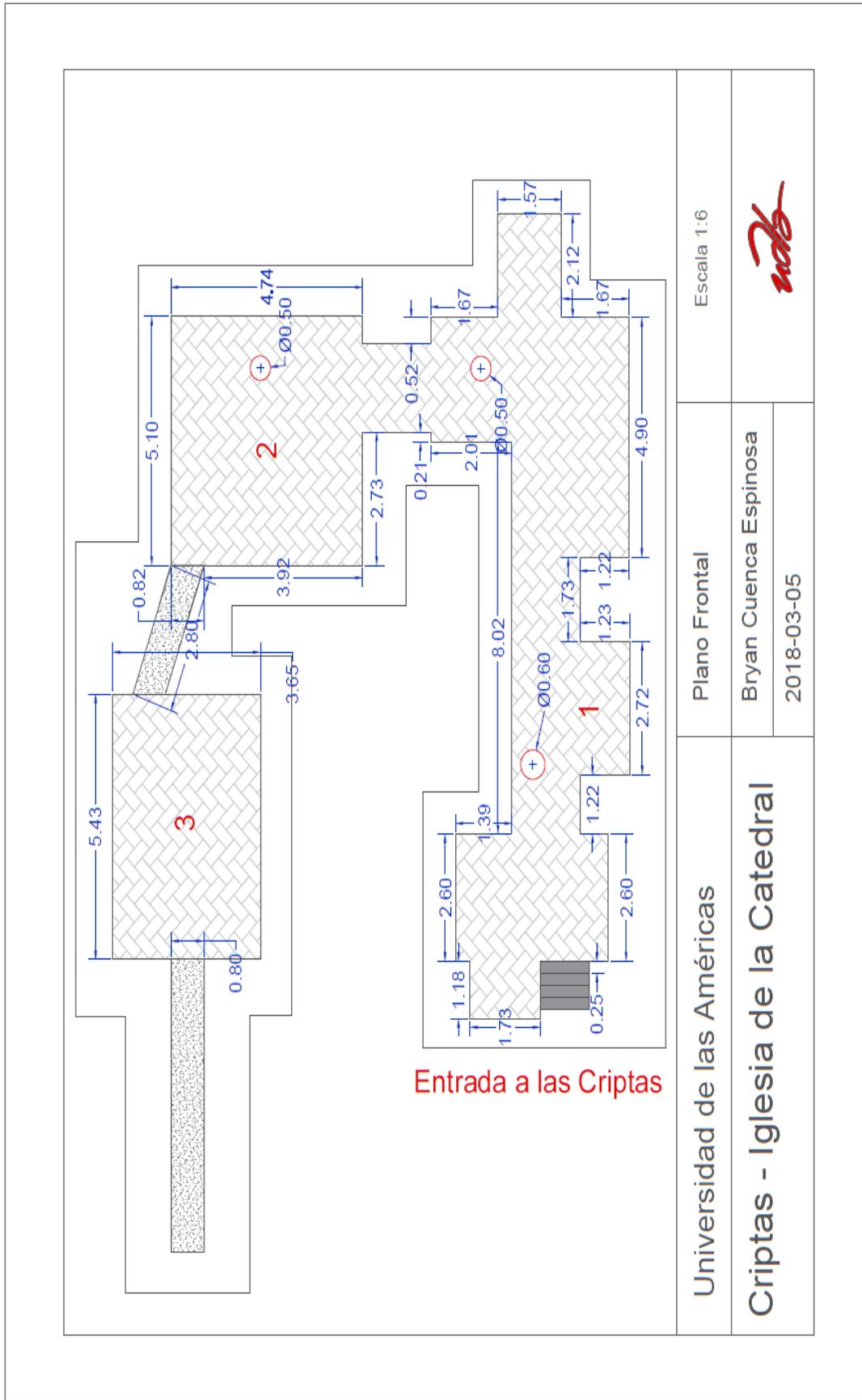


Figura 18. Dimensionamiento de las criptas de la Iglesia de la Catedral.

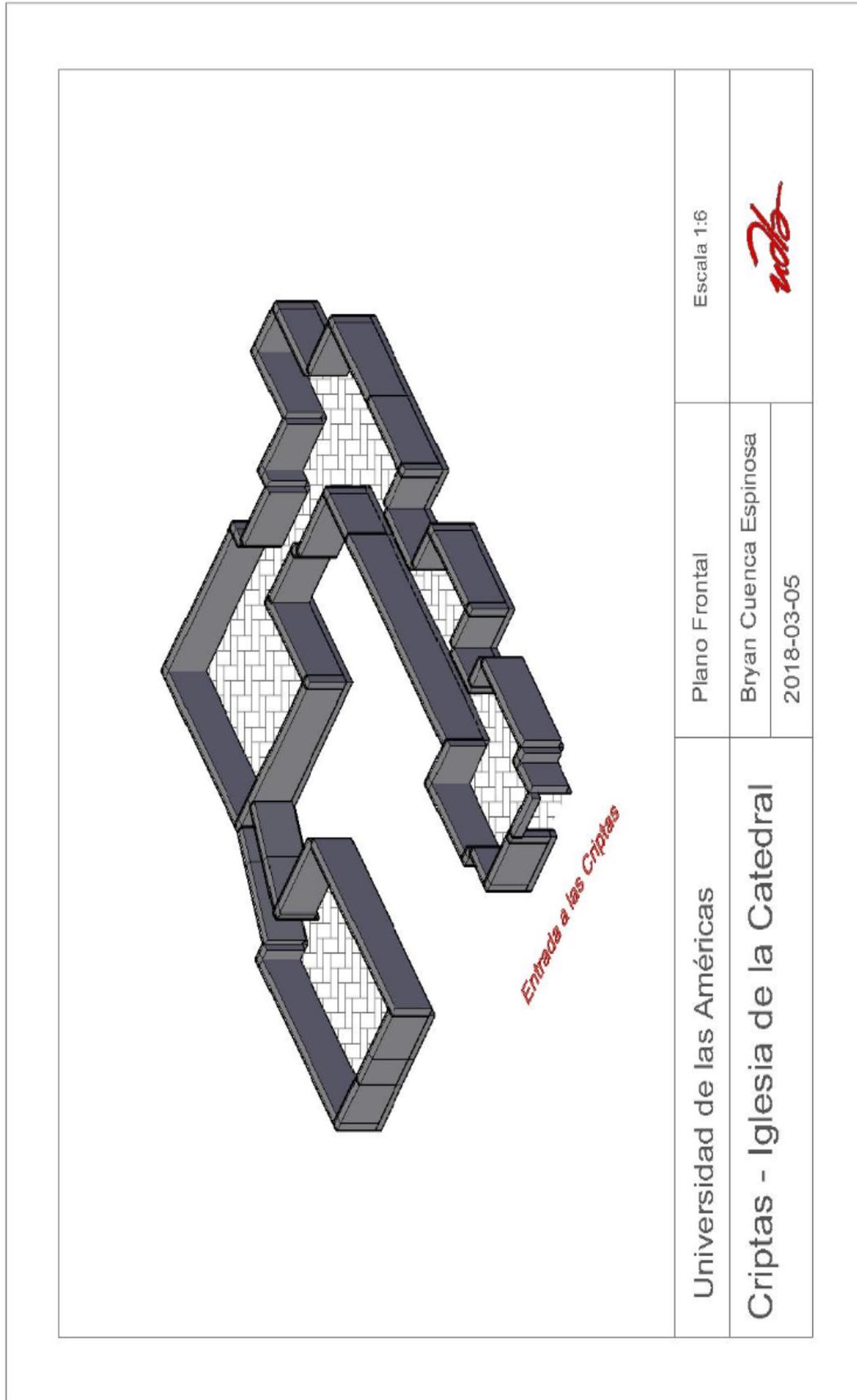


Figura 19. Criptas de la Iglesia de la Catedral 3D

### Museo de la Catedral Primada de Quito

En el Museo de la Catedral Primada de Quito, se monitoreo cuatro zonas que están más cercanas al suelo. Las habitaciones que se realizaron las mediciones corresponden a la habitación No.3 (Pinturas), habitación No. 4 (Pinturas y Objetos de culto), habitación No.6 (Objetos Sagrados) y habitación de las reservas del museo (Figuras 21 y 22). También se monitoreo tasa de dosis Gamma y Beta (Figura 20).



*Figura 20.* Monitoreo de tasa de dosis en el Museo de la Catedral.

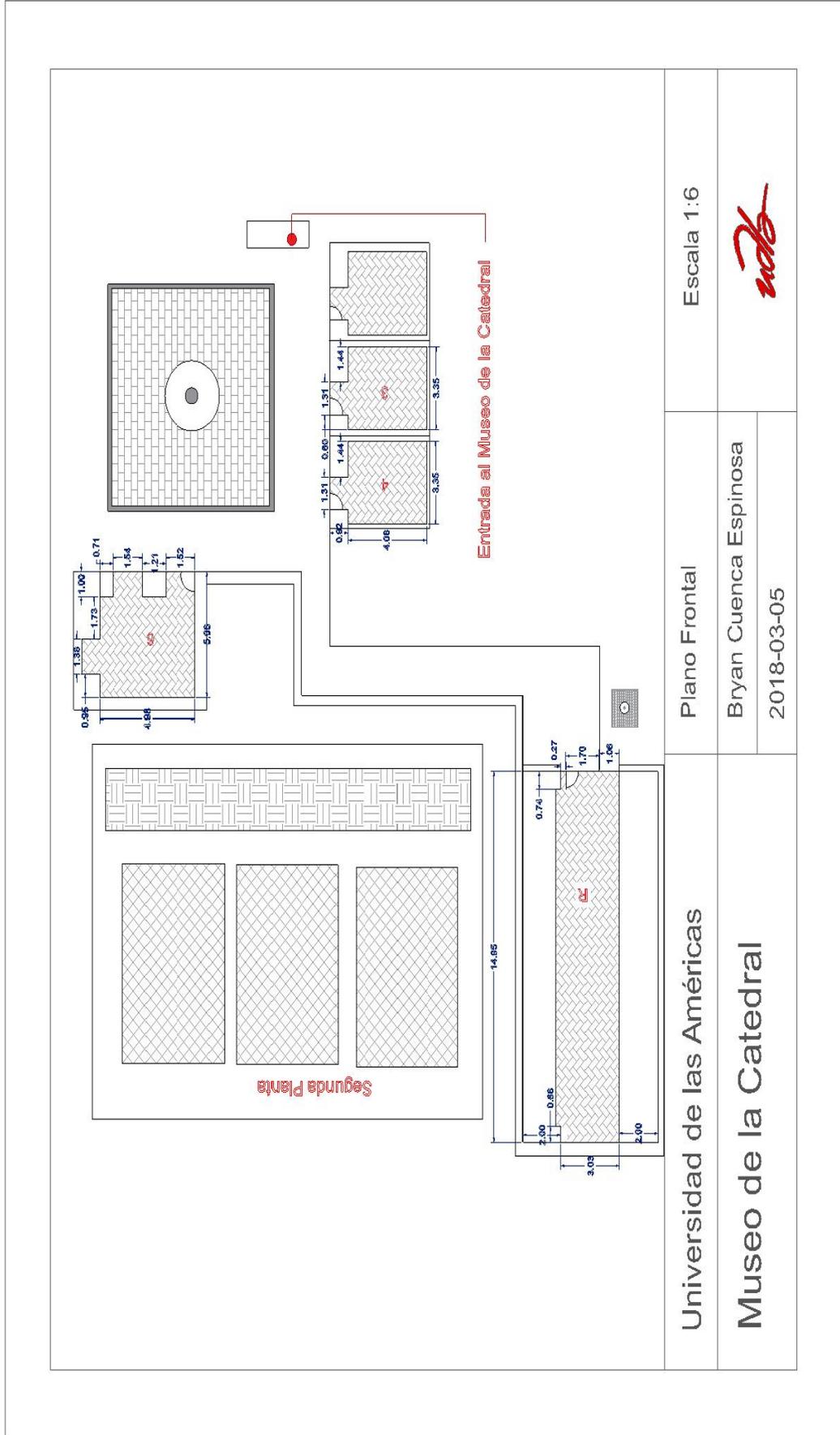


Figura 2.1. Dimensionamiento de los puntos analizados del Museo de la Catedral.

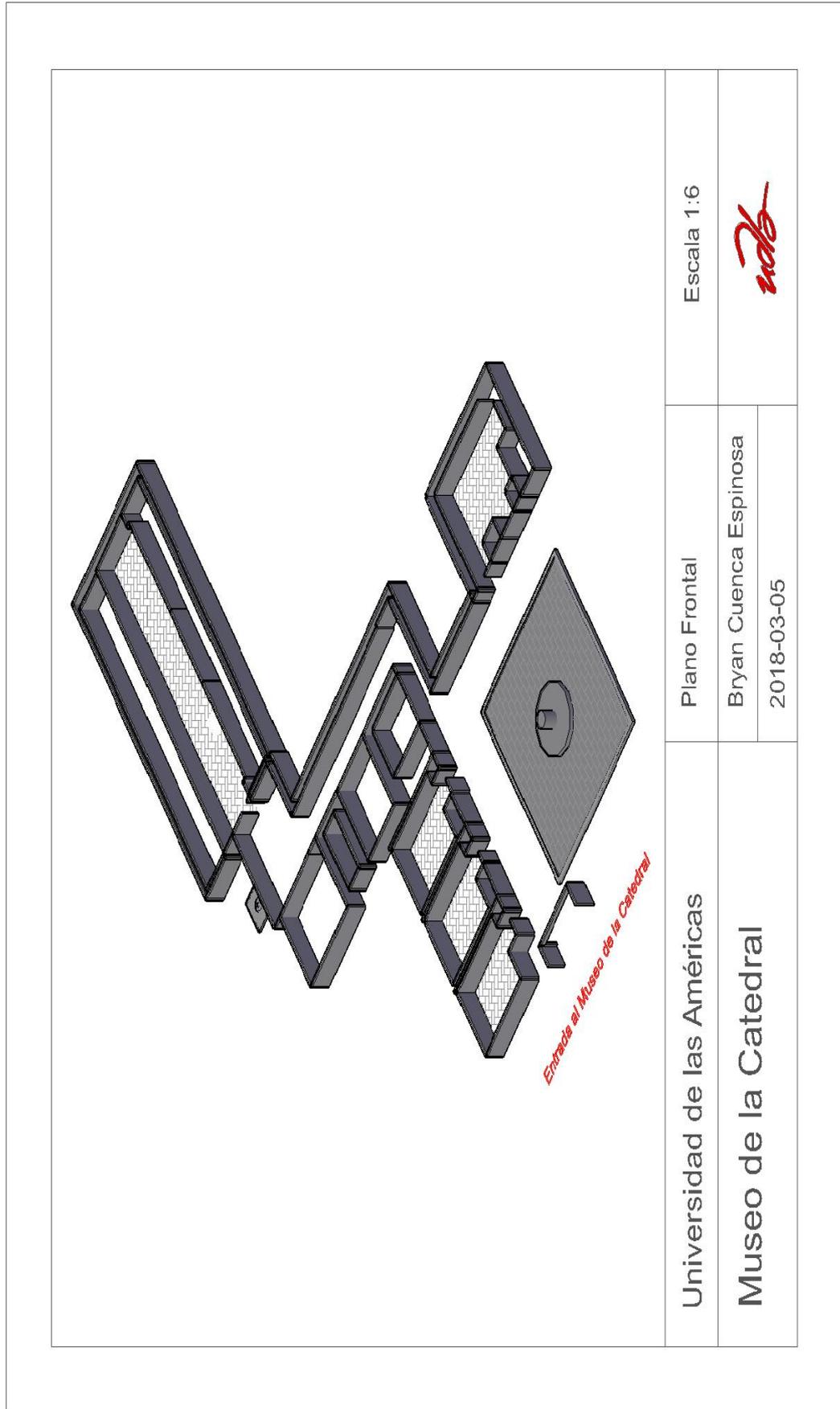


Figura 22. Museo de la Catedral 3D.

## Iglesia San Francisco de Quito

En la Iglesia de San Francisco de Quito, se monitoreo cinco áreas que están más cercanas al suelo (Figura 23), fueron la habitación de las reservas el cual ocupan dos zonas de la iglesia. También se monitoreo en la parte de las bóvedas o criptas ya que eran las partes más próximas a las naves de la iglesia y por lo que se pueden cumplir con los parámetros de la norma AARST. Las bóvedas analizadas fueron las Bóvedas #2-4. Se presume que existen salidas de aire por el deterioro de la edificación, ya que existen zonas que aún no se han restaurado en su totalidad por lo que no se pueden cumplir todas las aberturas de la parte superior donde se realizó el monitoreo (ver Figuras 24 y 25).



Figura 23. Monitoreo con el equipo RAD7 en la Iglesia de la San Francisco.

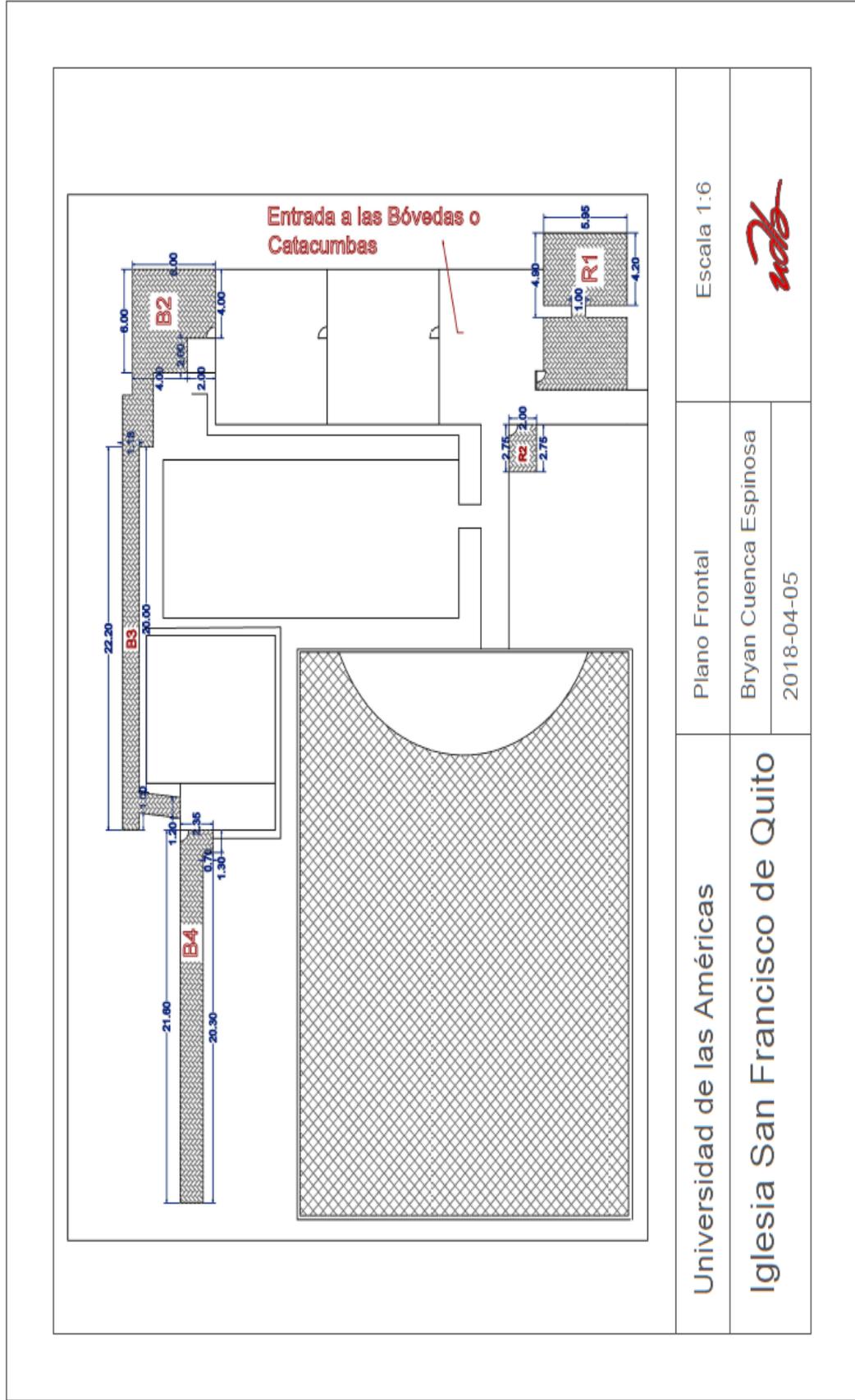


Figura 24. Dimensionamiento de los puntos analizados de la Iglesia de San Francisco.

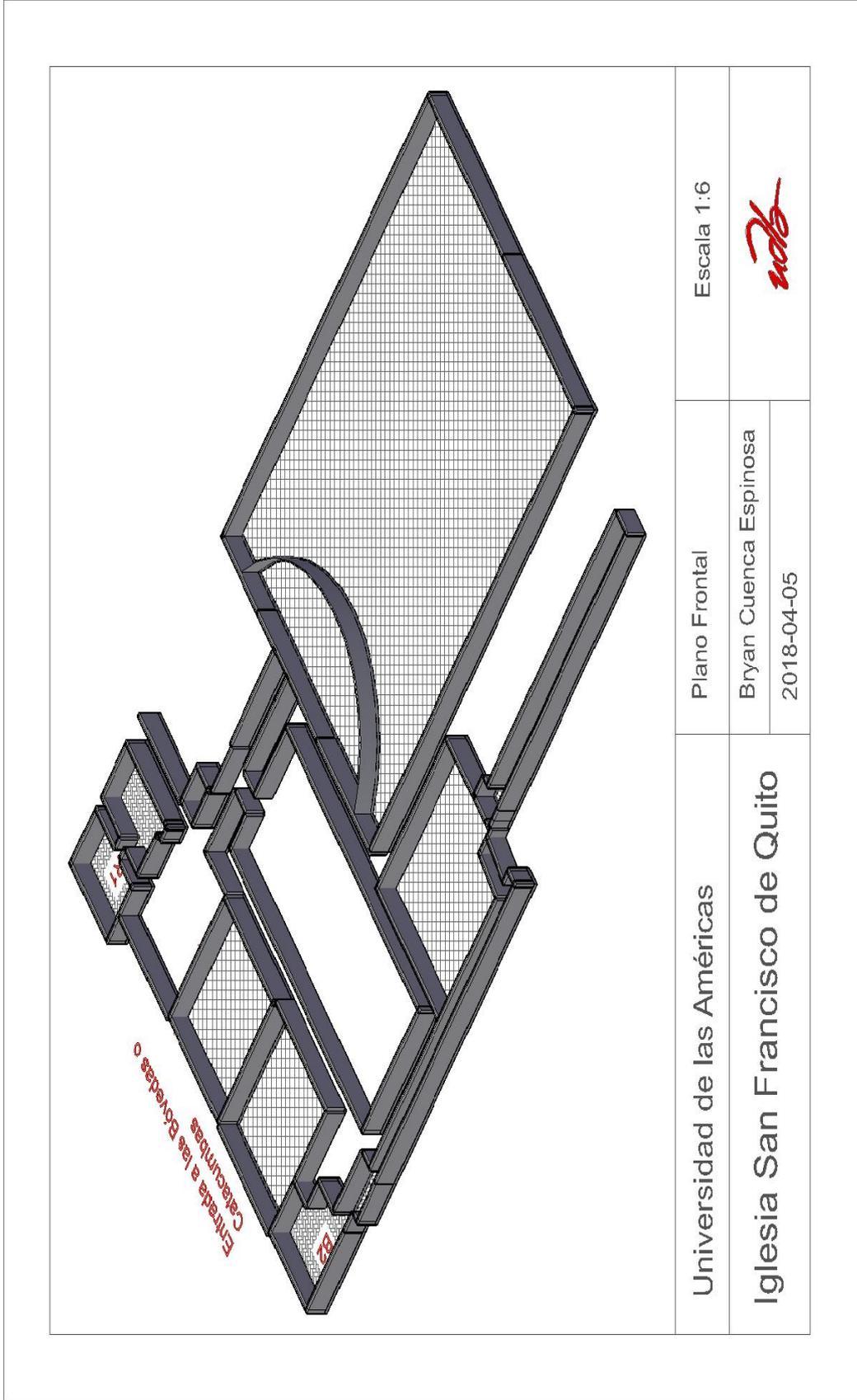


Figura 25. Iglesia de San Francisco 3D.

### 3.5.2. Correlación de Datos

Dentro del proyecto se incorporó la correlación de datos usando programas para conocer la relación de los materiales de construcción con la concentración de radón analizada en cada sitio. Los datos obtenidos se usaron en el software RStudio para determinar si la correlación es positiva, negativa, lineal o no lineal. Es muy importante correlacionar los datos para conocer la relación de la superficie del tipo de material de construcción y la concentración medida en cada punto. La correlación de datos se realizó mediante los parámetros físicos medidos como la temperatura, presión atmosférica, humedad relativa y viento, en este caso, el viento es despreciable porque el promedio es relativamente de 0 m/s por lo que no existe influencia en la concentración de radón evaluada.

### 3.6. Ecuaciones Relacionadas a la Concentración de Radón

Se utilizaron diferentes ecuaciones para conocer los efectos biológicos producidos por la radiación en este caso del  $Rn^{222}$ , como la tasa de dosis anual, concentración de radón viendo parámetros de WL – WLM (Working Level Month) y casos de cáncer que puede ocurrir en la población expuesta.

#### 3.6.1. Potencial de Concentración de Energía Alfa en Términos de WL

$$PCE = \frac{(F * C_{Rn})}{3700} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde

- F = Factor de equilibrio (0.4)
- $C_{Rn}$  = Concentración de radón ( $Bq/m^3$ )

Términos de: (WL)

### 3.6.2. Exposición a los Descendientes de Radón

#### 1.4.2.

$$EDR = \frac{(n \cdot 2000 \cdot F \cdot C_{Rn})}{167 \cdot 3700}$$

**Ecuación 2**

Dónde

- $n$  = Factor de tiempo pasado en interiores (0.4)
- 2000 = Total de horas al año trabajando (h/año)
- $F$  = Factor de equilibrio (0.4)
- 167 = Total de horas trabajadas al mes (h)
- $C_{Rn}$  = Concentración de radón ( $Bq/m^3$ )

Términos de:  $\left(\frac{WLM}{año}\right)$

### 3.6.3. Dosis Anual Efectiva

$$DAE = C_{Rn} * F * H * T * D$$

**Ecuación 3**

Donde:

- $C_{Rn}$  = Concentración de radón ( $Bq/m^3$ )
- $F$  = Factor de equilibrio (0.4)
- $H$  = Factor de ocupancia (0.8)
- 2000 = Total de horas al año trabajando (h/año)
- $D$  = Factor conversión de la dosis ( $9 \times 10^{-6} \text{ mSv} \cdot \text{m}^3/\text{Bq} \cdot \text{h}$ )

Unidad:  $\left(\frac{mSv}{año}\right)$

### 3.6.4. Casos de Cáncer de Pulmón por Año/Millón de Personas

$$IRC = DAE * 18 * \frac{10^{-6}}{\text{mSv}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

- DAE = Dosis Anual Efectiva (mSv/año)

## 4. CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 3, se presenta el área que cubre cada tipo de material de construcción que se usó, de acuerdo a la zona estudiada, para conocer si depende o se relaciona con la concentración de radón analizada.

En varias edificaciones se encontraron otros tipos de materiales de construcción como el adobe en los puntos estudiados más antiguos, ya que por lo general se usaban estos materiales, como en la Iglesias de San Francisco y de la Catedral Primada, donde su historia toma curso a partir del Siglo XVI. Años después se fueron usando tipos de materiales como el cemento, bloque y yeso en nuevas construcciones dentro de la edificación, como la construcción de nuevas habitaciones.

Cada zona monitoreada tiene diferentes áreas a diferencia de la habitación 3 y 4 del Museo de la Catedral que correspondan a dimensiones significativamente iguales. También se debe especificar las dimensiones de la habitación de las Reservas del Museo donde hay vitrinas a los lados donde se sitúan las un espacio de 2 metros de largo por lo que no cuenta como pared de algún tipo de material de construcción. Se midieron las diferentes zonas que cubre cada tipo de material para conocer si la proporción del que ocupa en las zonas analizadas tiende a intervenir en la concentración de radón.

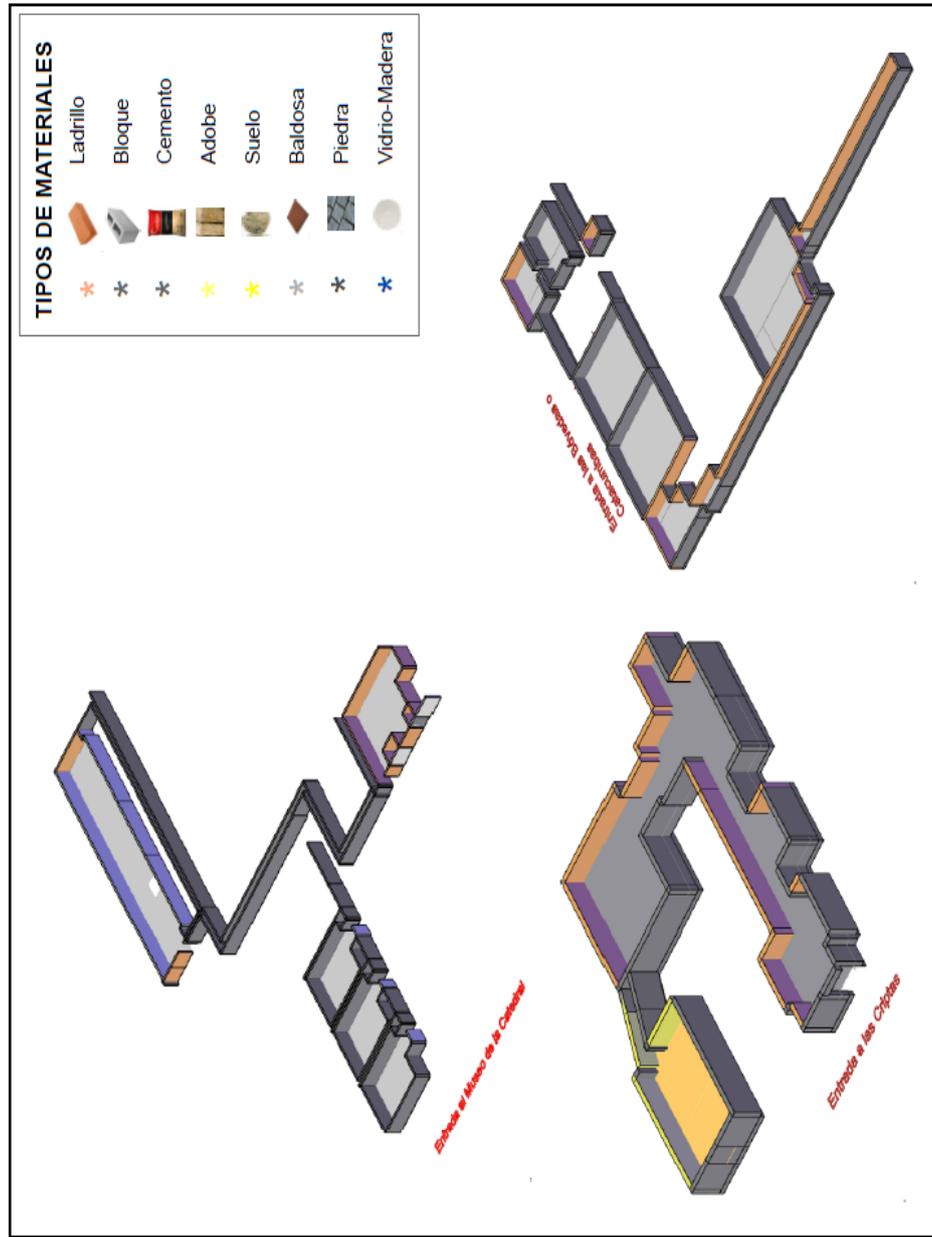
Tabla 3.

*Superficies de los diferentes materiales de construcción*

Edificación	Puntos Analizados	Lugar Monitoreado	Tipo de material	Superficie Cubierta (m <sup>2</sup> )	Superficie Cubierta %
Iglesia de la Catedral	Cripta #1	Techo	Cemento ; Ladrillo	6.00	25.42
		Pared	Ladrillo ; Cemento	11.60	49.16
		Piso	Piedra Andesita	6.00	25.42
	Cripta #2	Techo	Cemento ; Ladrillo	24.20	27.38
		Pared	Ladrillo ; Cemento	40.00	45.24
		Piso	Piedra Andesita	24.20	27.38
	Cripta #3	Techo	Adobe ; Ladrillo	15.20	22.55
		Pared	Adobe ; Ladrillo	37.00	54.90
		Piso	Suelo	15.20	22.55
Museo de la Catedral	Habitación #3	Techo	Yeso	14.90	19.79
		Pared	Bloque ; Cemento	45.50	60.42
		Piso	Baldosa	14.90	19.79
	Habitación #4	Techo	Yeso	14.90	19.79
		Pared	Bloque; Cemento	45.50	60.42
		Piso	Baldosa	14.90	19.79
	Habitación #6	Techo	Yeso	24.50	21.84
		Pared	Bloque ; Cemento	63.20	56.32
		Piso	Baldosa	24.50	21.84

Habitación	Techo	Yeso	45.30	44.72
Reservas	Pared	Bloque ; Cemento	10.70	10.56
	Piso	Baldosa	45.30	44.72
<b>Iglesia de San Francisco</b>				
Reservas de las	Techo	Cemento ; Ladrillo	25.00	23.65
Iglesia #1	Pared	Ladrillo ; Cemento	55.70	52.70
	Piso	Baldosa	25.00	23.65
Reservas de las	Techo	Cemento ; Ladrillo	5.50	13.92
Iglesia #2	Pared	Ladrillo ; Cemento	28.50	72.16
	Piso	Baldosa	5.50	13.92
Bóveda #2	Techo	Cemento ; Ladrillo	34.00	22.37
	Pared	Ladrillo ; Cemento	84.00	55.26
	Piso	Baldosa	34.00	22.37
Bóveda #3	Techo	Cemento ; Ladrillo	26.20	11.36
	Pared	Ladrillo ; Cemento	178.30	77.28
	Piso	Baldosa	26.20	11.36
Bóveda #4	Techo	Cemento ; Ladrillo	36.55	14.32
	Pared	Ladrillo ; Cemento	182.20	71.36
	Piso	Baldosa	36.55	14.32

## TIPOS DE MATERIALES DE CONSTRUCCION EN LAS EDIFICACIONES



PUNTOS MONITOREADOS	
<b>Museo de la Catedral</b>	Toda los puntos analizizados cuenta con los mismos tipos de materiales.
<b>Techo</b>	Yeso
<b>Pared</b>	Bloque ; Cemento
<b>Piso</b>	Baldosa
<b>Iglesia de la Catedral Primada</b>	Cripta #1 y #2
<b>Techo</b>	Cemento ; Ladrillo
<b>Pared</b>	Cemento ; Ladrillo
<b>Piso</b>	Piedra Andesita
	Cripta #3
<b>Techo</b>	Adobe ; Ladrillo
<b>Pared</b>	Adobe ; Ladrillo
<b>Piso</b>	Suelo
<b>Iglesia San Francisco de Quito</b>	Toda los puntos analizizados cuenta con los mismos tipos de materiales.
<b>Techo</b>	Cemento ; Ladrillo
<b>Pared</b>	Cemento ; Ladrillo
<b>Piso</b>	Baldosa
<b>UNIVERSIDAD DE LAS AMERICAS</b>	
<b>FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS APLICADAS</b>	
<b>EDIFICACIONES DEL CENTRO HISTORICO DE QUITO</b>	
<b>BRYAN CUENCA</b>	<b>24-MAY-2018</b>

Figura 26. Tipos de materiales en los diferentes puntos monitoreados.

## 4.1. Evaluación de la Concentración de Radón

### 4.1.1. Primera Edificación - Iglesia de San Francisco

Los datos obtenidos con equipo RAD7 en la Iglesia de la Catedral se pueden identificar en la Tabla 4, presentan concentraciones de radón considerables siendo la concentración máxima de 2350 Bq/m<sup>3</sup> correspondiente a la Cripta #3 y la concentración mínima de 99.5 Bq/m<sup>3</sup> correspondiente a la Cripta #1.

Tabla 4.

*Concentración de radón en las criptas de la Iglesia de la Catedral*

<b>Edificación</b>	<b>Puntos Analizados</b>	<b>Cripta</b>	<b>Cripta</b>	<b>Cripta</b>
<b>RAD7</b>		<b>#1</b>	<b>#2</b>	<b>#3</b>
	<b>Máximos (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	1370	1700	2350
<b>Iglesia de la Catedral</b>	<b>Media (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	817	1380	1490
	<b>Mínimos(Bq/m<sup>3</sup>)</b>	99.5	938	902
	<b>Temperatura Media (C<sup>o</sup>)</b>	19.4	19.6	18.7
	<b>Humedad relativa</b>	5.44	4.21	4.69
	<b>Media (%)</b>			
	<b>Presión Atmosférica</b>	692.33	692.29	692.59
	<b>Media (Bar)</b>			

Se puede observar que las concentraciones sobrepasan los límites permisibles establecidos en edificaciones existentes como lo dice el Diario Oficial de la Unión Europea 143 (400 Bq/m<sup>3</sup>), EPA (148 Bq/m<sup>3</sup>), OMS (300 Bq/m<sup>3</sup>) y OIEA (300 Bq/m<sup>3</sup>). Estos datos hacen referencia a los estudios realizados por Nastro et al., (2016), donde se analizó las concentraciones de radón en tres iglesias en San Giovanni in Fiore al sur de Italia, donde la concentración más alta monitoreada fue de 2058.57 Bq/m<sup>3</sup> en la Iglesia de Santa Maria delle Grazie y 739.54

Bq/m<sup>3</sup> en la iglesia Abbey Firenze, también se hicieron análisis de radón en las criptas de las Iglesias de San Giovanni y Santa Maria delle Grazie donde las concentraciones mínimas a máximas van de 168.1 a 644.1 Bq/m<sup>3</sup>.

Por otro lado, se debe tomar en cuenta que la Cripta #3 tiene la concentración más elevada porque es la más antigua ya que no ha existido reconstrucción en esta área. Además, la salida de aire se encuentra totalmente sellada a comparación de las demás partes de las criptas que si cuentan con salida de aire que va directamente a la iglesia, esto hace referencia a un análisis realizado por Tene y Capua (2015), el estudio se realizó en un Castillo llamado dell'Ovo teniendo concentraciones máximas de 1593 Bq/m<sup>3</sup> con el equipo RAD7 relacionándolos por el tiempo de antigüedad y los materiales empleados en la construcción.

Analizando la correlación de datos obtenidos en los distintos puntos de monitoreo en la Iglesia de la Catedral respectivamente a las criptas, encontramos una correlación positiva de 0.96 para la Cripta #1 entre la concentración de radón y la presión atmosférica (Figura 27), en la Cripta #2 hay una correlación positiva de 1 entre la concentración de radón con la presión atmosférica (Figura 28) y en la Cripta #3 encontramos una correlación positiva de 0.97 y 0.98 entre la concentración de radón con la humedad relativa y la presión atmosférica (Figura 29).

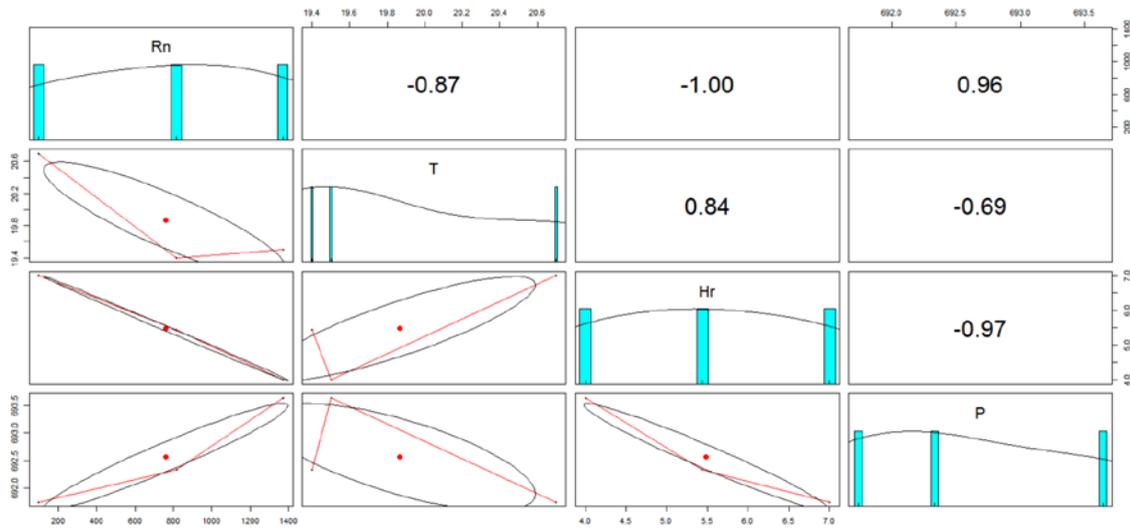


Figura 27. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Cripta #1.

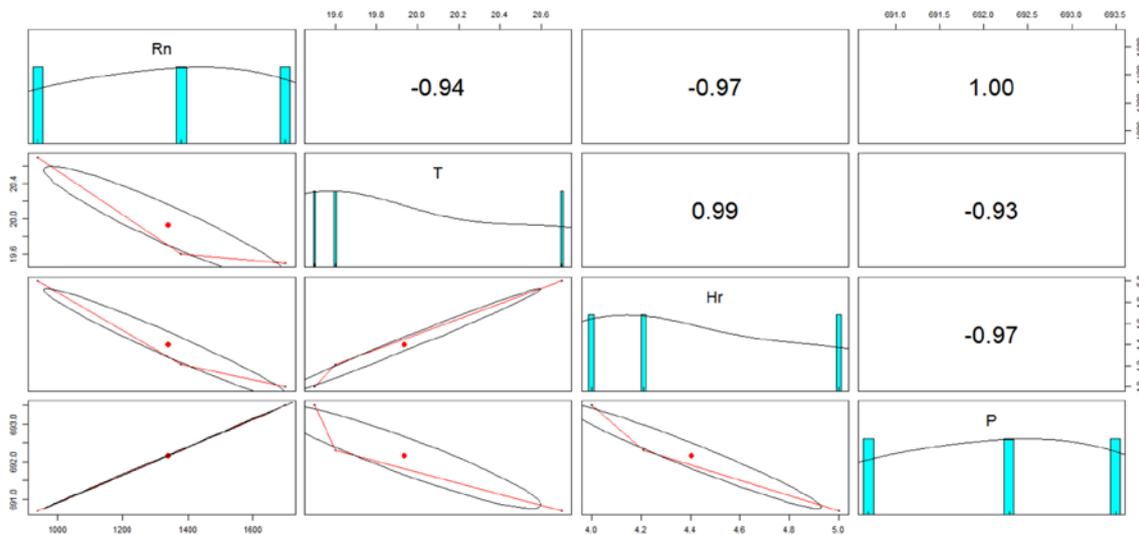


Figura 28. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Cripta #2.

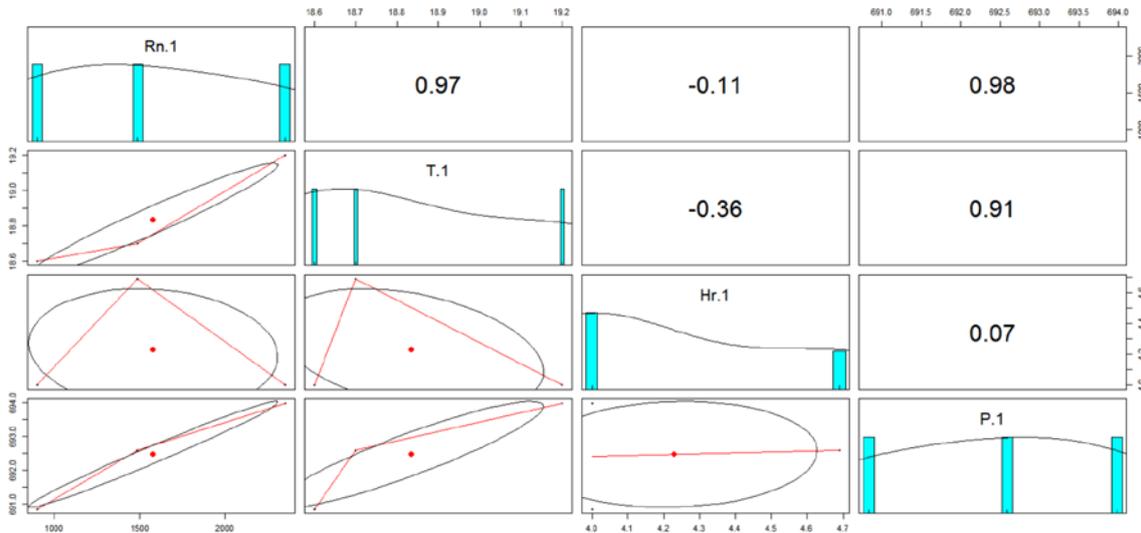


Figura 29. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Cripta #3.

Analizando los datos obtenidos mediante la relación de la concentración de radón con los parámetros físicos, se puede ver en las Figuras 36-38 la presión atmosférica son las más relacionadas durante el monitoreo de esta edificación a comparación de la temperatura y la humedad relativa.

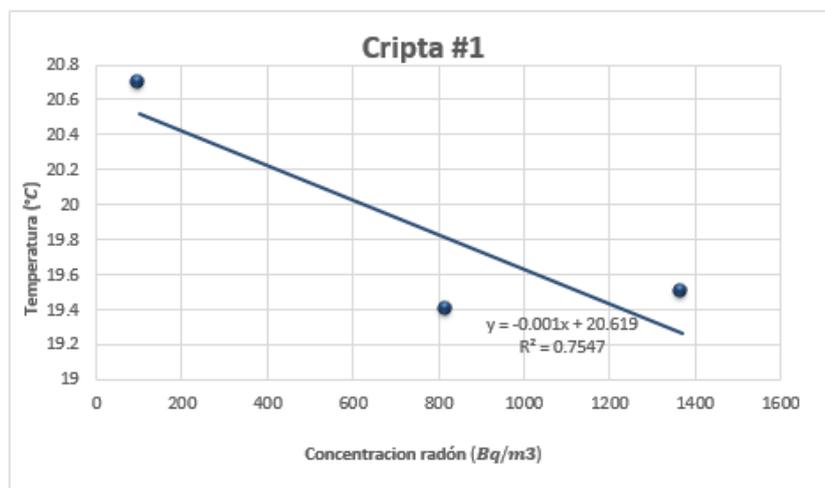


Figura 30. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Cripta #1.

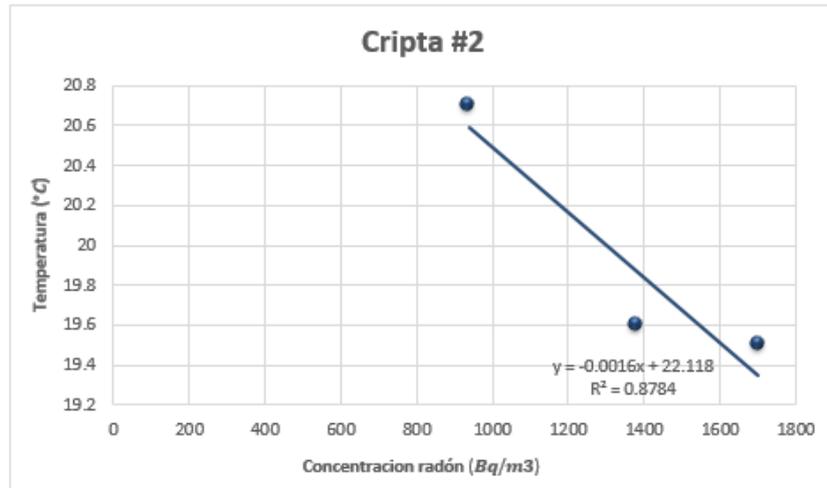


Figura 31. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en la Cripta #2.

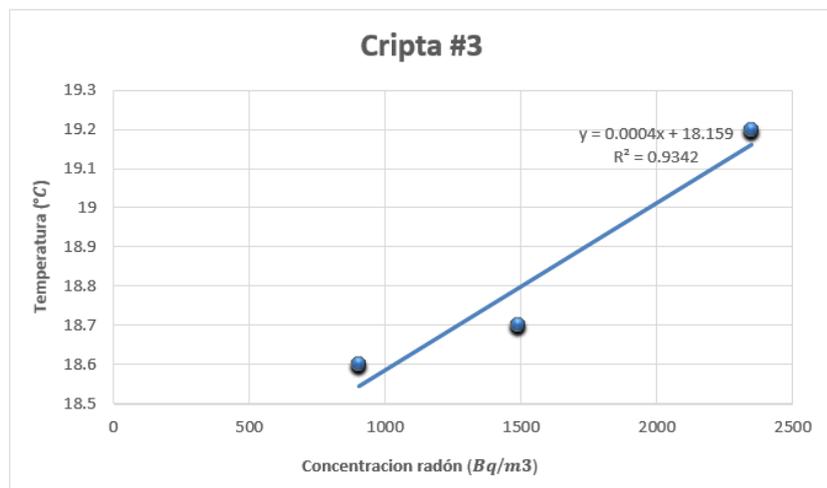


Figura 32. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en la Cripta #2.

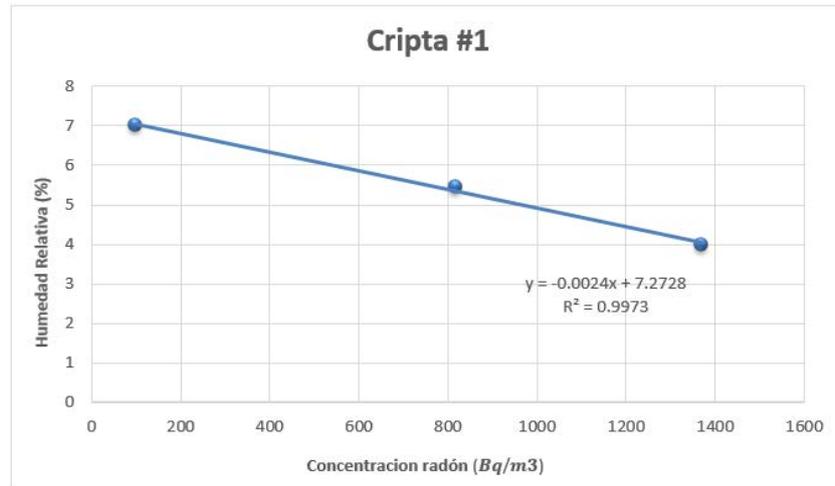


Figura 33. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y humedad relativa en la Cripta #1.

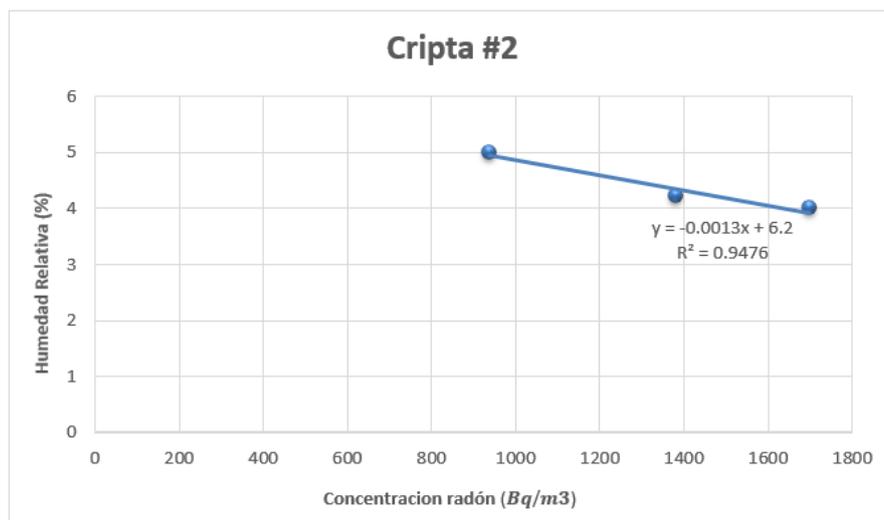
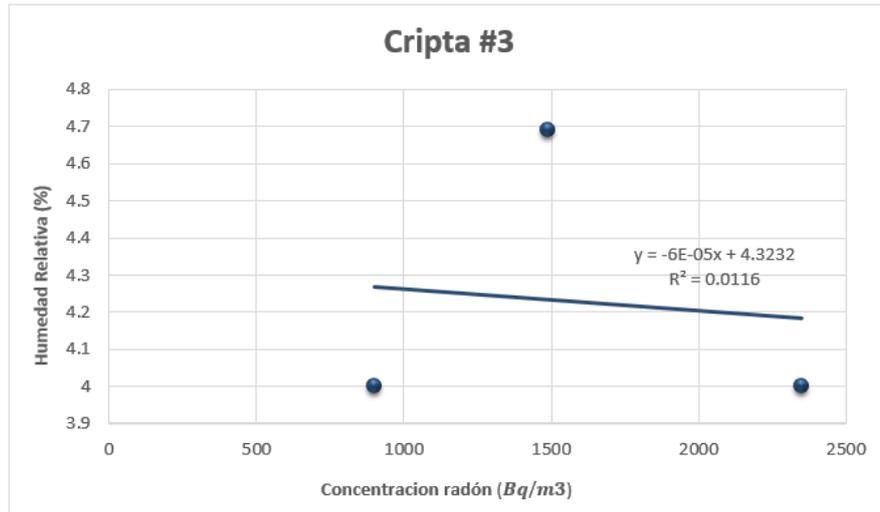
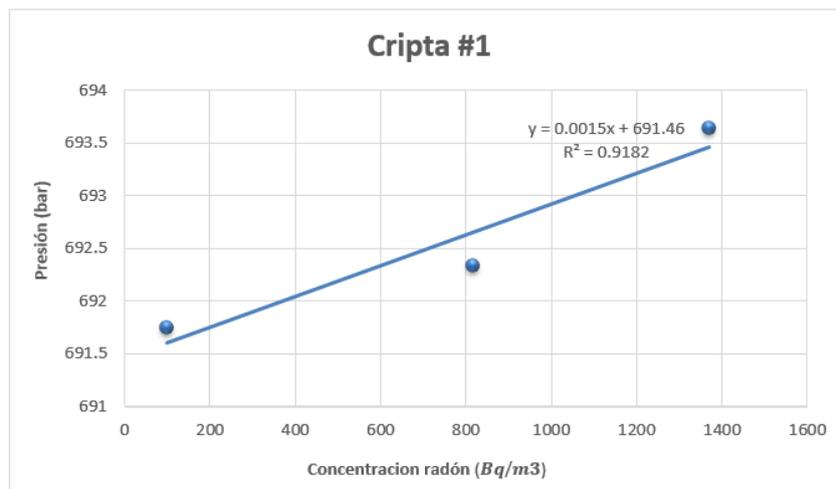


Figura 34. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y humedad relativa en la Cripta #2.



*Figura 35.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y humedad relativa en la Cripta #5.



*Figura 36.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Cripta #1.

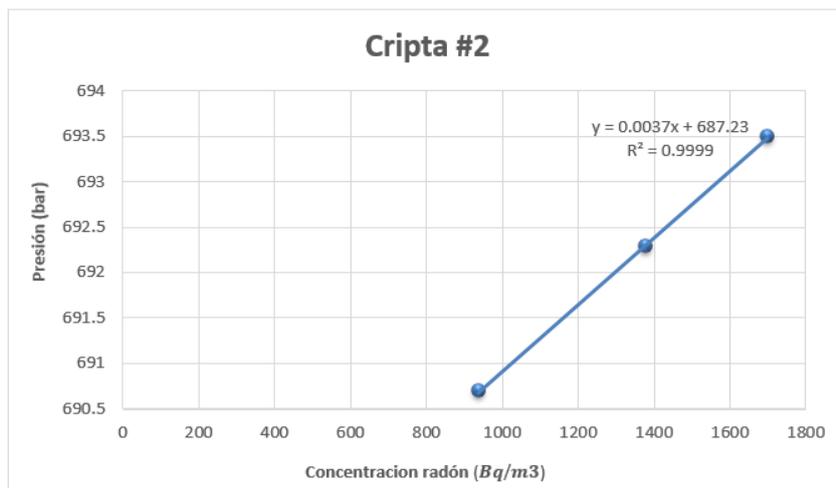


Figura 37. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Cripta #2.

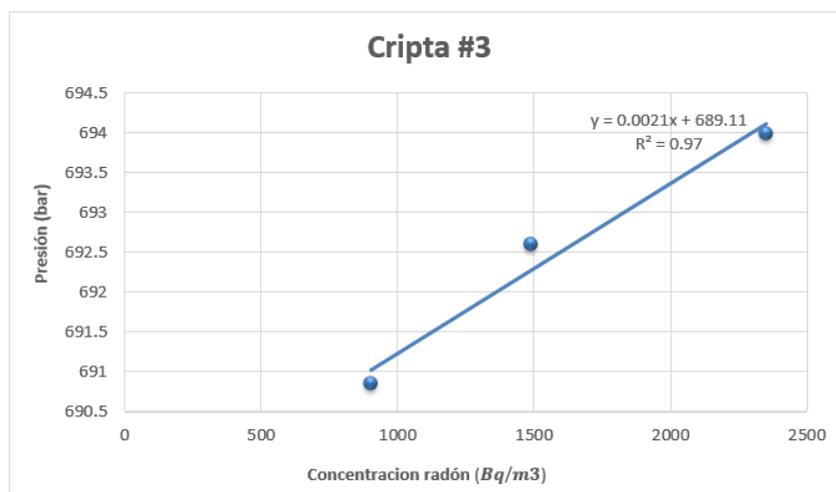


Figura 38. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Cripta #3.

En cuanto a la medición de tasa de dosis con el detector LUDLUM (ver Tabla 5), en la Cripta #3 obtuvo la mayor tasa de dosis con 2.2 KCPM de radiación Gamma (Detector Yoduro de Sodio) y  $2 \left( \frac{\mu Sv}{hr} \right)$  tanto de radiación Gamma y Beta (Detector Geiger-Müller), esto se puede deber al material de construcción que se encuentra en el punto analizado como adobe y ladrillo en su gran mayoría,

también por la antigüedad, intercambio de aire y la descendencia de los radionúclidos en el sitio monitoreado.

Tabla 5.

*Medición de tasa de dosis con el equipo LUDLUM modelo 3-97 y sonda modelo 44-38 en las criptas de la Iglesia de la Catedral*

<b>Edificación</b>	<b>Puntos de la Edificación</b>	<b>Puntos de la Habitación</b>	<b>Gamma (KCPM) M 3-97</b>	<b>Gamma (<math>\frac{\mu Sv}{hr}</math>) M 44-38</b>	<b>Beta (<math>\frac{\mu Sv}{hr}</math>) M 44-38</b>	
<b>Iglesia de la Catedral</b>	<b>Cripta #1</b>	1	1.7	1	1	
		2	1.5	1	1	
		3	1.5	1	1	
		4	1.6	1	1	
	<b>Cripta #1</b>	1	1.6	1	1	
		2	1.7	2	1	
		3	1.8	1	2	
		4	1.5	1	1	
	<b>Cripta #3</b>	1	2.2	2	2	
		2	2	1	1	
		3	1.8	1	1	
		4	2	2	1	
	<b>Medición de Fondo</b>			1.5	0.1	0.1

#### 4.1.2. Segunda Edificación - Museo de la Catedral Primada

Los datos obtenidos con el equipo RAD7 en el Museo de la Catedral se pueden ver en la Tabla 6. La concentración máxima de 346 Bq/m<sup>3</sup> corresponde a la Habitación de Reservas del museo y la concentración mínima de 11.1 Bq/m<sup>3</sup> corresponde a la Habitación #4 (Figura 21). Los datos anteriores hacen relación a estudios en la Ciudad de Cuenca por Cuadrado y Carrasco (2016), quienes

realizaron mediciones de  $Rn^{222}$  en edificaciones antiguas dando concentraciones de  $119 \text{ Bq/m}^3$ , caracterizándolas por el tipo de material de construcción de bloque y cemento como el tipo de material de construcción empleado en la mayor parte del Museo de la Catedral.

Tabla 6.

*Concentración de radón en el Museo de la Catedral*

<b>Edificació n RAD7</b>	<b>Puntos Analizados</b>	<b>Habitació n #3</b>	<b>Habitació n #4</b>	<b>Habitació n #6</b>	<b>Habitació n Reservas</b>
<b>Museo de la Catedral</b>	<b>Máximos (<math>\text{Bq/m}^3</math>)</b>	146	157	263	346
	<b>Media (<math>\text{Bq/m}^3</math>)</b>	87.5	103	196	238
	<b>Mínimos (<math>\text{Bq/m}^3</math>)</b>	11.1	49.8	127	125
	<b>Temperatura Media (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	20.4	20.4	19.6	19.6
	<b>Humedad relativa Media (%)</b>	5.65	4.48	4.17	5.38
	<b>Presión Atmosférica Media (Bar)</b>	693.34	693.19	693.31	693.41

Según la EPA (2015), la concentración de radón excede el límite permisible de  $148 \text{ Bq/m}^3$  para lugares de trabajo como en el punto de la habitación de reservas, pero no exceden los límites permisibles según el Diario Oficial de la Unión Europea 143 de  $400 \text{ Bq/m}^3$  en construcciones existentes. Se debe tomar en cuenta que la concentración más alta fue encontrada en la habitación de las

reservas del museo ya que por así decirlo es también uno de los lugares más antiguos construidos a comparación de los demás puntos monitoreados, ya que forma parte del antiguo Edificio de Correos de Quito. Sin lugar a dudas han sido restaurados por desgaste del tiempo por lo que se han usado nuevos materiales de construcción en su restauración.

Revisando la normativa a nivel mundial no exceden los límites permisibles tanto de la OMS ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ), OIEA ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) y del EURATOM 143 ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ) en los puntos monitoreados que no tienen alta concentración de radón como en la Habitación #3-4 que tienen valores de concentración de radón que van de 11.1 a  $157 \text{ Bq/m}^3$ , esto hace referencia a estudios realizados en interiores por Abdullah (2013), donde la concentración promedio fue de  $125.10 \text{ Bq/m}^3$ .

También se relacionan a otros estudios realizados por Titipornpun, Bhongsuwan y Gimsa (2017), en espacios de trabajo donde se afirma la concentración de radón valores mínimos a máximos de 11 a  $305 \text{ Bq/m}^3$  en Ko Samui (Tailandia). Se presume que la concentración que más interviene por la edad de la edificación, materiales de construcción y ventilación como en este caso se relacionan las características del Museo de la Catedral y los estudios que relacionan los tipos de materiales de construcción.

Analizando la correlación de datos obtenidos en los distintos puntos de monitoreo en el Museo de la Catedral, encontramos una correlación positiva de 0.99 en la Habitación de las Reservas del museo entre la concentración de radón y la presión atmosférica (Figura 39), en la Habitación #3 hay una correlación positiva de 0.90 y 1 entre la concentración de radón con la temperatura y presión atmosférica (Figura 40), en la Habitación #4 hay una correlación positiva de 0.86 y 1 entre la concentración de radón con la temperatura y presión atmosférica (Figura 41) y en la Habitación #6 encontramos una correlación positiva de 0.97 y 0.98 entre la concentración de radón con la humedad relativa y la presión atmosférica (Figura 72).

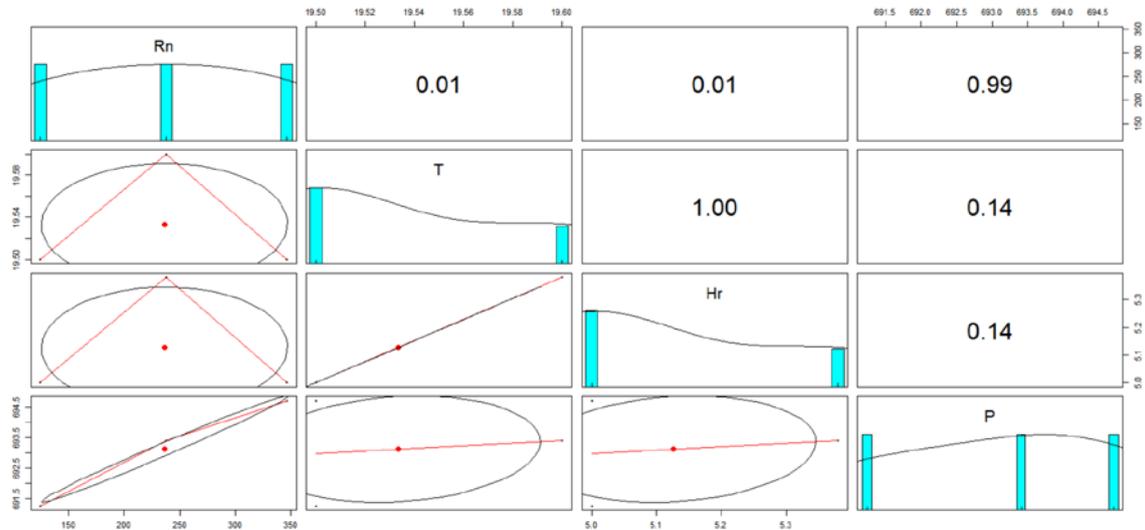


Figura 39. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación de las Reservas del museo.

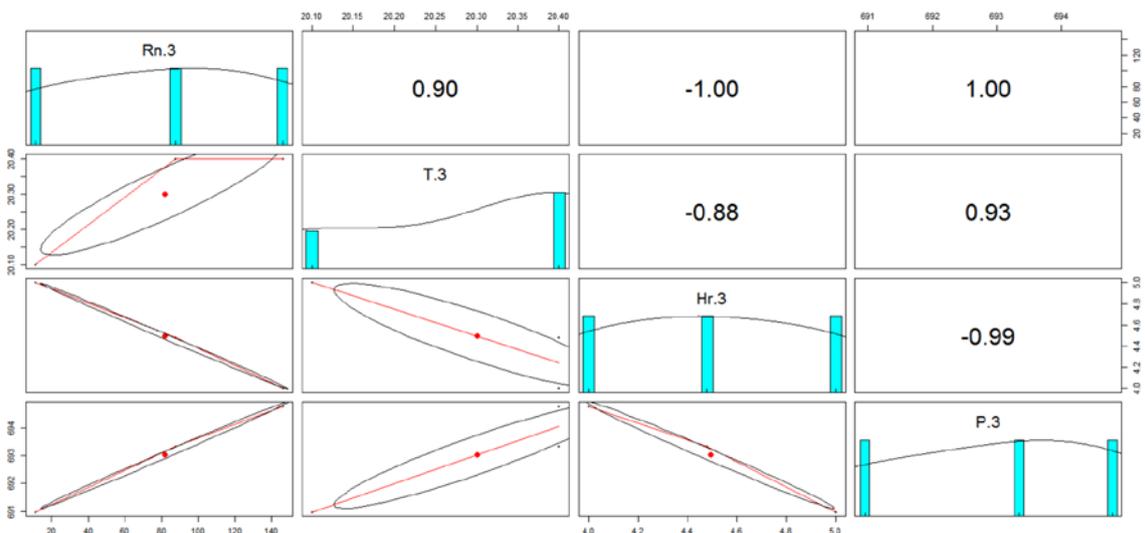


Figura 40. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación #3.

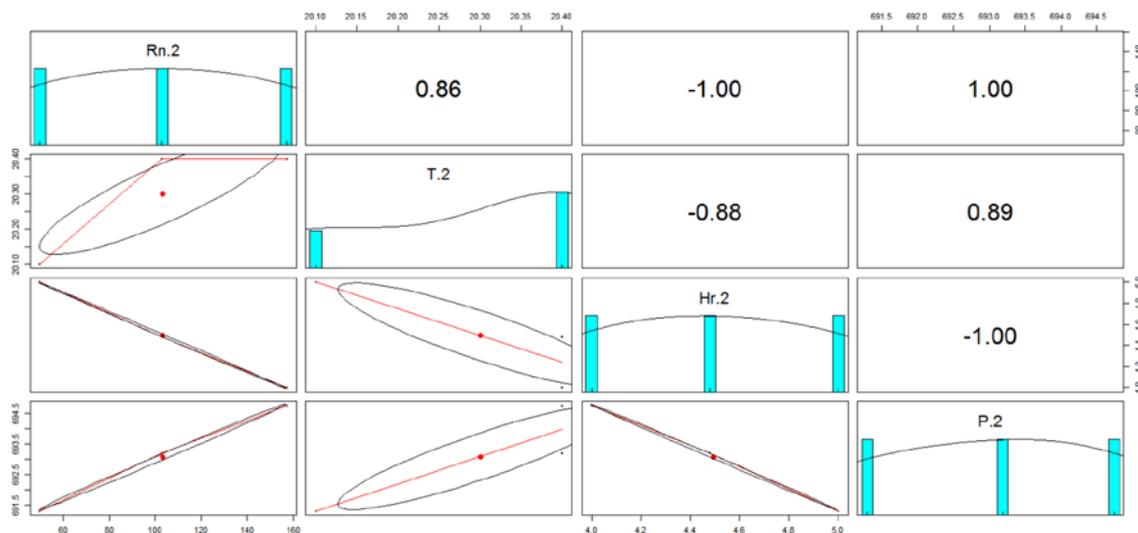


Figura 41. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación #4.

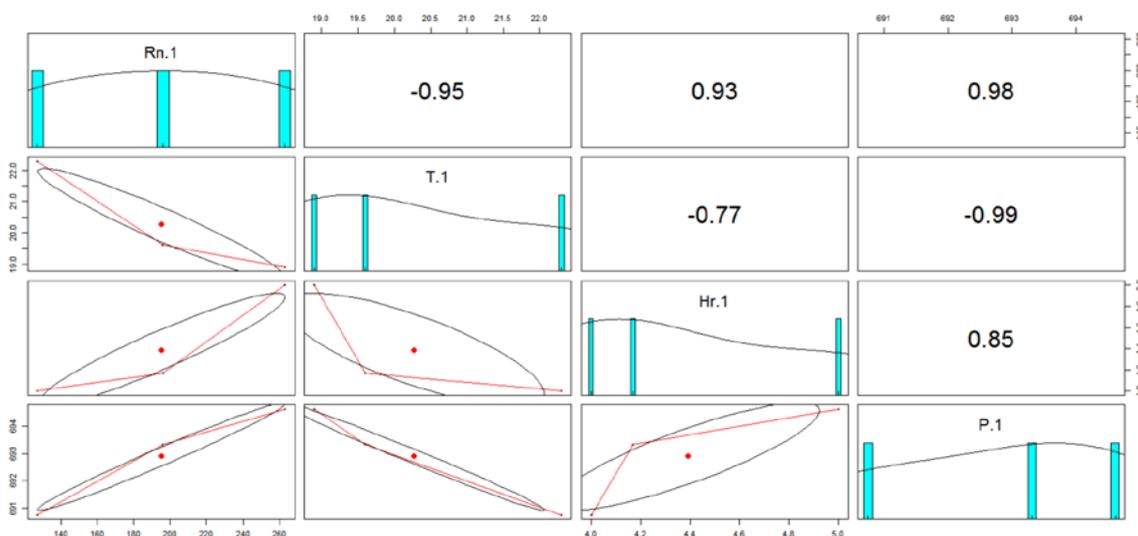


Figura 42. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación #6.

Como se muestra en la Figura 46 la tendencia de la relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura es casi nula, este cambio se produce cuando existen variaciones meteorológicas como lo dice Llerena (2006), el cual este factor ambiental tiende a tener una relación directa con el radón pero se

toma en cuenta los fenómenos ambientales que puede suceder como el cambio de temperatura en el medio.

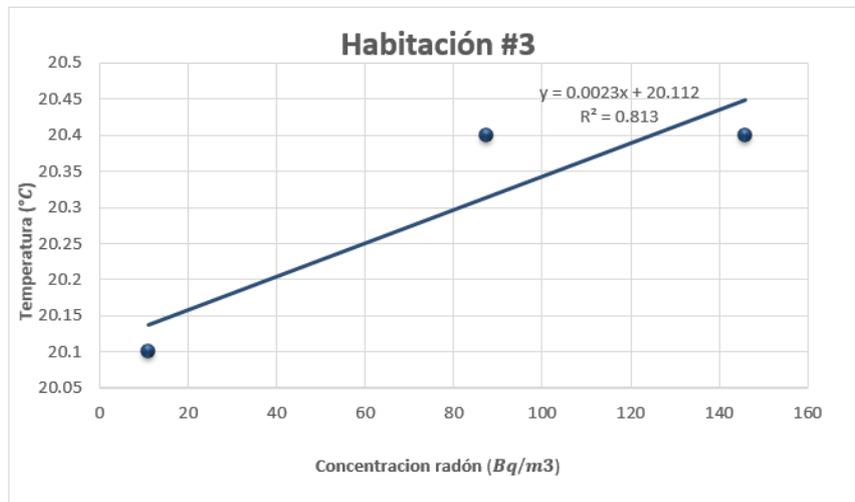


Figura 43. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en la Habitación #3.

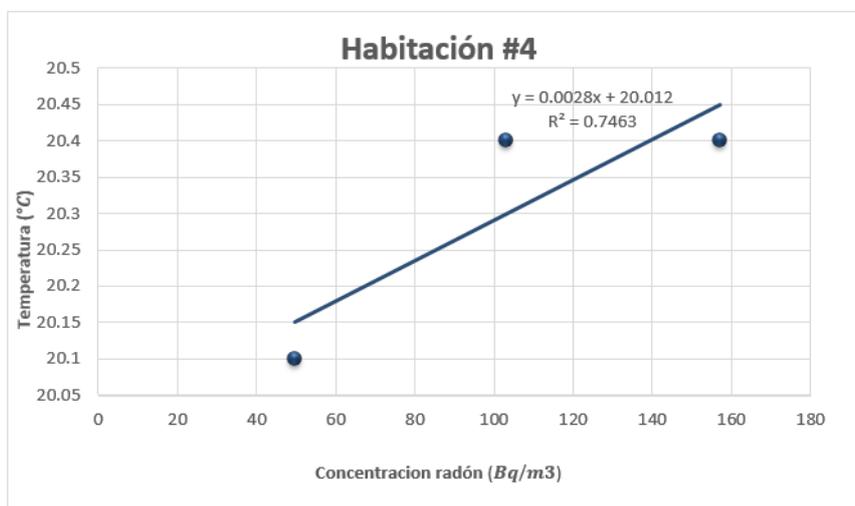


Figura 44. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en la Habitación #4.

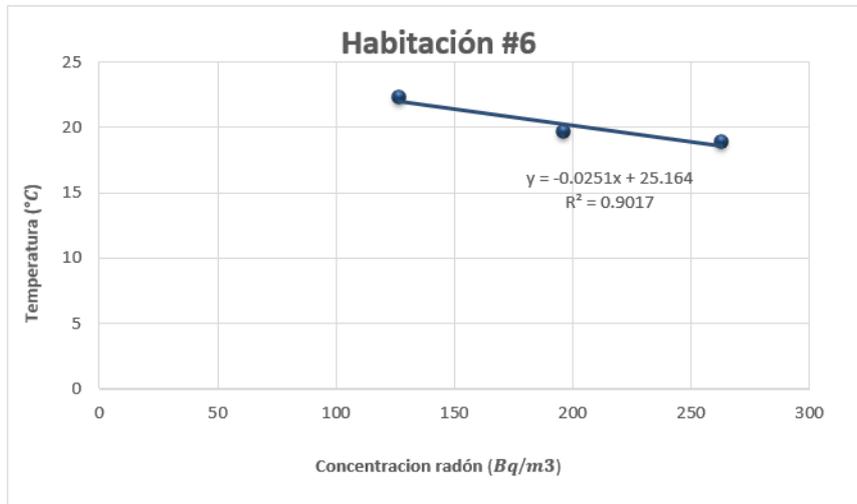


Figura 45. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Habitación #6.

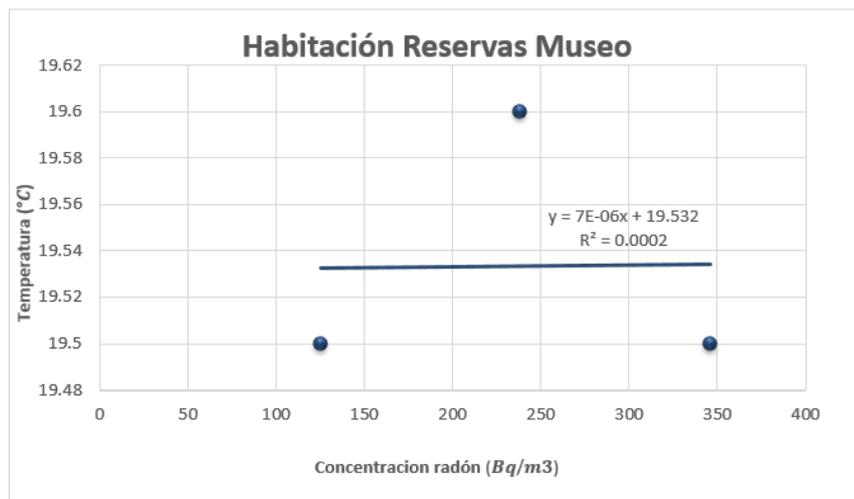


Figura 46. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Habitación Reservas del museo.

En general se puede ver que en las Habitaciones 3-6 (Figuras 47-50) la concentración de radón correla muy bien con la humedad relativa, con excepción de Habitación Reservas del museo (Figura 50) la tendencia analizada es relativamente baja esto se puede suceder por cambios ambientales los cuales

no permiten a que la concentración de radón sea significativa con su factor físico que es en este caso la humedad relativa.

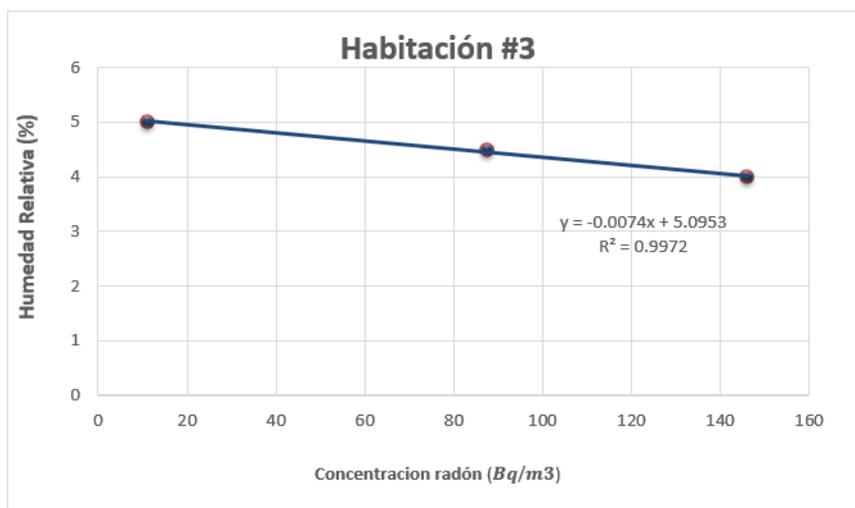


Figura 47. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la humedad relativa en la Habitación #3.

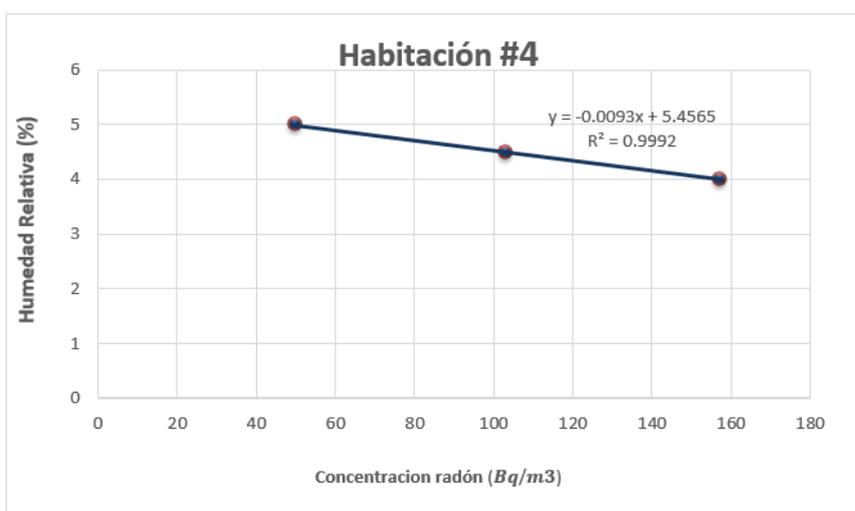


Figura 48. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la humedad relativa en la Habitación #4.

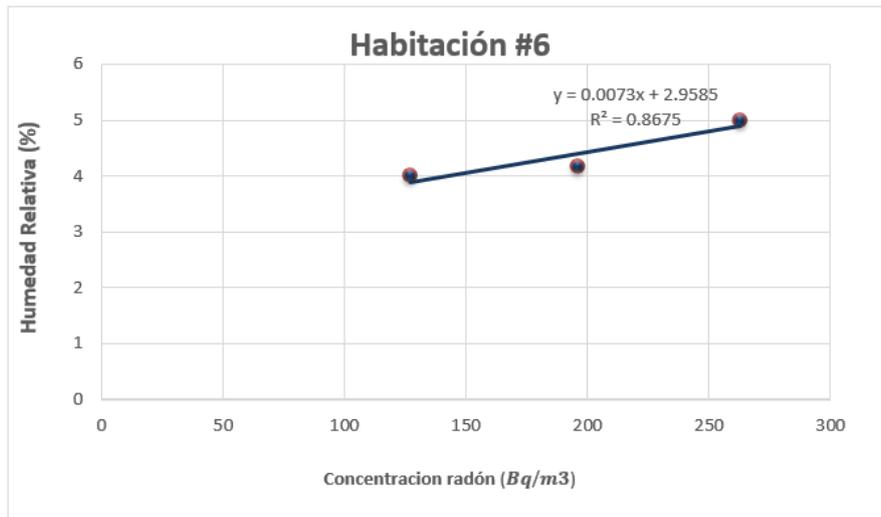


Figura 49. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Habitación #6.

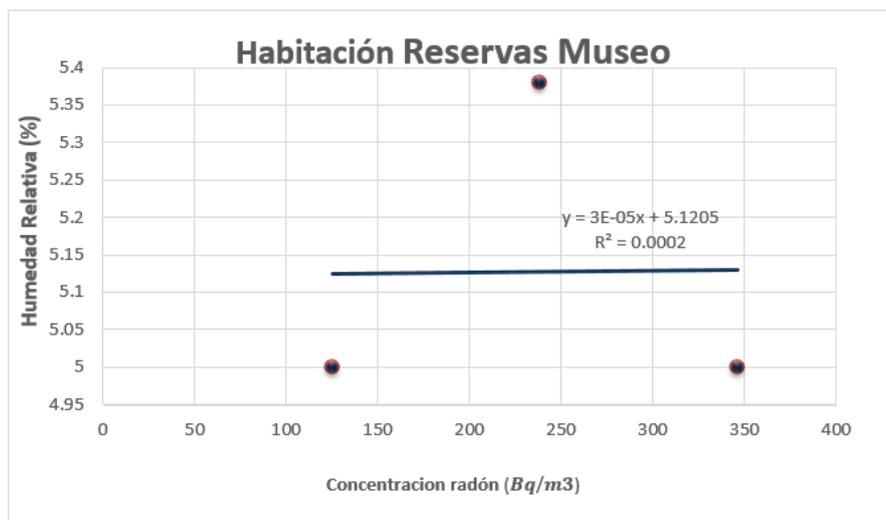


Figura 50. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Habitación Reservas del museo.

Analizando los datos obtenidos mediante la relación de la concentración de radón con la presión atmosférica, se puede ver en las Figuras 51-54 tiene una tendencia positiva en los puntos monitoreados, teniendo una relación positiva acercándose al +1.

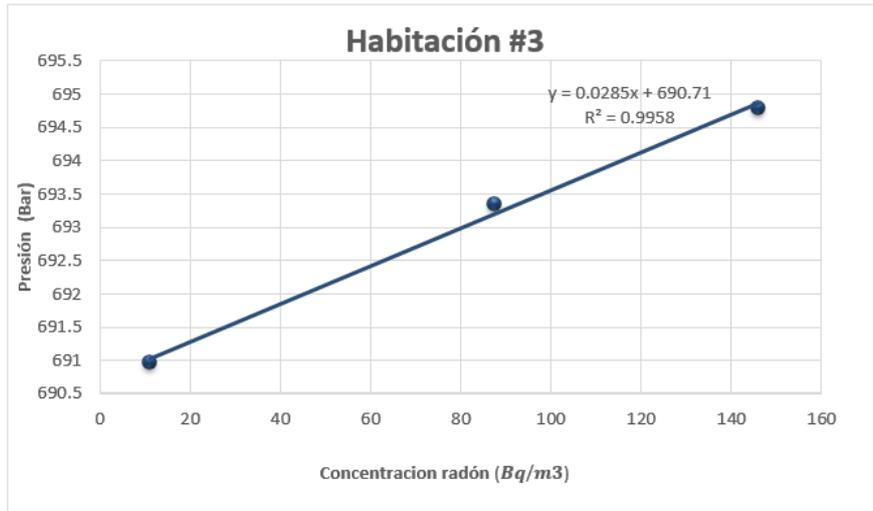


Figura 51. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Habitación #3.

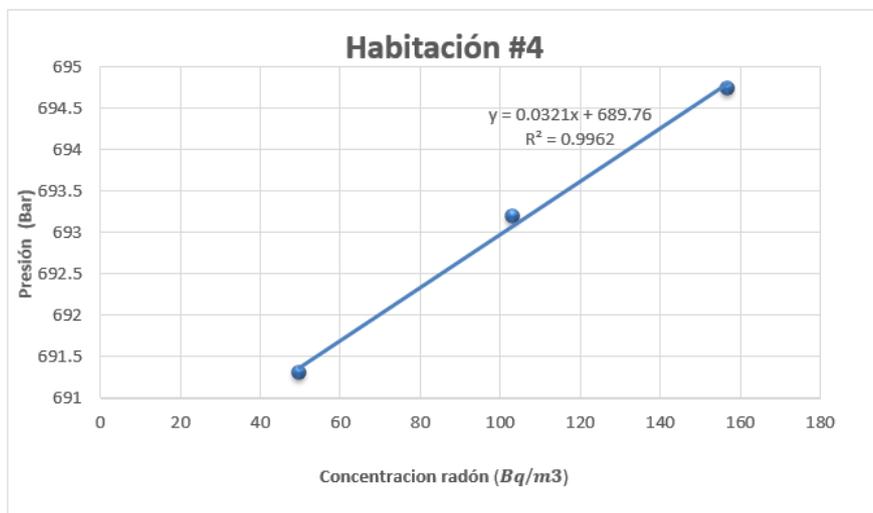


Figura 52. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Habitación #4.

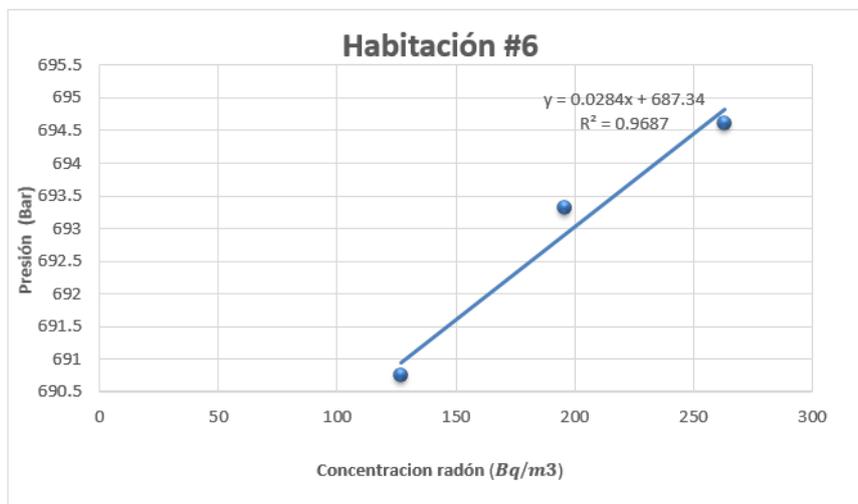


Figura 53. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Habitación #6.

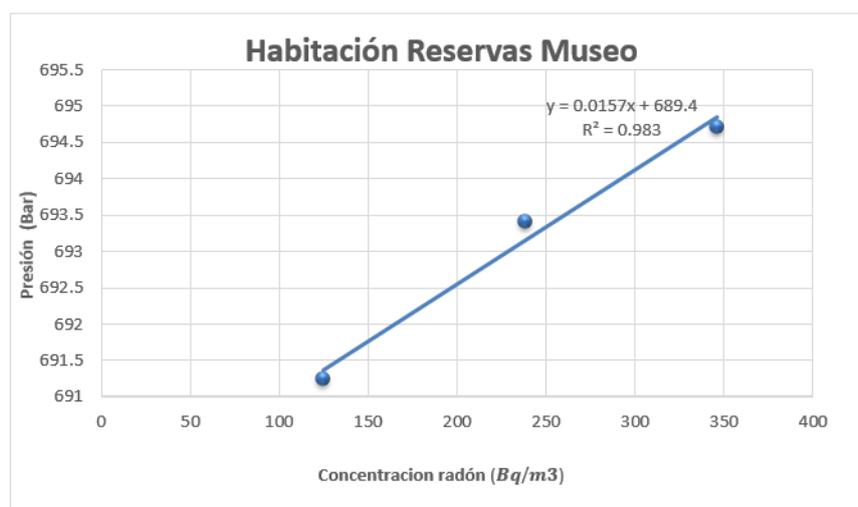


Figura 54. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Habitación Reservas del museo.

En cuanto a la medición de tasa de dosis con el detector LUDLUM (Ver Tabla 7), en la Habitaciones #3 y #4 se obtuvo la mayor tasa de dosis de 2 KCPM de radiación Gamma (Detector Yoduro de Sodio), en los demás puntos monitoreados comprende también niveles altos. La medición radiación Gamma (Detector Geiger-Müller) midió una tasa de dosis de  $3 \left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)$  en la Habitación 3

siendo la más alta en todos los puntos, a diferencia de las demás lugares dando valores de  $2 \left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)$  y la tasa de dosis de radiación Beta (Detector Geiger-Müller) se considera que casi todos los lugares midieron hasta  $2 \left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)$ . Estos valores se pueden relacionar al material de construcción o al ancho de las paredes de la edificación, ya que por la densidad de las paredes y la presencia de radón, existen descendientes tanto Gammas y Betas relacionándolas a la cadena del Uranio.

Tabla 7.

*Medición de tasa de dosis con el equipo LUDLUM modelo 3-97 y sonda modelo 44-38 del Museo de la Catedral*

<b>Edificación</b>	<b>Puntos de la Edificación</b>	<b>Puntos de la Habitación</b>	<b>Gamma (KCPM) M 3-97</b>	<b>Gamma <math>\left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)</math> M 44-38</b>	<b>Beta <math>\left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)</math> M 44-38</b>
<b>Museo de la Catedral</b>	<b>Habitación #3</b>	1	2	1	1
		2	1.9	1	1
		3	1.7	3	2
		4	1.8	1	1
	<b>Medición de Fondo</b>		1.5	1	0.1
	<b>Habitación #4</b>	1	1.8	2	1
		2	1.9	1	2
		3	2	1	1
		4	1.8	2	1
	<b>Medición de Fondo</b>		1.5	1	0.1
	<b>Habitación #6</b>	1	1.5	2	1
		2	1.5	1	1
3		1.7	1	1	
4		1.6	2	1	

	<b>Medición</b>	1.5	1	0.1
	<b>de Fondo</b>			
<b>Habitación</b>	1	1.7	1	2
<b>Reservas</b>	2	1.8	1	1
	3	1.7	1	1
	4	1.8	1	1
	<b>Medición</b>	1.4	0.1	0.1
	<b>de Fondo</b>			

#### 4.1.3. Tercera Edificación - Iglesia de San Francisco de Quito

Los datos obtenidos con equipo RAD7 en la Iglesia de la Catedral se pueden identificar en la Tabla 8, presentan concentraciones de radón considerables siendo la concentración máxima de 476 Bq/m<sup>3</sup> correspondiente a la Bóveda #4 de la Iglesia y la concentración mínima de 47.7 Bq/m<sup>3</sup> correspondiente Habitación de Reservas #2.

Tabla 8.

*Concentración de radón en la Iglesia de San Francisco*

<b>Edificació n RAD7</b>	<b>Puntos Analizados</b>	<b>Habitació n de Reservas #1</b>	<b>Habitació n de Reservas #2</b>	<b>Bóved a #2</b>	<b>Bóved a #3</b>	<b>Bóved a #4</b>
	<b>Máximos (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	426	340	282	365	476
<b>Iglesia de San Francisco</b>	<b>Media (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	354	165	146	185	250
	<b>Mínimos (Bq/m<sup>3</sup>)</b>	242	47.7	74.3	90.2	71.9

<b>Temperatura Media (C°)</b>	17.9	17.4	17.1	17.1	17.3
<b>Humedad relativa Media (%)</b>	5.38	4.13	4.13	4.00	5.21
<b>Presión Atmosférica Media (Bar)</b>	692.8	692.4	693.0	692.8	692.4

Según la EURATOM 143 (1990), los puntos monitoreados no exceden los límites permisibles de 400 Bq/m<sup>3</sup> en edificaciones existentes pero si sobrepasan los límites permisibles de la EPA de 148 Bq/m<sup>3</sup>.

Los datos de concentración media de radón más alta se encontró fue de 354 Bq/m<sup>3</sup> correspondiente a la Habitación de Reservas #1, estos datos se relacionan a estudios realizados por Nastro et al. (2016), realizados en Italia en la ciudad San Giovanni in Fiore, se encontró concentraciones de radón de 115.22 Bq/m<sup>3</sup> en la Iglesia Padri Cappuccini que fue construida en el año de 1639 corroborando la existencia de este gas. Por otro lado, también se realizaron estudios de radón en la ciudad de México por Espinosa et al. (2009), donde encontraron concentraciones de radón en varias iglesias dado resultados de la Iglesia de El Carmen con 104 Bq/m<sup>3</sup>, en la Iglesia San Juan Bautista 154 y la Iglesia de la Cochita 142.75 Bq/m<sup>3</sup>, relacionando los materiales de construcción siendo similares a los usados en la Iglesia de San Francisco y su edad de construcción de la Iglesias de la ciudad de México se efectuó desde el siglo XVI.

La Bóveda #4 de la Iglesia de San Francisco es una de las partes que conforma la primera construcción de la Iglesia a diferencia de los demás puntos monitoreados que fueron construidos a principios del siglo XX, a partir de ese entonces fueron creando nichos y otras habitaciones para los miembros de la

Iglesia (Webster, 2012). Por otra parte, se presume que el alto nivel de concentración de radón se ve influenciado por los materiales de construcción empleados antiguamente como el ladrillo y piedra, también influencia el grosor de las paredes que tienen un grosor de 1 m y la falta de ventilación (Torres, 2017).

Analizando la correlación de datos obtenidos en los distintos puntos de monitoreo en la Iglesia de San Francisco, encontramos una correlación positiva de 1 en la Habitación Reservas #1 entre la concentración de radón y la presión atmosférica (Figura 55), en la Habitación Reservas #2 hay correlaciones positivas de 0.80, 0.96 y 0.99 entre la concentración de radón con la temperatura, humedad relativa y presión atmosférica (Figura 56), en la Bóveda #2 encontramos correlaciones positivas de 0.94 y 0.93 entre la concentración de radón con la temperatura y presión atmosférica (Figura 57), en la Bóveda #3 encontramos correlaciones positivas de 0.94 y 0.97 entre la concentración de radón con la temperatura y la presión atmosférica (Figura 58) y en la Bóveda #4 encontramos correlaciones positivas con concentración de radón (Figura 59).

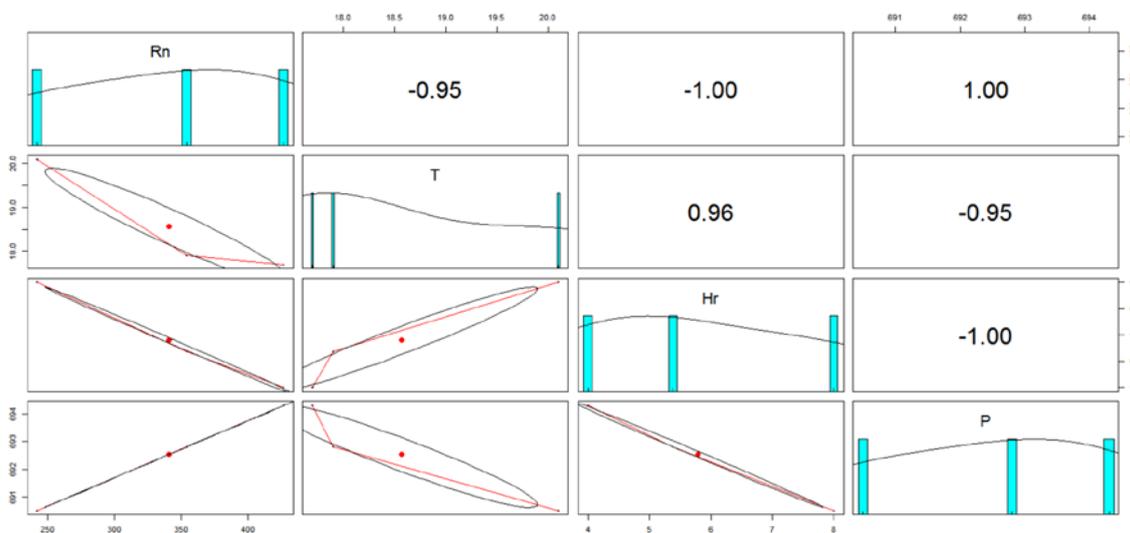


Figura 55. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación Reservas #1.

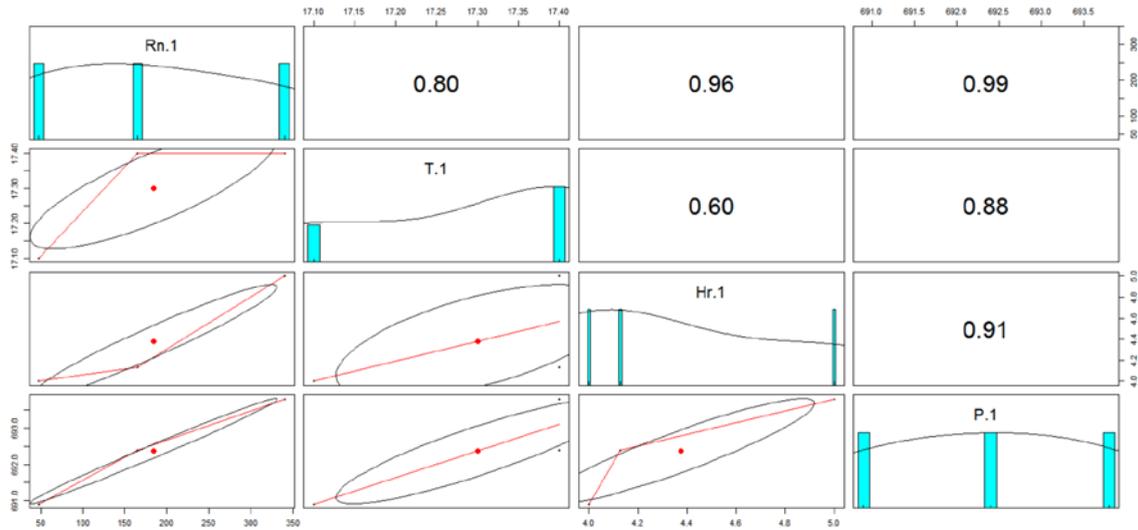


Figura 56. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Habitación Reservas #2.

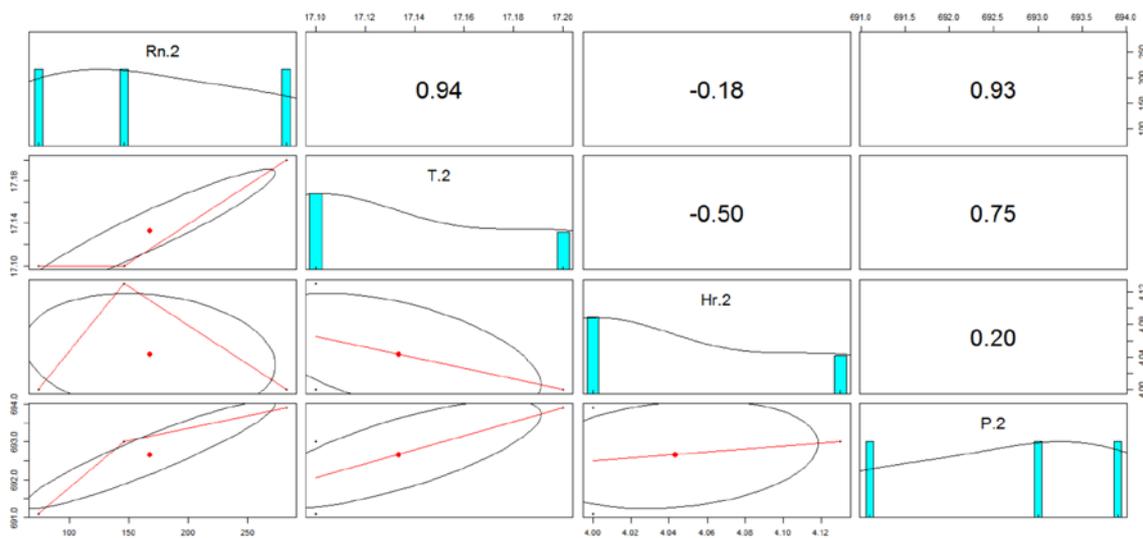


Figura 57. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Bóveda #2.

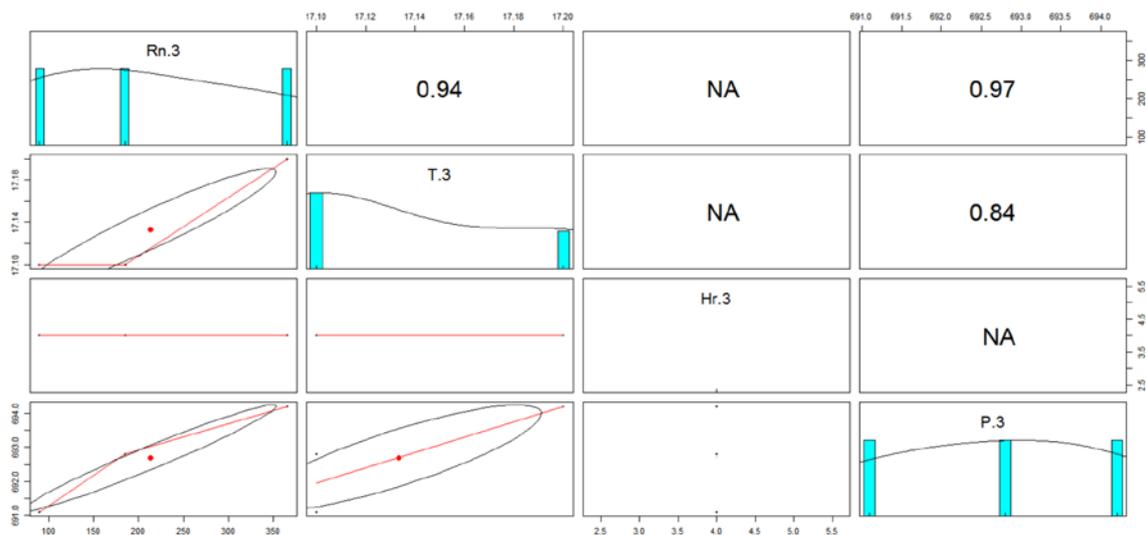


Figura 58. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Bóveda #3.

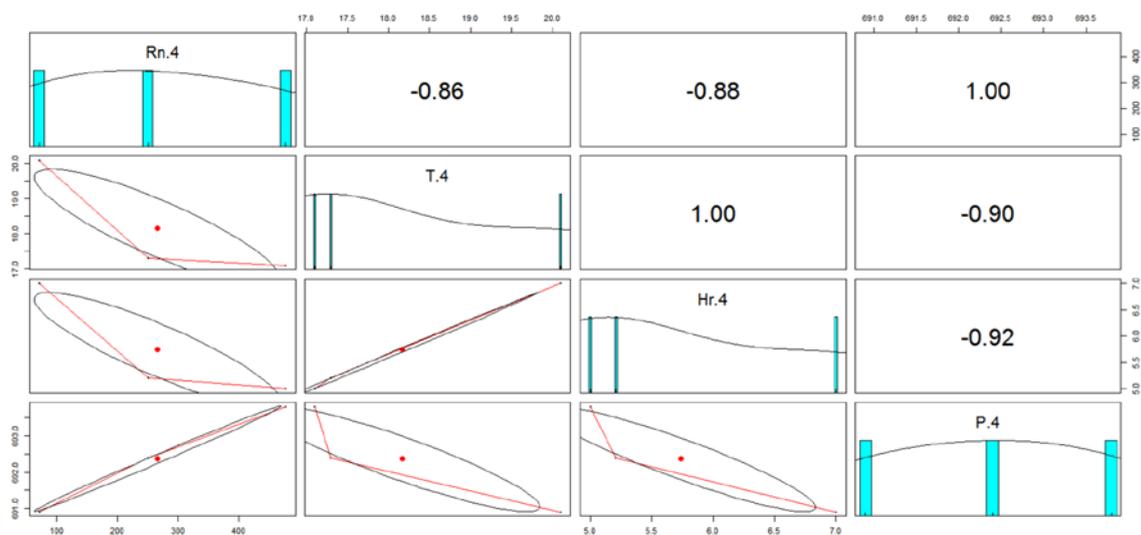


Figura 59. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y parámetros físicos en la Bóveda #4.

Analizando los datos obtenidos mediante la relación de la concentración de radón con los parámetros físicos, se puede ver que todas las relaciones son progresivamente positivas cercanas a +1, solo la relación entre la concentración

de radón con la húmeda relativa en la Bóveda #3 no aplican, porque los datos de humedad relativa fueron constantes durante el monitoreo.

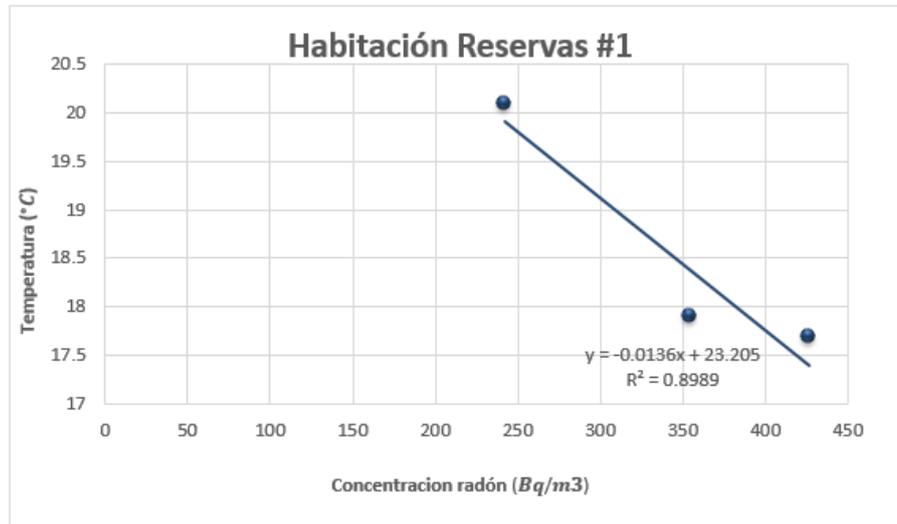


Figura 60. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Habitación Reservas #1.

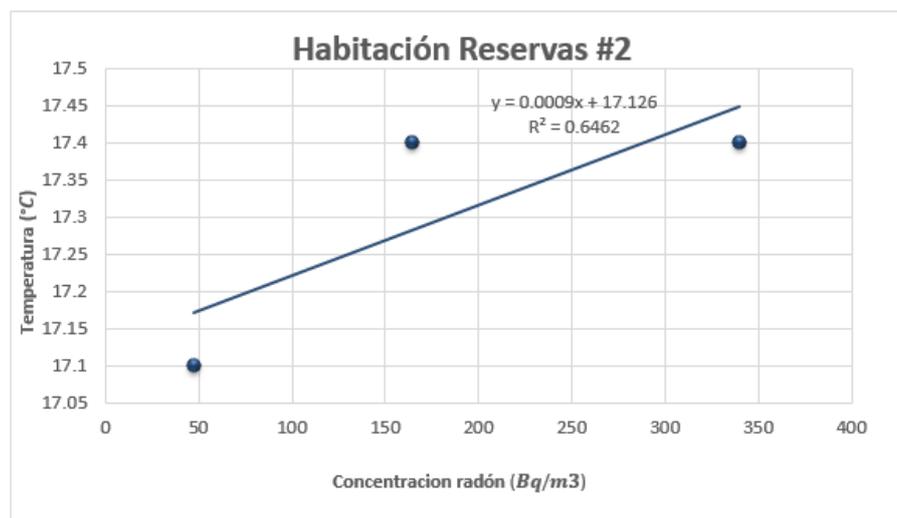


Figura 61. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Habitación Reservas #2.

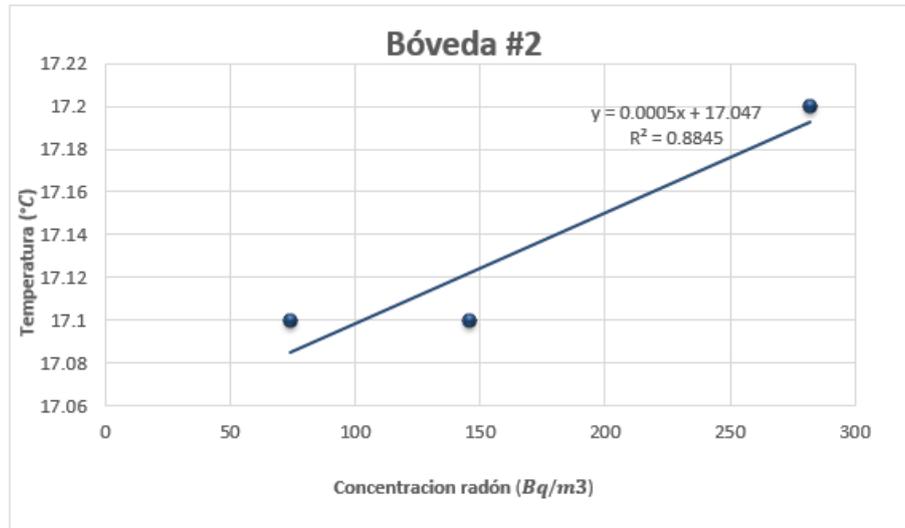


Figura 62. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Bóveda #2.

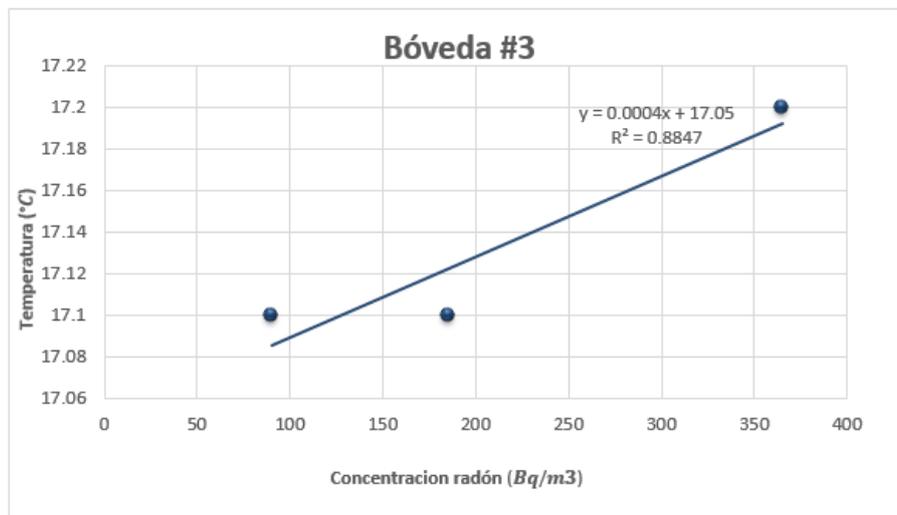


Figura 63. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la temperatura en la Bóveda #3.

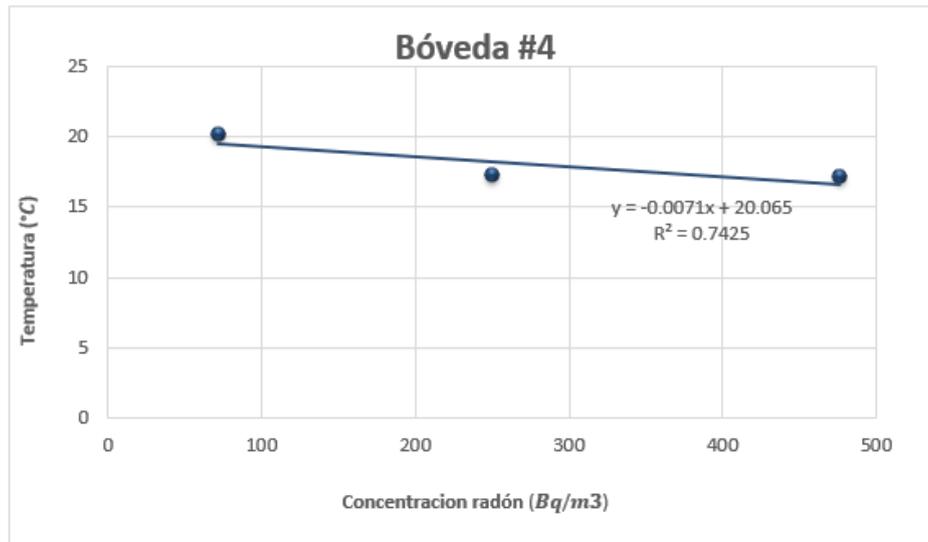


Figura 64. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la temperatura en la Bóveda #4.

Como se muestra en la Figura 67 la tendencia de la relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la humedad relativa es relativamente baja, esto se debe a que las variables ambientales se relacionan entre sí como lo dijo García (2014), existe una relación que interviene entre la humedad relativa en el exterior y en el interior sobre el nivel de radón a corto plazo, como se describió anteriormente el área monitoreada de las bóvedas en la Iglesia de San Francisco no son del todo cerradas en el espacio superior, por lo que se presume que tuvo influencia la humedad relativa del exterior con el interior durante el monitoreo y no existe una relación significativa entre la concentración del radón con la humedad relativa.

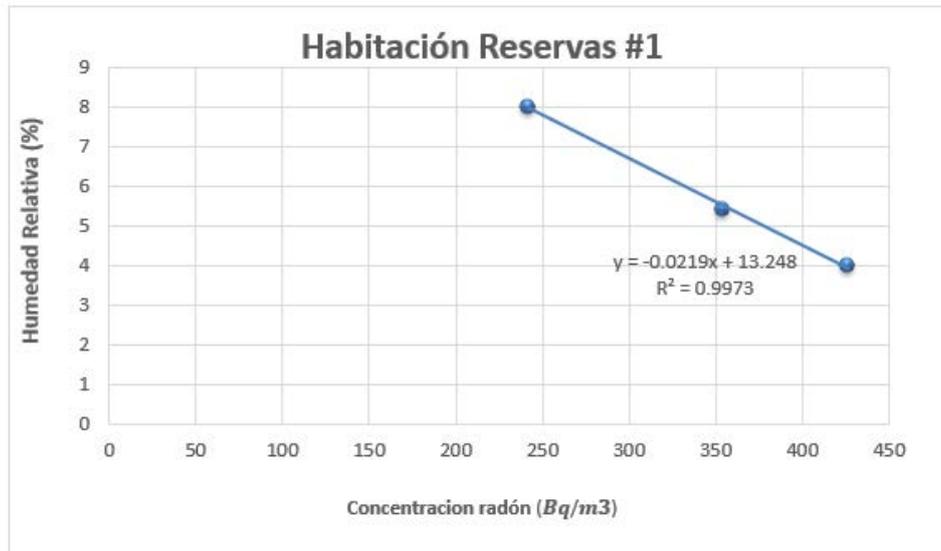


Figura 65. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Habitación Reservas #1.

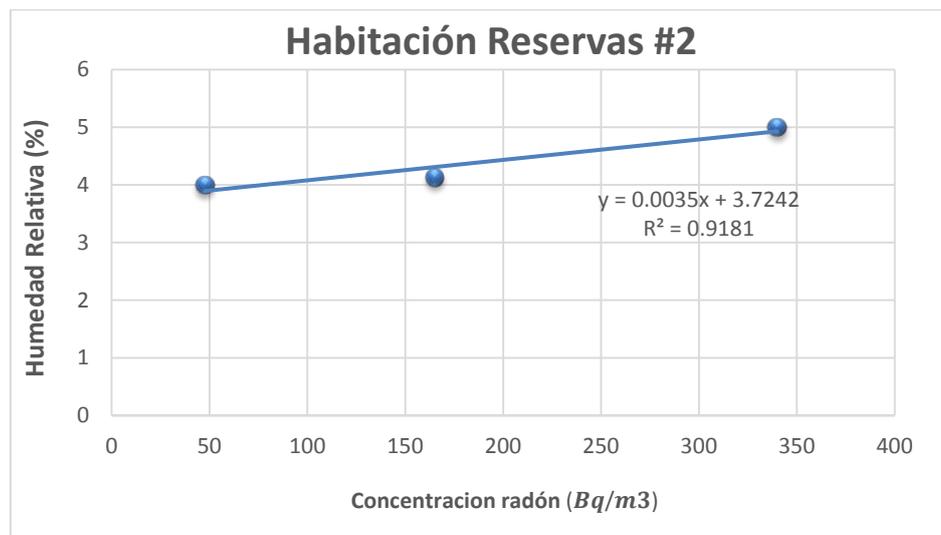


Figura 66. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Habitación Reservas #1.

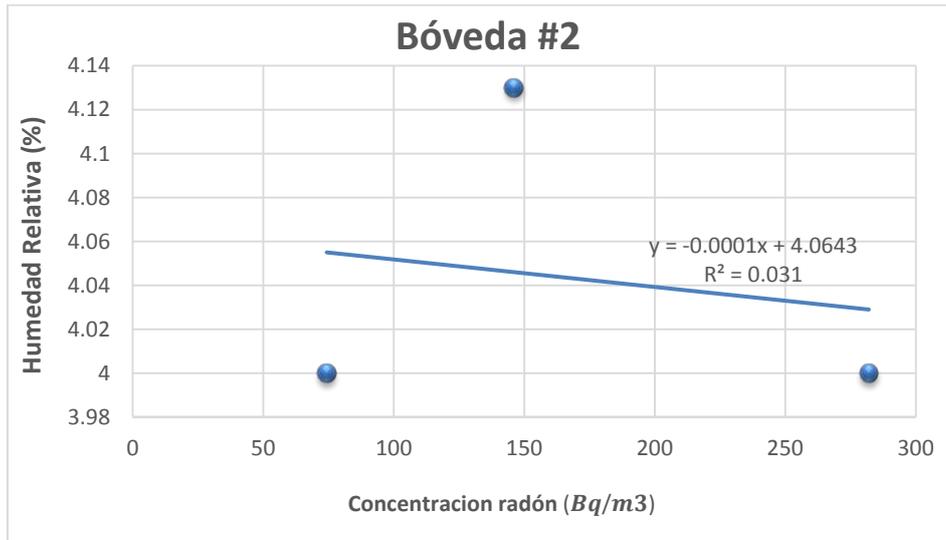


Figura 67. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Bóveda #2.

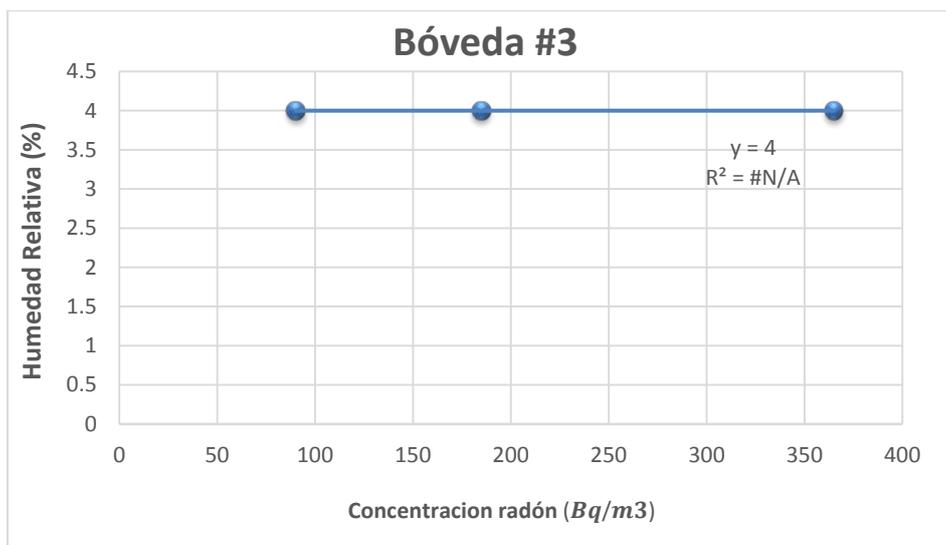


Figura 68. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la humedad relativa en la Bóveda #3.

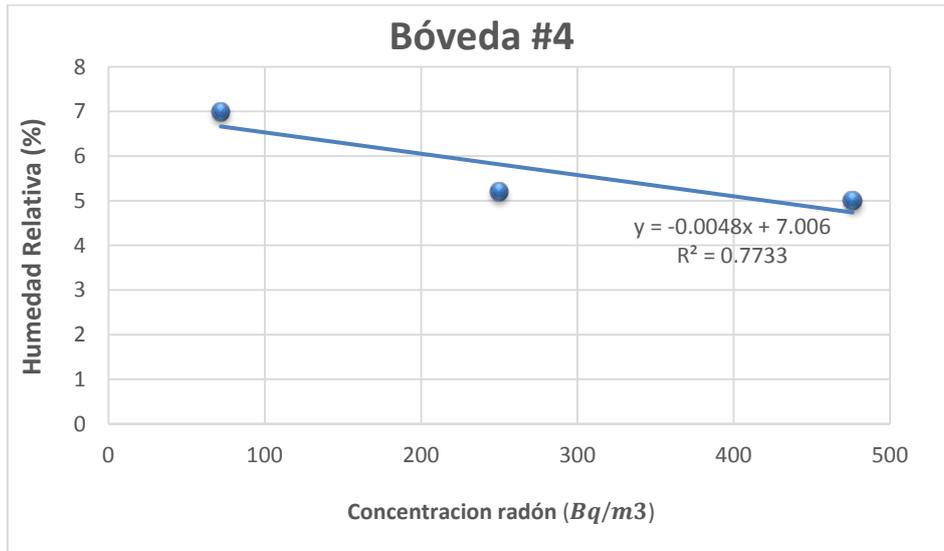


Figura 69. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la humedad relativa en la Bóveda #4.

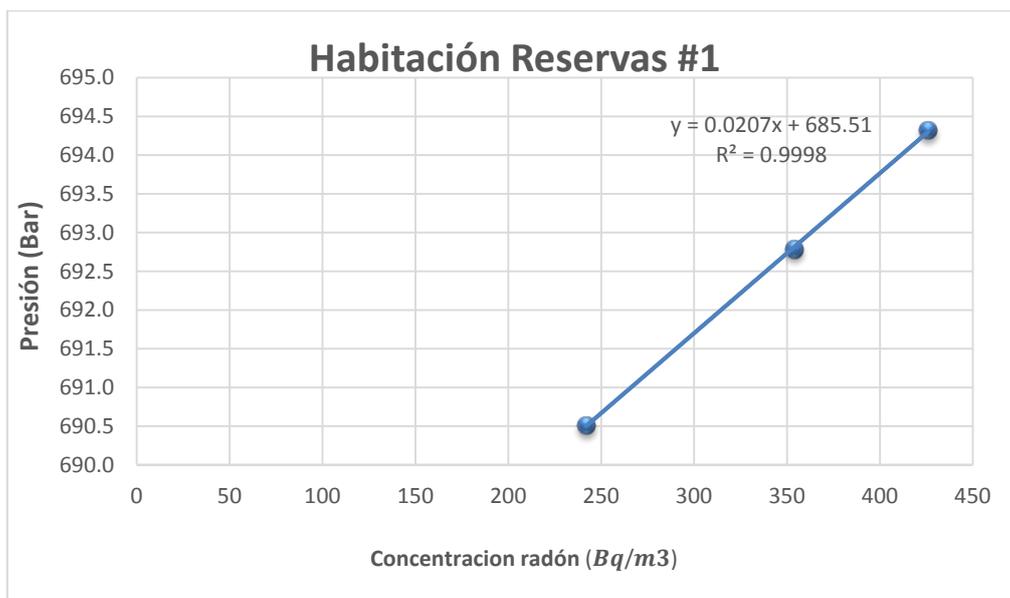


Figura 70. Relación entre la concentración de Rn<sup>222</sup> y la presión atmosférica en la Habitación Reservas #1.

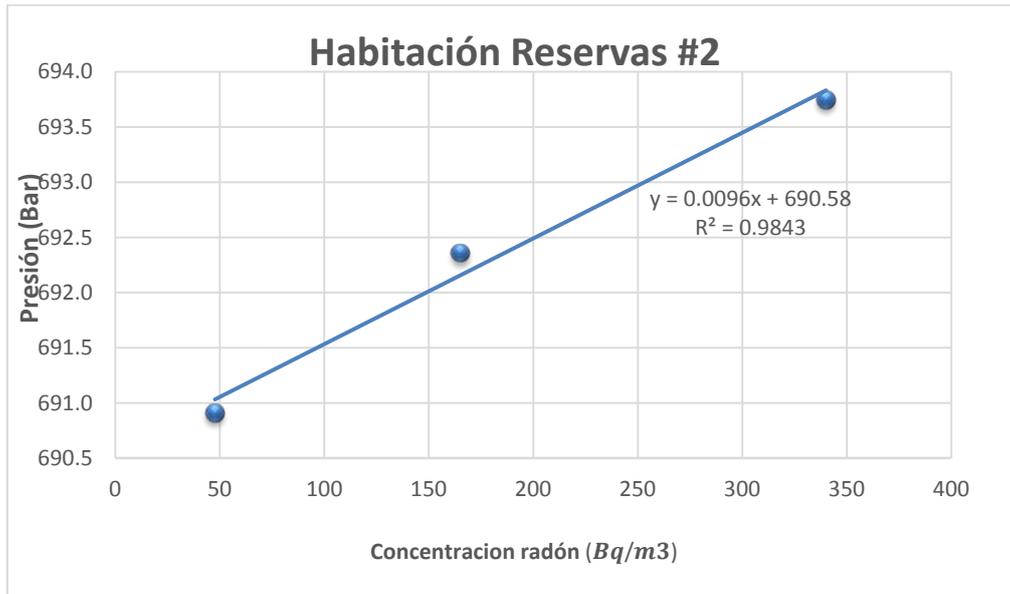


Figura 71. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Habitación Reservas #2.

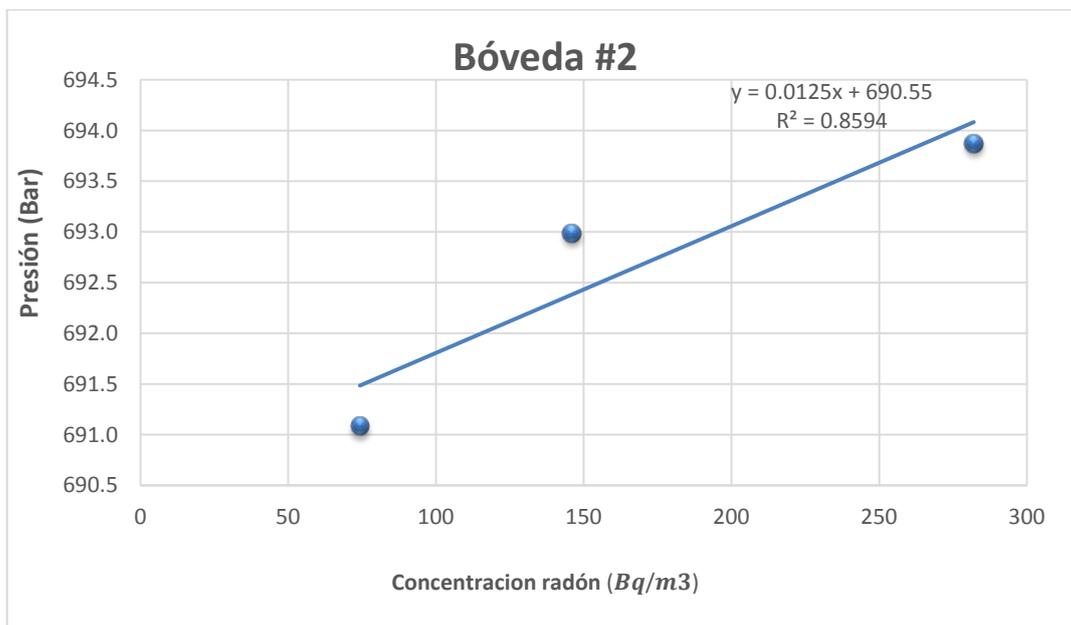


Figura 72. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Bóveda #2.

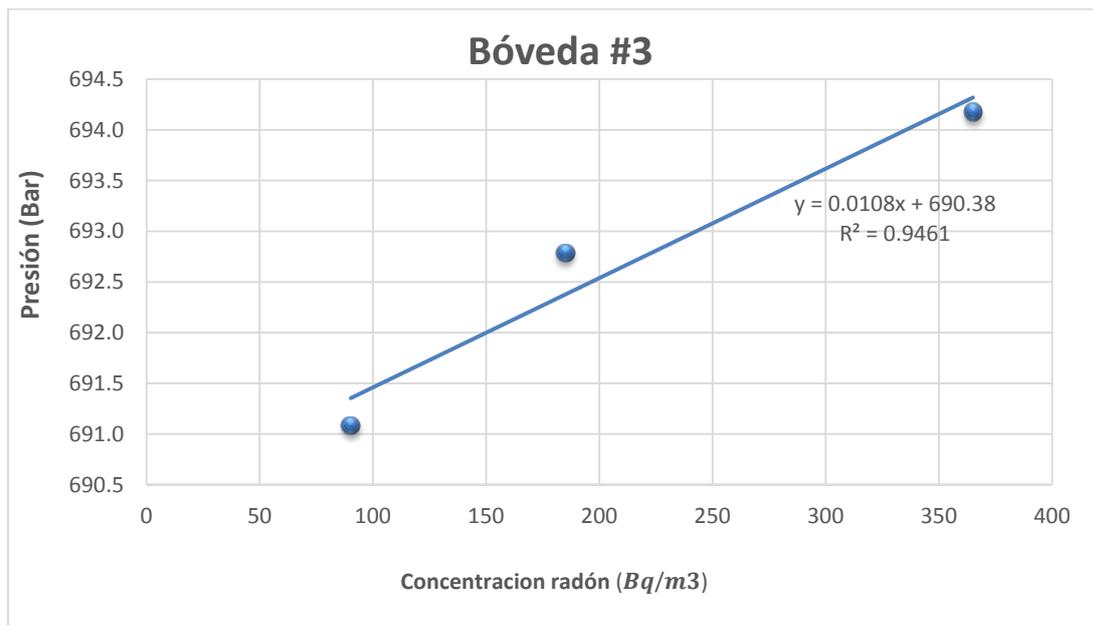


Figura 73. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Bóveda #3.

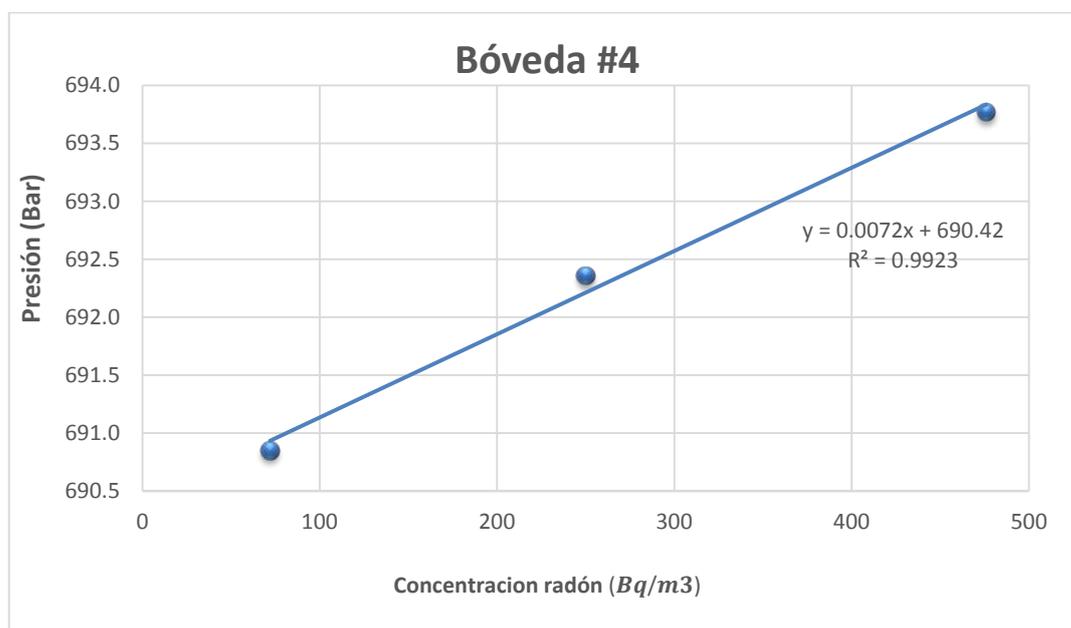


Figura 74. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la presión atmosférica en la Bóveda #4.

En cuanto a la medición de tasa de dosis con el detector LUDLUM (Ver Tabla 9), en la Habitación de Reservas #1 se obtuvo la mayor tasa de dosis con 3 KCPM

de radiación Gamma (Detector Yoduro de Sodio) y un promedio de  $0.1 \left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)$  tanto de radiación Gamma y Beta (Detector Geiger-Müller), este resultado de tasa de dosis de radiación Gamma viene a ser el más alto a diferencia de las otras dos edificaciones monitoreadas.

Tabla 9.

*Medición de tasa de dosis con el equipo LUDLUM modelo 3-97 y sonda modelo 44-38 de la Iglesia de San Francisco*

<b>Edificación LUDLUM</b>	<b>Puntos de la Edificación</b>	<b>Puntos de la Habitación</b>	<b>Gamma (KCPM) M 3-97</b>	<b>Gamma <math>\left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)</math> M 44-38</b>	<b>Beta <math>\left(\frac{\mu Sv}{hr}\right)</math> M 44-38</b>
<b>Iglesia de San Francisco</b>	<b>Habitación de Reservas #1</b>	1	3	0.1	0.3
		2	2.5	0.1	0.1
		3	2.5	0.2	0.1
		4	2	0.1	0.1
	<b>Medición de Fondo</b>		1.4	0.1	0.1
	<b>Habitación de Reservas #2</b>	1	1.7	0.1	0.2
		2	1.8	0.2	0.2
		3	1.8	0.1	0.1
		4	1.7	0.1	0.2
	<b>Medición de Fondo</b>		1.4	0.1	0.1
<b>Bóveda #2</b>	1	1.7	0.1	0.1	
	2	1.5	0.1	0.1	
	3	1.6	0.2	0.1	
	4	1.7	0.1	0.1	
	<b>Medición de Fondo</b>		1.4	0.1	0.1
<b>Bóveda #3</b>	1	2	0.1	0.1	
	2	1.8	0.1	0.1	

	3	1.9	0.1	0.2
	4	2	0.1	0.1
	<b>Medición</b>	1.4	0.1	0.1
	<b>de Fondo</b>			
<b>Bóveda #4</b>	1	2.2	0.1	0.1
	2	2	0.1	0.1
	3	2.1	0.1	0.1
	4	1.8	0.1	0.1
	<b>Medición</b>	1.4	0.1	0.1
	<b>de Fondo</b>			

#### 4.2. Correlación entre la concentración de radón y el área superficial del tipo de material de construcción

Para realizar la correlación se usó los datos de la superficie que cubre cada tipo material de construcción con la concentración de radón analizada en cada punto, usando el programa de RStudio, y también se determinó varios cálculos relacionándose al radón, denotando el cálculo de dosis anual efectiva para conocer si sobrepasa el límite permisible en una persona anualmente.

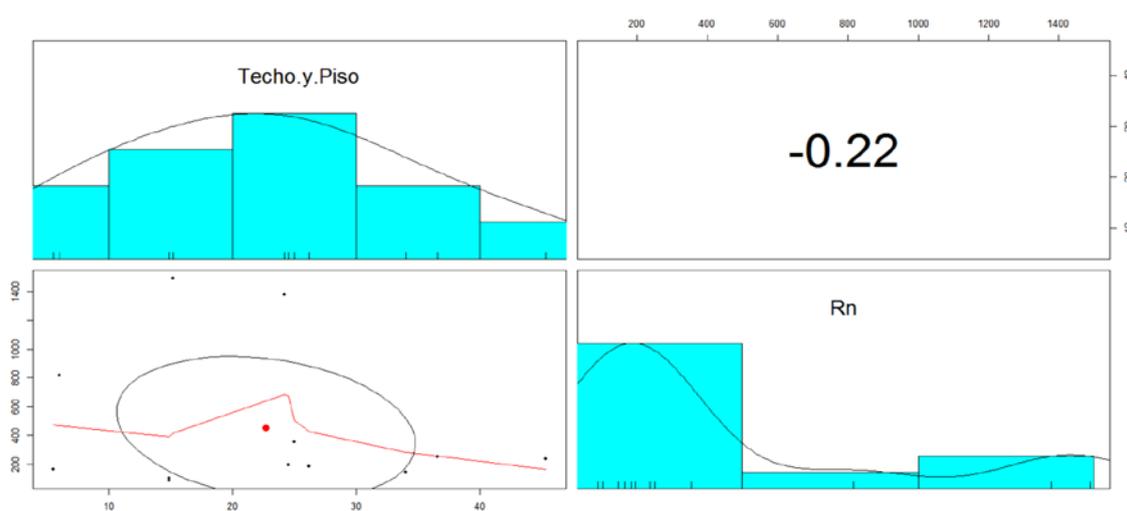


Figura 75. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la superficie cubierta del techo y piso de todas las edificaciones en general.

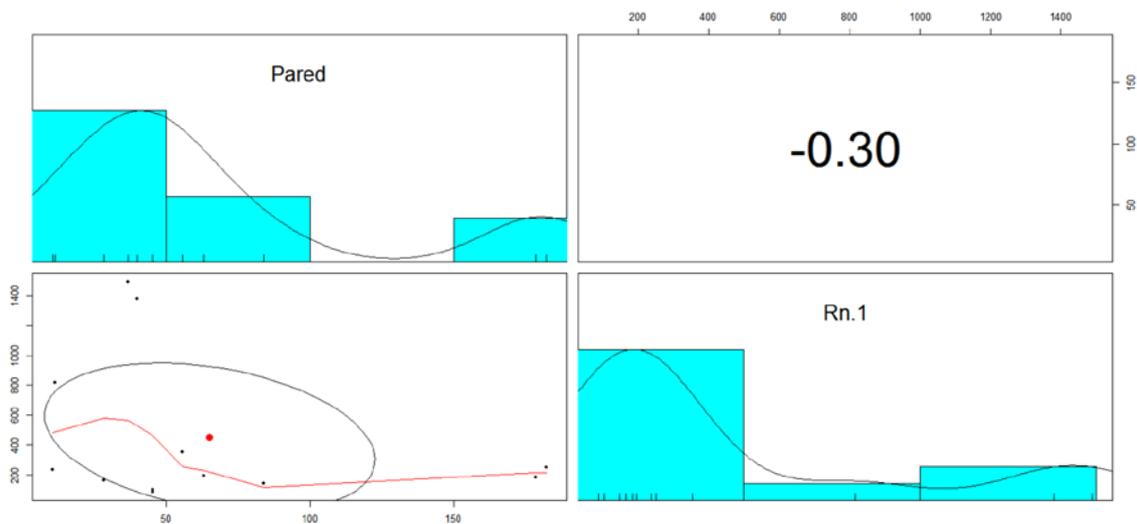


Figura 76. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la superficie cubierta de la pared de todas las edificaciones en general.

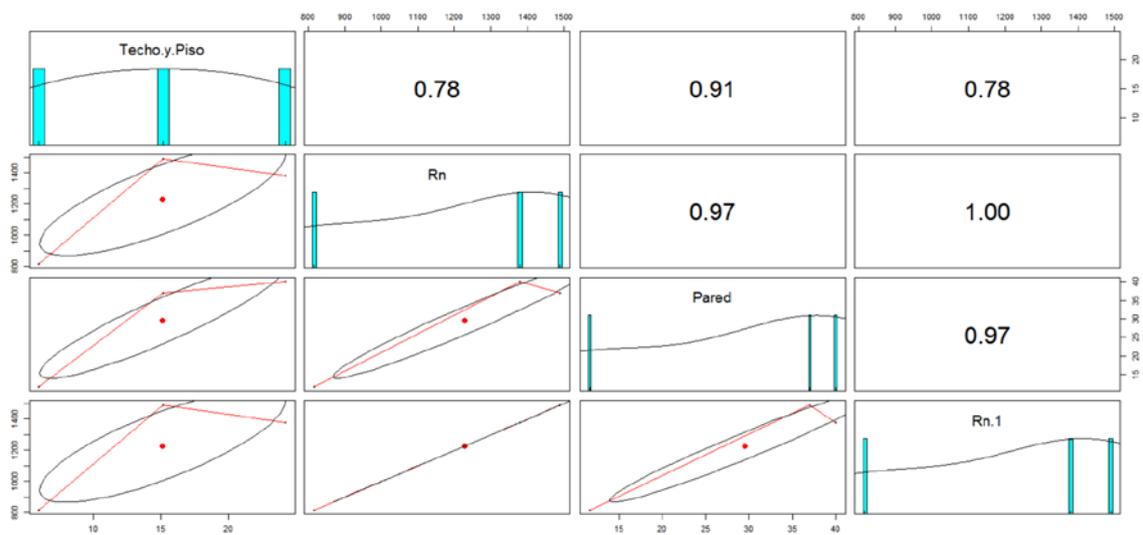


Figura 77. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la superficie cubierta del techo y piso de la Iglesia de la Catedral.

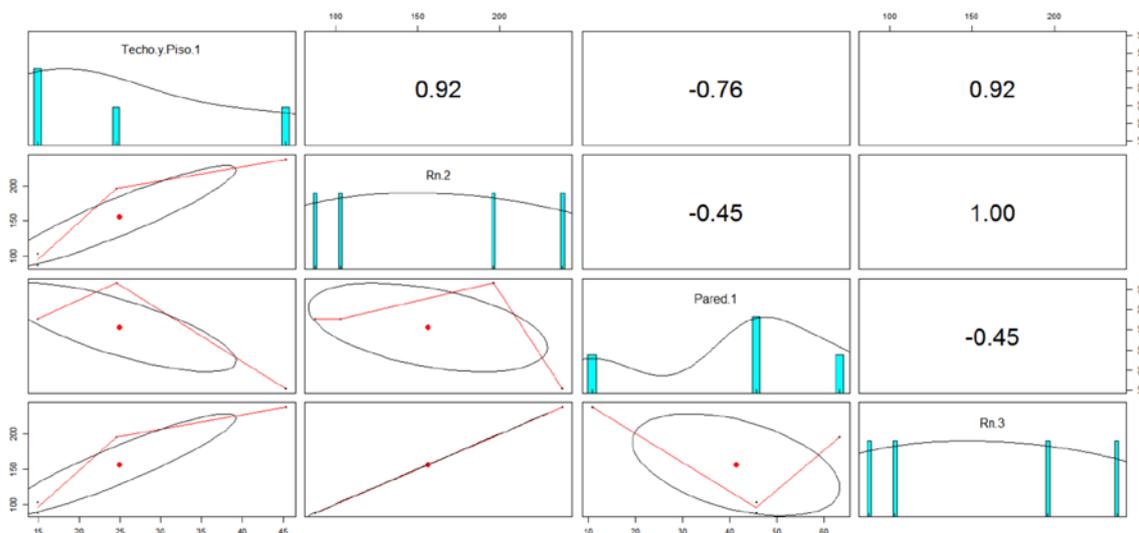


Figura 78. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la superficie cubierta del techo y piso del Museo de la Catedral.

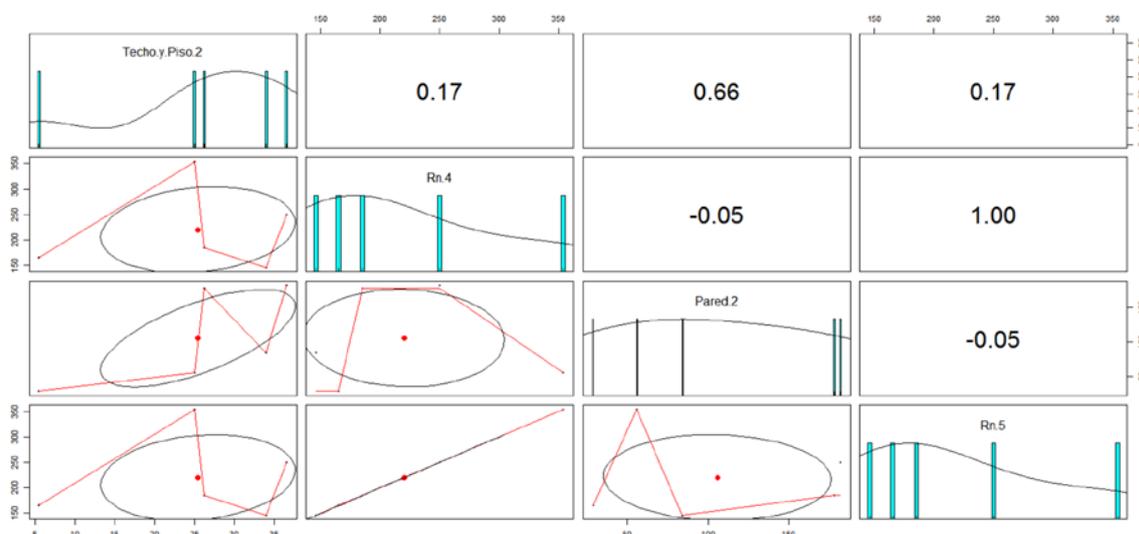
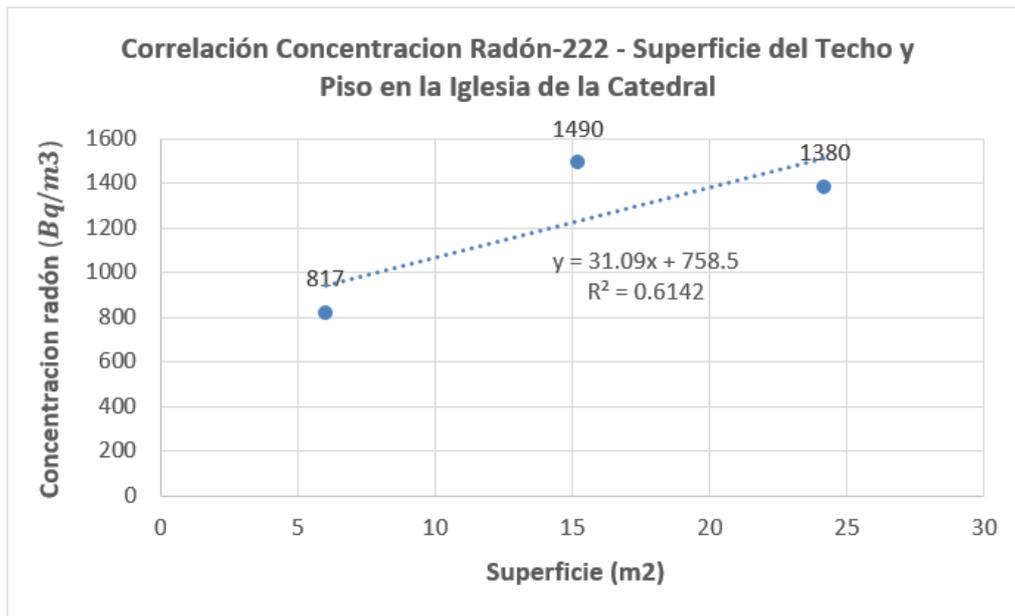


Figura 79. Correlación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y la superficie cubierta del techo y piso de la Iglesia de San Francisco de Quito.

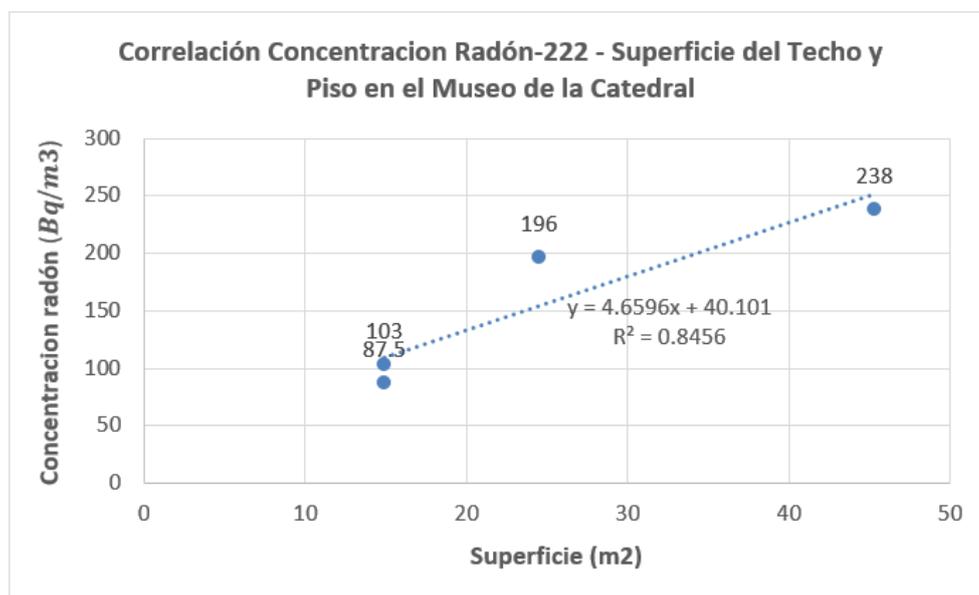
Después de analizar la correlación de datos obtenidos en las distintas edificaciones por el tipo de material de construcción medido en superficie ( $m^2$ ) de recubrimiento en cada punto estudiado con la concentración de radón, encontramos correlaciones positivas con todas las superficies, la Iglesia de la

Catedral es la que tiene datos positivos más cercanos a 1. En cuanto a los tipos de materiales que se encontraron en las edificaciones el de mayor proporción es el ladrillo, bloque y cemento, los cuales tienen concentraciones considerables de radón como en estudios anteriores realizados en Iraq, encontraron concentraciones de radón en ladrillo  $166.55 \text{ Bq/m}^3$ , cemento con  $205.05 \text{ Bq/m}^3$ , bloque  $251.58 \text{ Bq/m}^3$ , piedra  $121.95 \text{ Bq/m}^3$ , yeso  $165.5 \text{ Bq/m}^3$ , adobe  $35.28 \text{ Bq/m}^3$  y cerámica  $174.12 \text{ Bq/m}^3$  (Najam, Tawfiq y Mahmood, 2013). Según la correlación realizada se puede evidenciar que si existe mayor concentración de radón en lugares con dimensiones más pequeñas a comparación a las áreas más extensas en las diferentes edificaciones y el monitoreo de radón en la Iglesia de la Catedral es más alto por lo que está más cercano al suelo y es en perspectiva un sótano de la edificación por lo que la concentración tiende a magnificarse.

Además, como se puede ver en las Figuras 82, 84 y 85 la tendencia de la relación entre la concentración de  $\text{Rn}^{222}$  y superficie tanto de la pared, techo y piso no tiene mucha significancia, esto se debe a que las dimensiones de las habitaciones monitoreadas son muy espaciales y la concentración de radón disminuye.



*Figura 80.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie del techo y piso en la Iglesia de la Catedral.



*Figura 81.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie del techo y piso en el Museo de la Catedral.

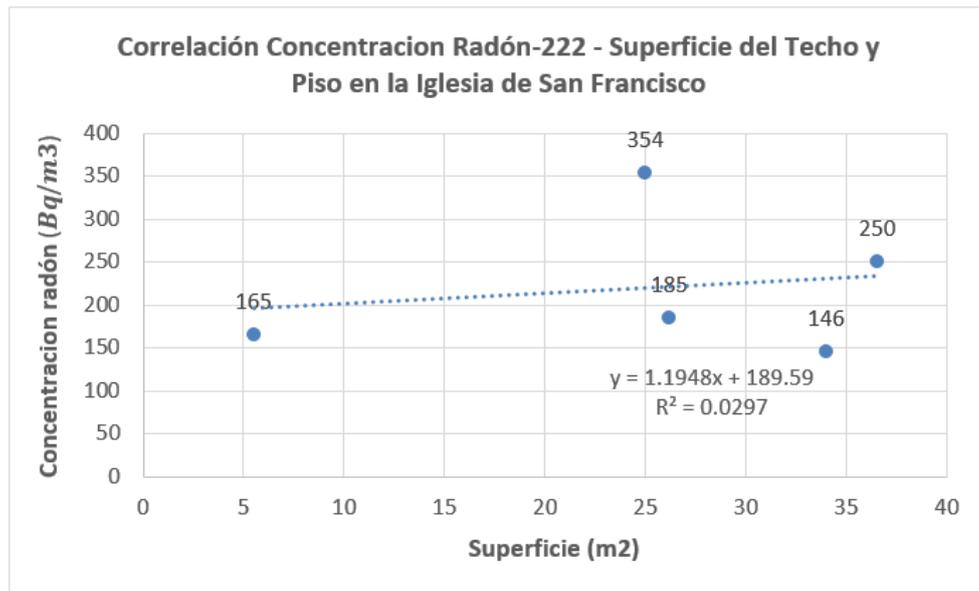


Figura 82. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie del techo y piso en la Iglesia de San Francisco.

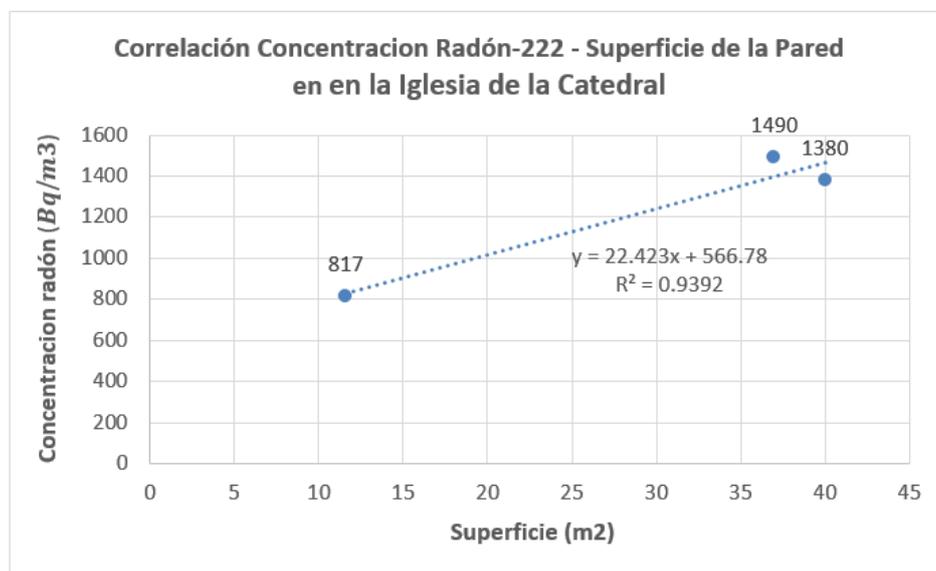
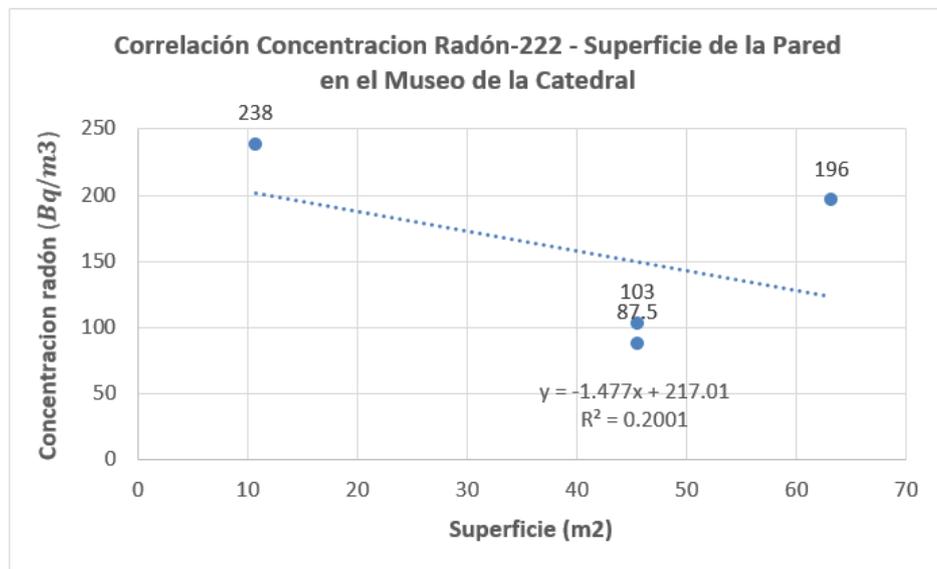
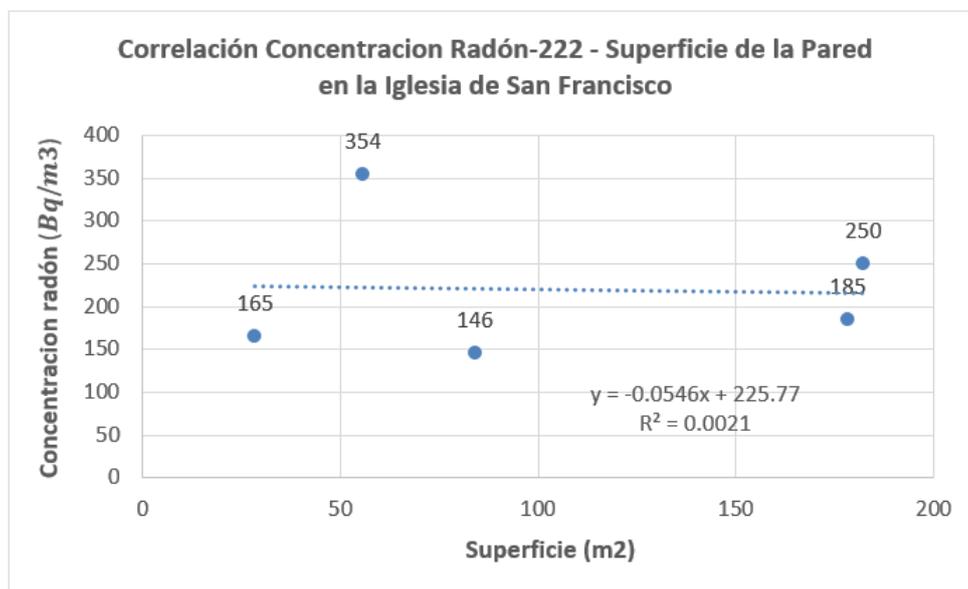


Figura 83. Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie de las paredes en la Iglesia de la Catedral.



*Figura 84.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie de las paredes en el Museo de la Catedral.



*Figura 85.* Relación entre la concentración de  $Rn^{222}$  y superficie de las paredes en la Iglesia de San Francisco.

### 4.3. Dosis Anual Recibida

Los datos de dosis anual recibida de  $Rn^{222}$  en las diferentes edificaciones se observa en la Tabla 10, se la realizo en base a la Ecuación 3, la dosis anual más alta es de  $8.582 \left(\frac{mSv}{año}\right)$  correspondiente a la Cripta #3 de la Iglesia de la Catedral y la dosis anual más baja es de  $0.504 \left(\frac{mSv}{año}\right)$  correspondiente a la Habitación #3 del Museo de la Catedral. Estos cálculos se realizaron referente a la actividad anual de 2000 horas/anales laborables en Ecuador teniendo un promedio de 8 horas diarias por la actividad ocupacional que tienen los guías en el caso de la Iglesia y Museo de la Catedral y del personal de limpieza y restauración en el caso de la Iglesia de San Francisco.

- **Dosis Anual Efectiva**

$$DAE = C_{Rn} * F * H * T * D \quad \text{Ecuación 3}$$

$$DAE = 2350 \text{ Bq/m}^3 * 0.4 * 0.8 * 2000\text{h} * 9 \times 10^{-6} \text{ mSv} * \text{m}^3/\text{Bq} * \text{h}$$

$$DAE = 8.582 \left(\frac{mSv}{año}\right)$$

Los resultados más altos de tasa de dosis anual analizada en la Iglesia de San Francisco fue de  $2.039 \left(\frac{mSv}{año}\right)$ , el cual no sobrepasa el limite permisible originado por radiación de origen natural que es de  $2.4 \left(\frac{mSv}{año}\right)$  (UNSCEAR, 2000). Por otra parte, en el Museo de la Catedral la tasa de dosis más alta fue de  $1.371 \left(\frac{mSv}{año}\right)$ , esta cantidad está permitida mediante normativa es decir que no causa daño al ser humano. Sin embargo, las tasas de dosis anuales analizadas en las criptas de la Iglesia de la Catedral todas estas sobrepasan el limite permisible de  $2.4 \left(\frac{mSv}{año}\right)$ , teniendo valores mínimos a máximos que van desde 4 a  $8 \left(\frac{mSv}{año}\right)$ .

Tabla 10.

Datos de los cálculos realizados

Edificación	Puntos Analizados	Concentración Media de Rn222 ( $Bq/m^3$ )	Dosis Anual Efectiva ( $\frac{mSv}{año}$ )	Potencial de concentración de energía Alfa (WL)	Exposición a los descendientes de Rn222 ( $\frac{WLM}{año}$ )	Cáncer de pulmón ( $\frac{10^6 \text{ personas}}{año}$ )
Iglesia de la Catedral	Cripta #1	1370	4.706	0.088	0.423	85
	Cripta #2	1700	7.949	0.149	0.715	143
	Cripta #3	2350	8.582	0.161	0.772	154
Museo de la Catedral	Habitación #3	146	0.504	0.009	0.045	9
	Habitación #4	157	0.593	0.011	0.053	11
	Habitación #6	263	1.129	0.021	0.102	20
	Habitación Reservas	346	1.371	0.026	0.123	25
Iglesia de San Francisco	Habitación de Reservas #1	426	2.039	0.038	0.183	37
	Habitación de Reservas #2	340	0.950	0.018	0.085	17
	Bóveda #2	282	0.841	0.016	0.076	15
	Bóveda #3	365	1.066	0.020	0.096	19
	Bóveda #4	476	1.444	0.027	0.129	26

#### 4.4. Puntos Críticos de las Edificaciones

Los puntos críticos más representativos a lo largo de todo el monitoreo se pueden ver en la Figura 86, donde las criptas en la Iglesia de la Catedral alcanzan concentración máximas de hasta  $2350 \text{ Bq/m}^3$  y están ubicadas en el sótano de la iglesia. Otro punto representativo a lo largo del estudio es la Habitación de Reservas #1 de la Iglesia de San Francisco donde alcanza concentración de radón máximas de  $426 \text{ Bq/m}^3$ , este punto se encuentra en la primera planta a comparación de las criptas que están en el sótano por lo que la concentración tiende a ser superior ya que está más cerca del suelo.

##### PUNTOS CRÍTICOS DE LAS EDIFICACIONES MONITOREADAS

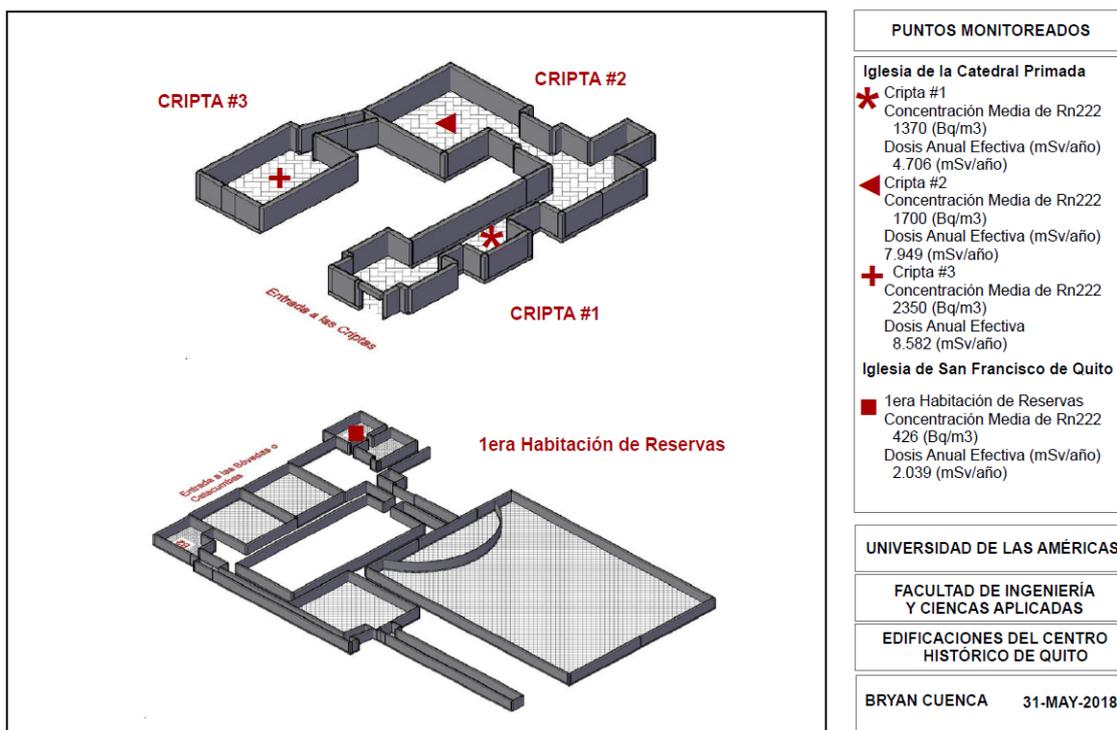


Figura 86. Puntos críticos de las edificaciones

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1. Conclusiones

#### **Identificar los diferentes tipos de materiales de construcción de los lugares en estudio.**

En las edificaciones se encontraron diversos tipos materiales empleados en su construcción, el principal material usado es el ladrillo, también se debe denotar que los diferentes lugares monitoreados tienen siglos de construcción por lo que antiguamente se usaba ladrillo para el uso en la infraestructura como iglesias, museos u otros. Otro de los materiales que aún se hallaban visualmente es el adobe y piedra en la Iglesia de la Catedral, también se encontraron tipos de materiales como el cemento, bloque y yeso en varios de estos sitios por reconstrucciones a lo largo del tiempo.

En cada edificación se usó la norma AARST y las especificaciones del equipo RAD7 para monitoreo del gas radón, la cual fue buscar un lugar que se encuentre totalmente cerrado para proceder con la prueba los cuales las áreas cambian significativamente de los lugares analizados. Por otro lado, las dimensiones que cubren el tipo de material de construcción varían de cada punto estudiado por lo que se analizó mediante correlaciones si el espacio de los tipos de materiales de construcción se relaciona a la concentración de radón.

#### **Evaluar en los puntos identificados la concentración de radón.**

La presencia de radón en las edificaciones monitoreadas fueron considerables en ciertos puntos, muchas de estas sobrepasan los límites permisibles establecidos por diferentes normativas a nivel internacional como lo dice el Diario Oficial de la Unión Europea 143 ( $400 \text{ Bq/m}^3$ ), EPA ( $148 \text{ Bq/m}^3$ ), OMS ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) y OIEA ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ).

De todas las edificaciones analizadas la que presenta mayor concentración de radón es la Iglesia de la Catedral, se presume que la concentración es más alta a comparación de los demás puntos porque se pudo realizar el monitoreo en el sótano de la Iglesia o en este caso llamadas criptas o catacumbas, donde por la profundidad y la falta de ventilación del área tiende a que la concentración de radón sea superior a los otros puntos estudiados con una concentración máxima de  $Rn^{222}$  de  $2350 \text{ Bq/m}^3$ , a diferencia de la Iglesia de San Francisco su mayor concentración fue de  $476 \text{ Bq/m}^3$  donde el monitoreo fue realizado en la primera planta de la infraestructura y la concentración de radón más alta en la edificación del Museo de la Catedral fue de  $346 \text{ Bq/m}^3$ .

Se realizó el cálculo de tasa de dosis anual a través de la ecuación dosis efectiva recibida de  $Rn^{222}$  en las diferentes edificaciones fue que la tasa de dosis más alta es de  $8.582 \left(\frac{mSv}{año}\right)$  correspondiente a la Cripta #3 de la Iglesia de la Catedral sobrepasando el límite permisible de  $2.4 \left(\frac{mSv}{año}\right)$  en puesto de trabajo establecido por el Comité Científico de las Naciones Unidas para el estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas y de la misma manera sobrepasan el límite permisible dos puntos más que son las Criptas #1-2, se toma en consideración que las criptas permanecen abiertas solo tres días a la semana pero se debe tomar en cuenta que los demás días de la semana se encuentran cerradas por lo que el intercambio de aire no existe durante ese período y la cantidad de concentración de radón puede ser que se magnifique

### **Analizar la relación entre los tipos materiales de construcción y la concentración de radón en las diferentes áreas estudiadas.**

Los diferentes tipos de materiales de construcción sin duda tienen concentraciones de radón por datos de fuentes bibliográficas que se han revisado para conocer que material de construcción emana cierta cantidad de  $Rn^{222}$ , después de realizar las correlaciones en RStudio se pudo evaluar que la correlación más significativa en las diferentes edificaciones fue las criptas de la Iglesia de la Catedral ya que es la más cerca al +1 positivo tanto como paredes,

piso y techo, esto se puede deber a que los resultados de concentración de radón son más altos en ese punto de toda la investigación realizada y las dimensiones en los diferentes puntos de las cripta son los más pequeños a comparación de las demás puntos monitoreados. Entonces existe influencia ya sea por el tamaño del área monitorea, el ancho de las paredes según la edificación y su antigüedad.

Observando la tendencia de la relación de las áreas que cubren el tipo de material de construcción con la concentración se puede concluir que si hay una relación del piso, techo y pared con la concentración de radón evaluada en cada punto excepto en la Iglesia de San Francisco, se cree que no existe una relación significativa en este punto por las dimensiones de donde fue medido la concentración de radón ya que por el área tan extensa el radón tiende a difuminarse por lo que existe más intercambio de aire en esas zonas y no es tan representativa como en otros puntos analizados.

## **5.2. Recomendaciones**

Se recomienda realizar hábitos de ventilación de las habitaciones en caso de las edificaciones que tengan accesos en las primeras plantas y en el caso de los sótanos o criptas de las Iglesias, adecuar sistemas de extracción de aire o purificadores de aire para poder disminuir la concentración de radón.

Se recomienda disminuir el tiempo de exposición donde la concentración de radón es alto tanto para guías como para el personal de limpieza y restauración.

Se recomienda que realicen estudios anuales de gas radón, para evitar complicaciones en la salud a futuro.

Se recomienda capacitar a las personas que ejerzan algún tipo de trabajo o habiten en los lugares monitoreados, para que conozcan los riesgos que puede ocasionar este gas.

Finalmente, se recomienda que se continúen los estudios de la evaluación de radón en interiores, para seguridad de las personas y crear una normativa a futuro para la ciudad de Quito, teniendo el conocimiento de los riesgos a la salud por la influencia de este gas radiactivo de origen natural.

## REFERENCIAS

- Abdullah, A. (2013). *Internal and external radiation exposure evaluation amongst selected workers and locations in Iraq*. Recuperado el 12 de febrero de 2018 de <http://xurl.es/zbg00>
- Ahmed, J.U. (s.f). Seguridad radiológica en las minas y plantas de tratamiento de uranio. Recuperado el 15 de enero de 2018 de [https://www.iaea.org/sites/default/files/23204842932\\_es.pdf](https://www.iaea.org/sites/default/files/23204842932_es.pdf)
- Alberto Ruano Raviña., Luis Quindós Poncela., Carlos Sainz Fernández y Juan Barros. (2014). Radón interior y salud pública en España. Tiempo para la acción. Recuperado el 12 de febrero de 2018 de [http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0213-91112014000600001](http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0213-91112014000600001)
- Alemán, M., Díaz, R., Gómez, N. y Gáleas, L. (1998). Salvaguardia de la Catedral Primada de Quito. Quito, Ecuador: Edificiones Culturas UNP y PRODEP
- Alonso, H. (2015). El radón en suelos, rocas, materiales de construcción y aguas subterráneas de las Islas Canarias Orientales. Recuperado el 13 de marzo de 2018 de <https://acceda.ulpgc.es:8443/handle/10553/18553>
- Al-Zoughool, M. y Krewski, D. (2008). *Health effects of radon: A review of the literature*. Recuperado el 27 de mayo de 2018 de <https://www.tandfonline.com/doi/citedby/10.1080/09553000802635054?scroll=top&needAccess=true>
- Amorrín, E. (2013). Cáncer de pulmón, una revisión sobre el conocimiento actual, métodos diagnósticos y perspectivas terapéuticas. Recuperado el 03 de febrero de 2018 de [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342013000100017&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342013000100017&script=sci_arttext&tlng=en)
- Ashokkumar, P., Sahoo, B., Topkar, A., Raman, A., Babu, D., Sharma, D., y Mayya, Y. (2013). *An improved silicon PIN diode based portable radon monitor*. Indian Journal of Physics, (87), 471-477. Recuperado el 14 de mayo de 2018 de [https://www.researchgate.net/publication/257593412\\_An\\_improved\\_silicon\\_PIN\\_diode\\_based\\_portable\\_radon\\_monitor](https://www.researchgate.net/publication/257593412_An_improved_silicon_PIN_diode_based_portable_radon_monitor)
- Bertinstruments. (2016). *ALPHAGUARD – Radon monitor*. Recuperado el 12 de marzo de 2018 de <https://www.bertin-instruments.com/product/radon-professional-monitoring/radon-alphaguard/>

- Cano, D. (2006). Alfa, beta y gamma. Recuperado de <http://www.madrimasd.org/blogs/ciencianuclear/2006/12/01/53391>
- Carpio, G. (2016). Detección de las concentraciones de Radio-226 y exhalación de Radon-222 en algunos materiales de construcción de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Recuperado el 12 de febrero del 2018 de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12979/1/UPS-CT006757.pdf>
- Carpio, G. (2016). Detección de las contracciones de radio-226 y exhalación de radon-222 en algunos materiales de construcción de la ciudad de Cuenca, Ecuador. Recuperado 19 de mayo del 2018 de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/12979/1/UPS-CT006757.pdf>
- Catedral Primada de Quito. (2016). Catedral Metropolitana de Quito. Recuperado el 23 de enero de 2018 de <http://www.catedraldequito.org/el-museo/>
- Colmenero, Sujo. y Villalba, L. (2010). Presencia de radón en casas habitación del estado de Chihuahua. TecnoCiencia-Chihuahua. Recuperado de 15 de enero de 2018 de [http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v4n3/data/Presencia\\_de\\_radon\\_en\\_casas\\_habitacion\\_del\\_estado\\_de\\_Chihuahua.pdf](http://tecnociencia.uach.mx/numeros/v4n3/data/Presencia_de_radon_en_casas_habitacion_del_estado_de_Chihuahua.pdf)
- Comité Científico de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas. (2000). *Sources and effects of ionizing radiation*. Recuperado el 11 de mayo del 2018 de [http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR\\_2000\\_Report\\_Vol.I.pdf](http://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf)
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010). Dosis de radiación. Recuperado el 07 de mayo de 2018 de <https://www.csn.es/documents/10182/914805/Dosis%20de%20radiaci%C3%B3n>
- Cuadrado, C. y Carrasco, J. (2016). Medición de la Concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en Residencias y Lugares de Trabajo en la Ciudad de Riobamba. Recuperado el 25 de marzo de 2018 de [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/48/016/48016669.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/016/48016669.pdf)
- Diario Oficial de la Unión Europea. (2014). Directiva 2013/59/EURATOM del consejo de 5 de diciembre de 2013. Recuperado el 30 de abril de 2018 de <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>

- Durridge. (2014). RAD7 Detector de radón. Recuperado de <https://durridge.com/products/rad7-radon-detector/>
- Egey, J y Matatgui, E. (2015). Sistema monitor de gases radiactivos: tritio, radón, gases nobles. Recuperado el 12 de febrero de 2018 [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/48/045/48045158.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/48/045/48045158.pdf)
- Escudero, X. (2006). Iglesias y Conventos de Quito antiguo. TRAMA, TRADISEÑO S.A.
- Espinosa, G., Golzarri, J., Angeles, A., Juárez, F., Martínez, T. y Navarrete, M. (2009). *Radon concentration levels in 16 th and 17 th century's churches and convents*. Recuperado el 25 de abril de 2018 de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10967-009-0537-1>
- F, Villalba y A, Jarrín. (2001). Medición de radón en el conjunto arquitectónico de Guápulo. Recuperado el 04 de febrero de 2018 de <http://repositorio.uisek.edu.ec/handle/123456789/2302>
- García, B. (2004). Distribución de la concentración de  $^{222}\text{Rn}$  en el Estado de Zacatecas mediante Trazas Nucleares. Universidad Autónoma de Zacatecas, Centro Regional de Estudios Nucleares.
- García, J. (2014). Influencia de las condiciones meteorológicas sobre el nivel de radón a corto plazo en un laboratorio subterráneo. Recuperado el 15 de abril de 2018 de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-07052014000200005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052014000200005)
- García, J. (2016). Estudios del radón en viviendas mediante modelos de minería de datos basados en cubos olap. Recuperado el 10 de mayo de 2018 de [http://oa.upm.es/40156/1/JAVIER\\_GARCIA\\_TOBAR.pdf](http://oa.upm.es/40156/1/JAVIER_GARCIA_TOBAR.pdf)
- Gonzáles, G. y Rabin, C. (2011). Para entender las radiaciones – Energía Nuclear. Recuperado el 07 de febrero de 2018 de [http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Para\\_entender\\_las\\_radiaciones.pdf](http://divnuclear.fisica.edu.uy/libro/Para_entender_las_radiaciones.pdf)
- Guerrero, J. y Pérez, J. (2006). Las radiaciones no ionizantes y su efecto sobre la salud humana. Recuperado 12 de marzo de 2018 de [http://bvs.sld.cu/revistas/mil/vol35\\_3\\_06/mil08306.htm](http://bvs.sld.cu/revistas/mil/vol35_3_06/mil08306.htm)
- Imbroda, M. C., Miró, M. L. B., y Mena, E. M. (2010). Riesgos asociados a los distintos tipos de radiación. *Radiobiología: Revista electrónica*, 10(1), 220-224. Recuperado el 04 de febrero de 2018 de

[http://www.rayos.medicina.uma.es/rmf/radiobiologia/revista/Numeros/RB10\(2010\)220-224.pdf](http://www.rayos.medicina.uma.es/rmf/radiobiologia/revista/Numeros/RB10(2010)220-224.pdf)

- Lenntech, 2018. Propiedades químicas del Radón - Efectos del Radón sobre la salud - Efectos ambientales del Radón. Recuperado el 22 de abril de 2018 de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/rn.htm>
- Llerena, J. (2006). Medición de la concentración de gas <sup>222</sup>Radón en el interior de edificios. Recuperado el 19 de abril de 2018 de [http://fpsalmon.usc.es/Diplomas/DEA\\_JJLLlerena.pdf](http://fpsalmon.usc.es/Diplomas/DEA_JJLLlerena.pdf)
- Lubin, J., Boice, J., Edling, C., Hornung, R., Howe, G., Kunz, E., Kusiak, R., Morrison, H., Radford, E., Samet, J., Tirmarche, M., Woodward, A., Xiang Yao, S., y Pierce, D. (1995). *Lung Cancer in Radon-Exposed Miners and Estimation of Risk from Indoor Exposure*. JNCI: Journal of the National Cancer Institute, (87), 817-827. Recuperado el 29 de mayo de 2018 de <https://academic.oup.com/jnci/article-abstract/87/11/817/1141684>
- LUDLUM Measurements. (2016). Manual de Instrucción LUDLUM Modelo 44-38 Detector Beta – Gamma.
- LUDLUM Measurements. (2016). Manual de Instrucción LUDLUM Modelo 3-97 Medidor de Respuesta.
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). Revitalización del Centro Histórico de Quito. Recuperado el 06 de mayo de 2018 de <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/04/PROYECTO-CENTRO-HIST%C3%93RICO-reformulaci%C3%B3n-dictamen-2015.pdf>
- Ministerio de Electricidad y Energías Renovables (MEER). (2016). Acuerdo Ministerial 283. Recuperado el 12 de mayo de 2018 de <https://app.vlex.com/#vid/653513301>
- Miranda, S. y Sajo, L. (2004). Determinación de los parámetros dinámicos del gas radón en aguas termales y potables del distrito Miranda, Edo. Falcón. Recuperado el 11 de abril de 2018 de <http://xurl.es/qargv>
- Najam, L., Tawfiq, N. y Mahmood, R. (2013). *Radon Concentration in Some Building Materials in Iraq Using CR-39 Track Detector*. Recuperado el 24 de mayo de 2018 de <http://pubs.sciepub.com/ijp/1/3/3/>
- Nastro, D., Carní, D.L., Vitale, A., Lamonaca, F. y Vasile, M. (2016). *Passive and active methods for Radon pollution measurements in historical heritage buildings*. Recuperado el 04 de febrero de 2018 de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224116305024>

- NATS-USA. (s.f). *RAD7 Electronic Radon Monitor / Sniffer*. Recuperado el 11 de abril de 2018 de <https://nats-usa.com/wp-content/uploads/2012/09/RAD7-Electronic-Radon-Monitor-Sniffer2.pdf>
- Navarro, J. (1925). *Contribuciones a la Historia del Arte en Ecuador*. Recuperado el 06 de mayo de 2018 de [http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/ecu/12585079823486051109435/p0000003.htm#IMG\\_8\\_](http://www.cervantesvirtual.com/servlet/SirveObras/ecu/12585079823486051109435/p0000003.htm#IMG_8_)
- Normas Técnicas de Protección 440. (1999). NTP 440: El radón en ambientes interiores. Recuperado el 06 de febrero de 2018 de [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnica/s/NTP/Ficheros/401a500/ntp\\_440.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnica/s/NTP/Ficheros/401a500/ntp_440.pdf)
- Normas Técnicas de Protección 533. (1999). NTP 533: El radón y sus efectos sobre la salud. Recuperado el 04 de febrero de 2018 de [http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnica/s/NTP/Ficheros/501a600/ntp\\_533.pdf](http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnica/s/NTP/Ficheros/501a600/ntp_533.pdf)
- Nuclearsafety, 2015. *Types and sources of radiation*. Recuperado el 24 de abril de 2018 de <http://nuclearsafety.gc.ca/eng/resources/radiation/introduction-to-radiation/types-and-sources-of-radiation.cfm>
- Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). (2011). *Protección radiológica y seguridad de las fuentes de radiación: normas básicas internacionales de seguridad* Organismo Internacional de Energía Atómica. Recuperado el 24 de abril de 2018 de [http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed\\_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms\\_171678.pdf](http://www.ilo.org/wcmsp5/groups/public/---ed_protect/---protrav/---safework/documents/publication/wcms_171678.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). *Manual de la OMS sobre el radón en interiores - Una perspectiva de salud pública*. Recuperado el 06 de febrero de 2018 de [http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/161913/1/9789243547671\\_spa.pdf](http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/161913/1/9789243547671_spa.pdf)
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). *El radón y sus efectos en la salud*. Recuperado el 13 de marzo de 2018 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs291/es/>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2016). *Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección*. Recuperado el 19 de febrero de 2018 de <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs371/es/>

- Pereyra, P.E., López, M.E., Vilcapoma L.P., Pérez B.A. y Rojas, J.J. (2015). Recuperado de Mediciones de la concentración de radón 222 en residencias de Lima y Callao – Perú. Recuperado el 17 de febrero de 2018 de [http://www.irpabuenosaires2015.org/Archivos/tr-completos/irpa/1\\_Pereyra\\_\\_IRPA\\_2015\\_Primertrabajo.pdf](http://www.irpabuenosaires2015.org/Archivos/tr-completos/irpa/1_Pereyra__IRPA_2015_Primertrabajo.pdf)
- Piedecausa García, B., Chinchón Payá, S., Morales Recio, M., y Sanjuán Barbudo, M. (2011). Radiactividad natural de los materiales de construcción. Aplicación al hormigón. Parte II. Radiación interna: el gas radón. Recuperado el 09 de mayo de 2018 de <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/27056>
- Quindos, L. (1995). Radón (Un Gas Radiactivo de Origen Natural en su Casa), Cantabria, España: Catedra de Física Médica. Universidad de Cantabria.
- Radiationanswers, 2007). *Types of Radiation*. Recuperado el 02 de febrero de 2018 de <http://www.radiationanswers.org/radiation-introduction/types-of-radiation.html>
- Reglamento de Seguridad Radiológica. (1979). Registro Oficial. Recuperado el 17 de febrero de 2018 de <http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/2016/06/REGLAMENTO-DE-SEGURIDAD-RADIOLOGICA.pdf>
- Rizo, C. (2017). La calidad del aire en la arquitectura histórica y civil de la ciudad de Alicante. El radón como elemento constructivo. Recuperado el 29 de mayo de 2018 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=136987>
- Samet, J. (1989). *Radon and Lung Cancer*. Recuperado el 19 de febrero de 2018 de <https://academic.oup.com/jnci/article-abstract/81/10/745/891738>
- SARAD. (2002). *Portable alpha-beta-gamma spectrometer*. Recuperado el 06 de junio de 2018 de [https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/Manual\\_Spectra50xx\\_EN\\_09\\_02\\_06.pdf](https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/Manual_Spectra50xx_EN_09_02_06.pdf)
- Secretaria de Medi Ambient i Salut Laboral de la UGT de Catalunya. (2010). Radiaciones no ionizantes. Recuperado el 13 de junio de 2018 de [http://www.ugt.cat/download/salut\\_laboral/higiene\\_industrial/quadern\\_radiaciones\\_no\\_ionizantes.pdf](http://www.ugt.cat/download/salut_laboral/higiene_industrial/quadern_radiaciones_no_ionizantes.pdf)
- Suarez, O. y González, Y. (2010). TENORM en el Ecuador: inventario preliminar y el papel de la autoridad reguladora. Recuperado el 08 de febrero de 2018 de [https://www.academia.edu/4747154/TENORM\\_EN\\_EL\\_ECUADOR\\_INV](https://www.academia.edu/4747154/TENORM_EN_EL_ECUADOR_INV)

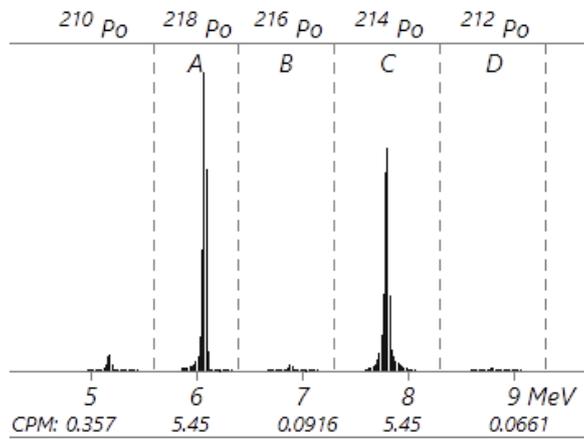
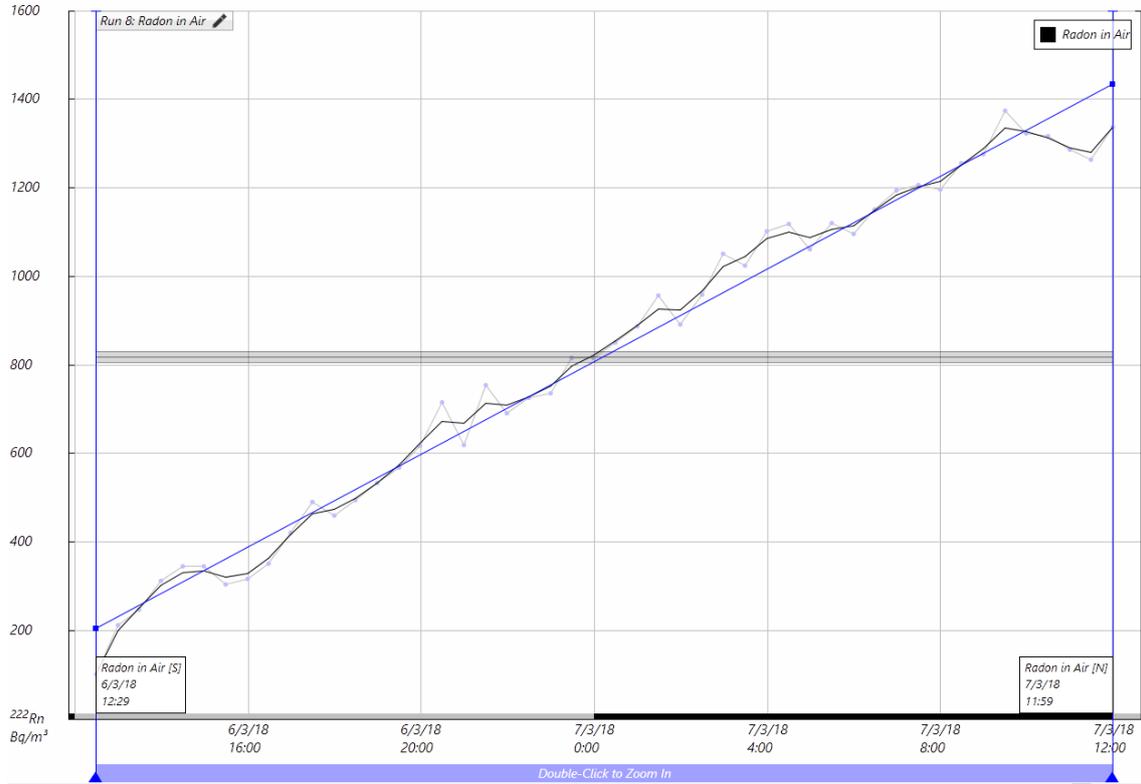
## ENTARIO\_PRELIMINAR\_Y\_EL\_PAPEL\_DE\_LA\_AUTORIDAD\_REGULADORA

- Tawfiq, N. F., Rasheed, N. O., y Aziz, A. A. (2015). *Measurement of Indoor Radon Concentration in Various Dwellings of Baghdad Iraq*. International Journal of Physics, 3(5), 202-207. Recuperado el 19 de febrero de 2018 de <http://pubs.sciepub.com/ijp/3/5/1/index.html#>
- Tene, T. y Capua, M. (2015). *Radon concentration studies on old building materials*. Recuperado el 26 de mayo de 2018 de [https://www.researchgate.net/publication/277289616\\_Radon\\_concentrations\\_studies\\_on\\_old\\_building\\_materials](https://www.researchgate.net/publication/277289616_Radon_concentrations_studies_on_old_building_materials)
- Titipornpun, K., Bhongsuwan, T. y Gimsa, J. (2017). *A Comparative Study of Indoor Radon Concentrations between Dwellings and Workplaces in the Ko Samui District, Surat Thani Province, Southern Thailand*. Recuperado el 26 de mayo de 2018 de <https://waset.org/publications/10008198/a-comparative-study-of-indoor-radon-concentrations-between-dwellings-and-workplaces-in-the-ko-samui-district-surat-thani-province-southern-thailand>
- Torres, S. (2017). Mapeo de Radón 222 en interiores en el Distrito de Los Olivos (Lima - Perú) del 2015 al 2016. Recuperado el 14 de mayo de 2018 de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/8655>
- Towson, J. y Cormack, J. (s.f). Física Básica – Programa de entrenamiento asistido a distancia para Profesionales de Medicina Nuclear. Viena: OIEA
- UKradon. (s.f). *What is radon?*. Recuperado el 08 de enero de 2018 de <http://www.ukradon.org/information/whatisradon>
- UNAM. (s.f). Método de Trazas Nucleares en Sólidos (TNS). Recuperado el 08 de enero de 2018 de <http://www.fisica.unam.mx/personales/espinosa/investigacion3.php>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2001). *Radioisotopes Commonly Used in Devices by Industry*. Recuperado el 01 de febrero de 2018 de [www.epa.gov/radiation/source-reduction-management/radionuclides.html](http://www.epa.gov/radiation/source-reduction-management/radionuclides.html)
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Acerca del radón. Recuperado el 01 de febrero de 2018 de <https://espanol.epa.gov/cai/acerca-del-radon>

- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2017). *Home Buyer's and Seller's Guide to Radon*. Recuperado el 01 de febrero de 2018 de <http://www.epa.gov/radon/pubs/hmbyguid.html>.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Información básica sobre la radiación. Recuperado el 29 de abril de 2018 de <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion>
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2018). *National Radon Action Month Information*. Recuperado el 01 de febrero de 2018. <https://espanol.epa.gov/espanol/informacion-basica-sobre-la-radiacion>
- Webster, S. (2012). La desconocida historia de la construcción de la iglesia de San Francisco en Quito. Recuperado el 11 de febrero de 2018 [http://www.uasb.edu.ec/UserFiles/384/File/Procesos/Procesos%2035/06\\_ESTUDIOS\\_DesconocidaHistoriaSanFco-SWebster.pdf](http://www.uasb.edu.ec/UserFiles/384/File/Procesos/Procesos%2035/06_ESTUDIOS_DesconocidaHistoriaSanFco-SWebster.pdf)
- Who handbook on indoor radon: a public health perspective. (2009). *Geneva: World Health Organization*. Recuperado el 29 de abril de 2018 de <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143216/>.

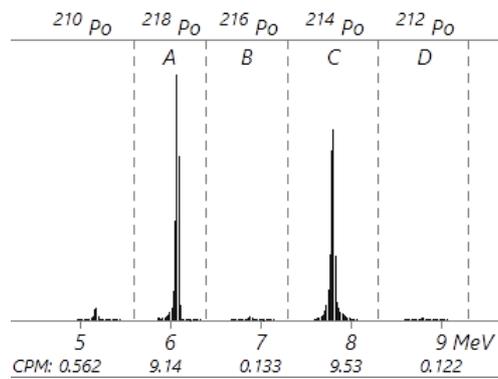
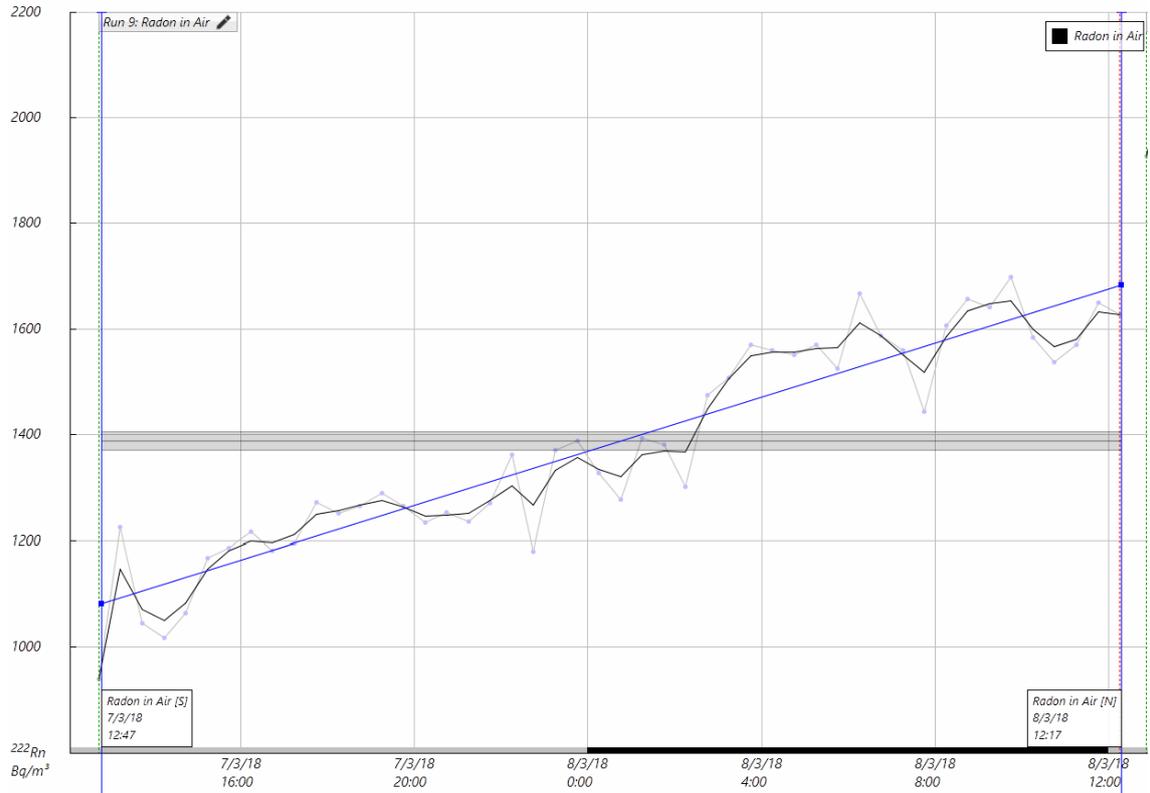
# **ANEXOS**

# Anexo 1. Análisis concentración de radón Cripta 1 – Iglesia de la Catedral



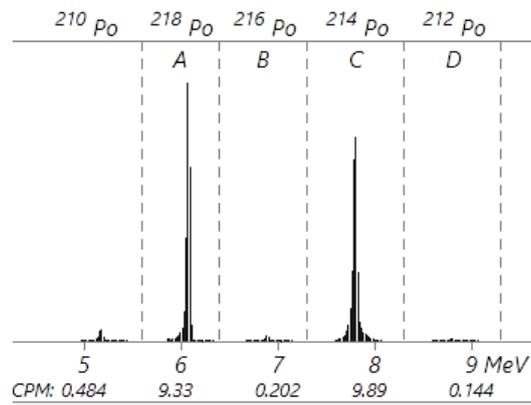
Avg. Radon In Air:  $816 \pm 14 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+52.3 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/\text{Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $19.4^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $5.44\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $49 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.00:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 161 to 208)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 30 \text{ Min.}$

## Anexo 2. Análisis concentración de radón Cripta 2 – Iglesia de la Catedral



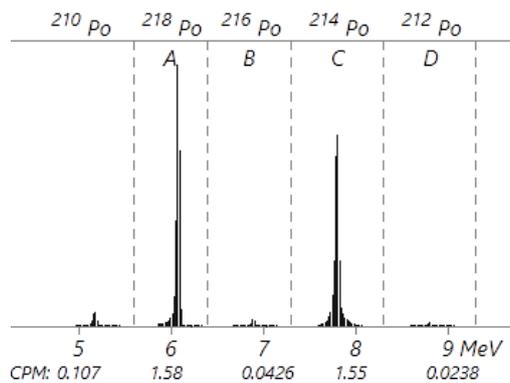
Avg. Radon In Air:  $1380 \pm 18 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+26.3 \text{ (Bq/m}^3\text{)/Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $19.6^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $4.21\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $59 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.05:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 209 to 256)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

### Anexo 3. Análisis concentración de radón Cripta 3 – Iglesia de la Catedral



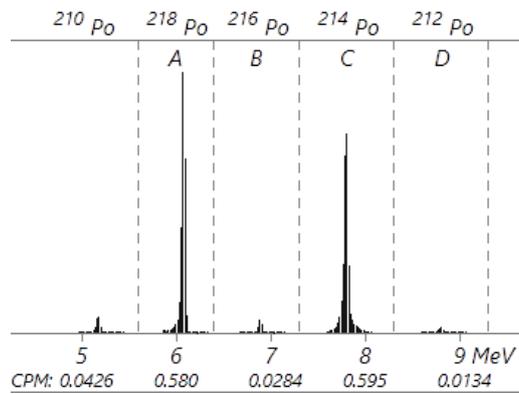
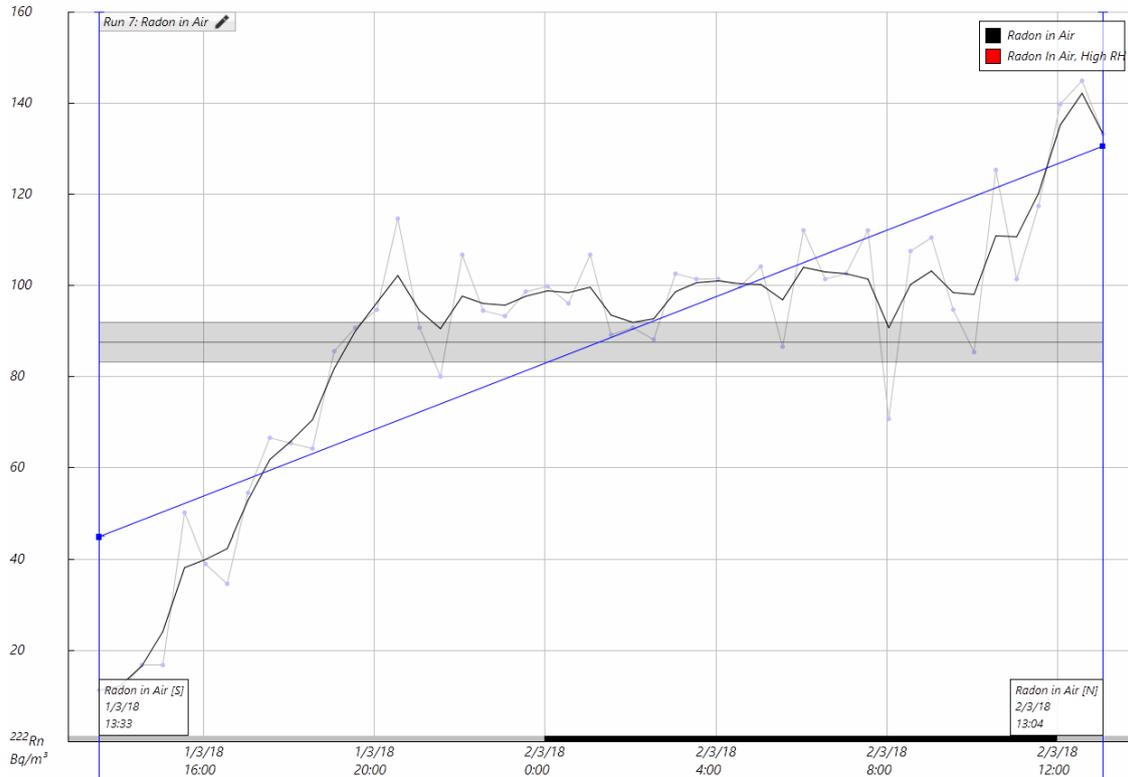
Avg. Radon In Air:  $1430 \pm 19 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $-28.4 \text{ (Bq/m}^3\text{)/Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $18.7^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $4.69\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $53 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.06:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 257 to 304)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

## Anexo 4. Análisis concentración de radón - Museo de la Catedral Habitación Reservas



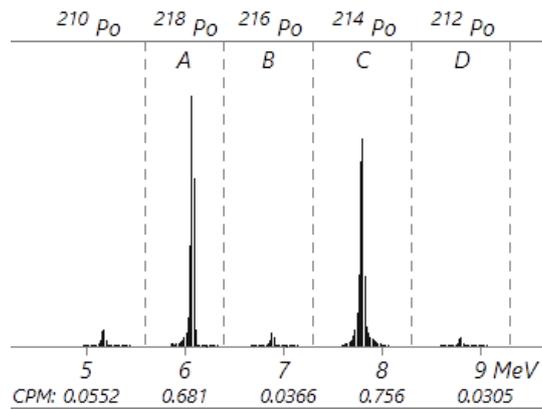
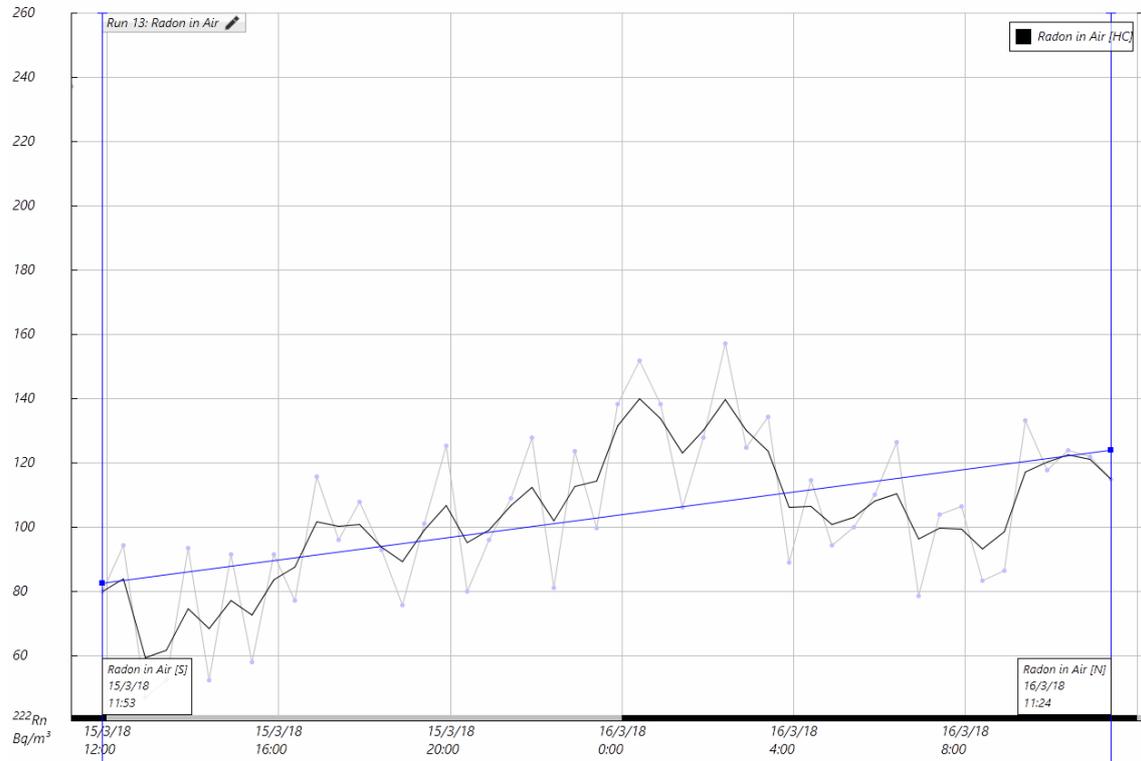
Avg. Radon In Air:  $238 \pm 7 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $-4.05 \text{ (Bq/m}^3\text{)/Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $19.6^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $5.38\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $46 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $0.986:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 305 to 352)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 30 \text{ Min.}$

## Anexo 5. Análisis concentración de radón - Museo de la Catedral Habitación 3



Avg. Radon In Air:  $87.5 \pm 4.4 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+3.61 \text{ (Bq/m}^3\text{)/Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $20.4^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $5.65\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $51 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.03:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 113 to 160)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

## Anexo 6. Análisis concentración de radón - Museo de la Catedral Habitación 4



Avg. Radon In Air:  $103 \pm 5 \text{ Bq/m}^3$

Selection Slope:  $+1.75 (\text{Bq/m}^3)/\text{Hr.}$

Avg. Air Temp:  $20.4^\circ\text{C}$

Avg. RH: 4.48%

Avg. Leakage Current: 0.00

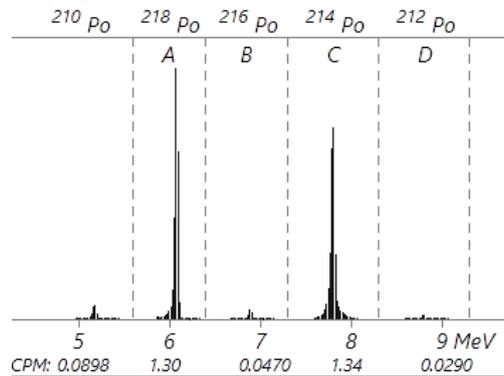
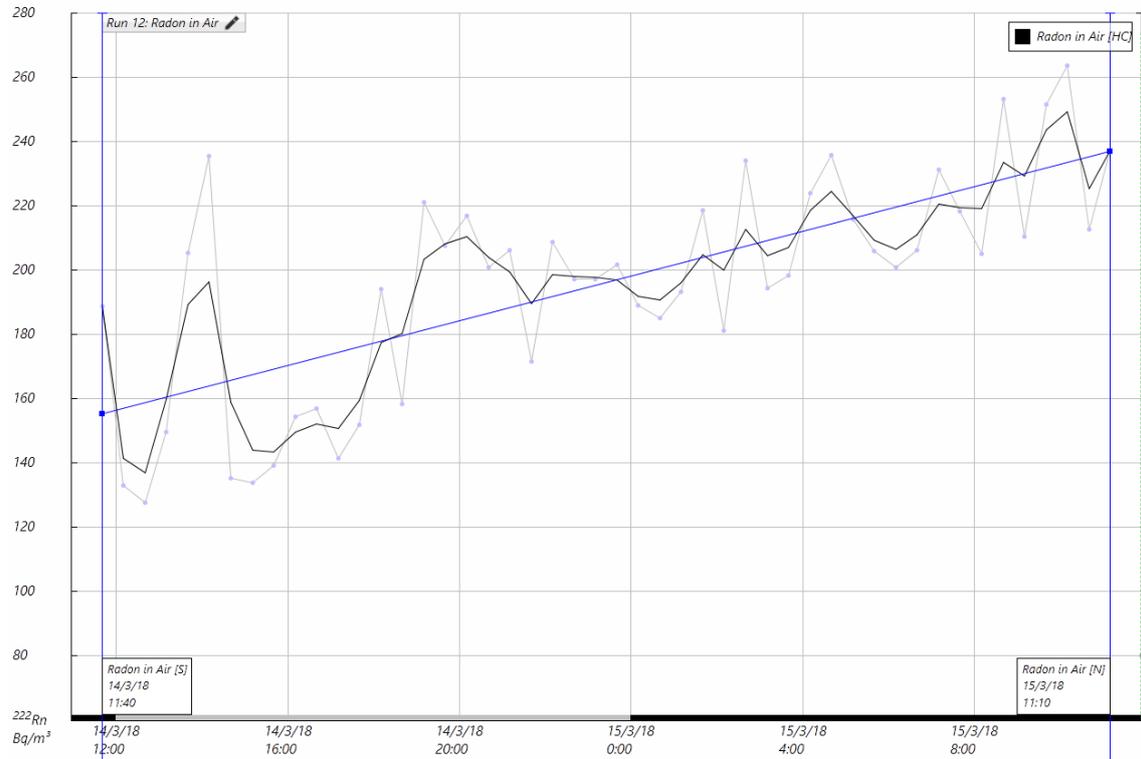
Avg. Pump Current: 58 mA

Avg. C/A Count Ratio: 1.11:1

Num. Data Pts: 48 (Tests 401 to 448)

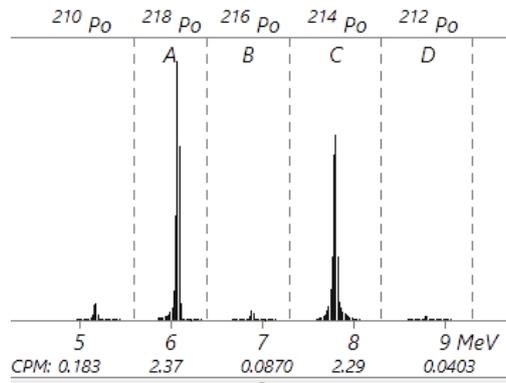
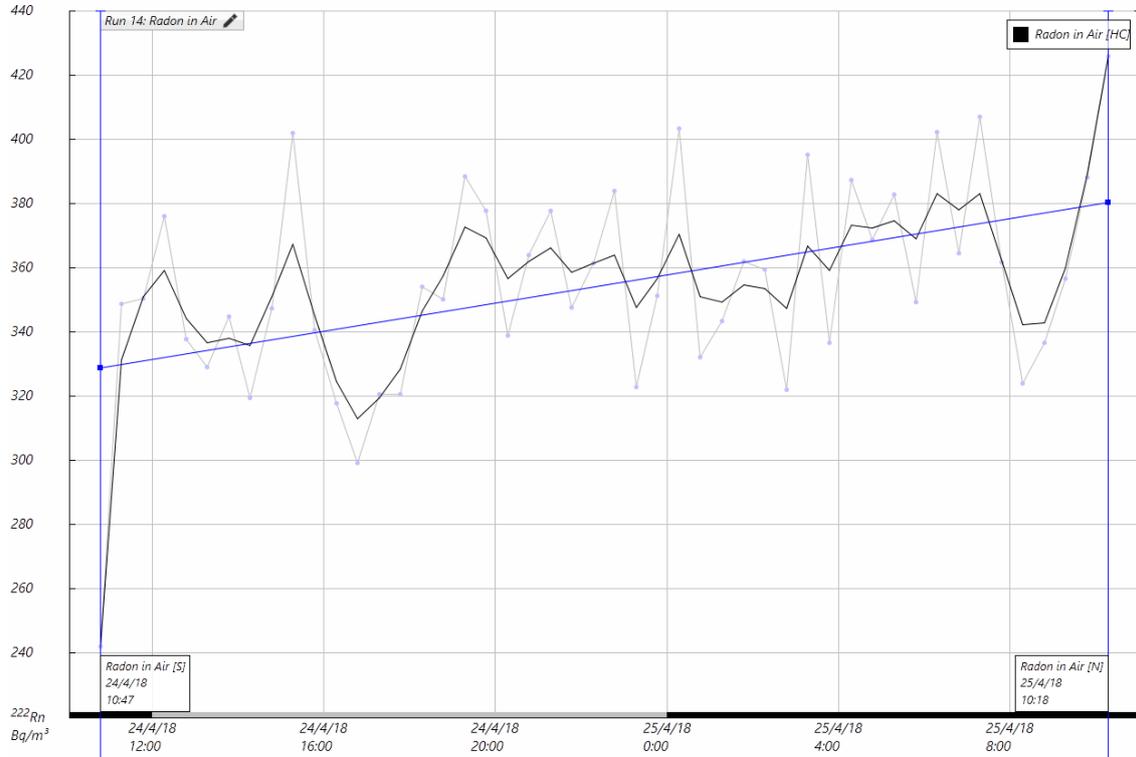
Time Duration: 23 Hrs., 31 Min.

## Anexo 7. Análisis concentración de radón - Museo de la Catedral Habitación 6



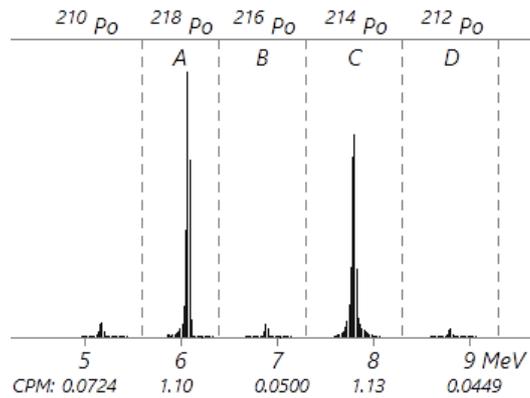
Avg. Radon In Air:  $196 \pm 7 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+3.47 \text{ (Bq/m}^3\text{)/Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $19.6^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $4.17\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $58 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.03:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 353 to 400)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 30 \text{ Min.}$

## Anexo 8. Análisis concentración de radón - Iglesia San Francisco Habitación Reservas 1



Avg. Radon In Air:  $354 \pm 9 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+2.19 (\text{Bq/m}^3)/\text{Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $17.9^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $5.38\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $52 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $0.968:1$   
 Num. Data Pts:  $48$  (Tests 449 to 496)  
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

## Anexo 9. Análisis concentración de radón - Iglesia San Francisco Habitación Reservas 2



*Avg. Radon In Air:  $165 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$*

*Selection Slope:  $-4.82 (\text{Bq/m}^3)/\text{Hr.}$*

*Avg. Air Temp:  $17.4^\circ\text{C}$*

*Avg. RH: 4.13%*

*Avg. Leakage Current: 0.00*

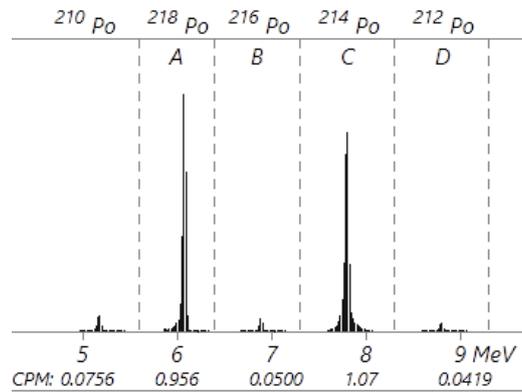
*Avg. Pump Current: 60 mA*

*Avg. C/A Count Ratio: 1.03:1*

*Num. Data Pts: 48 (Tests 641 to 688)*

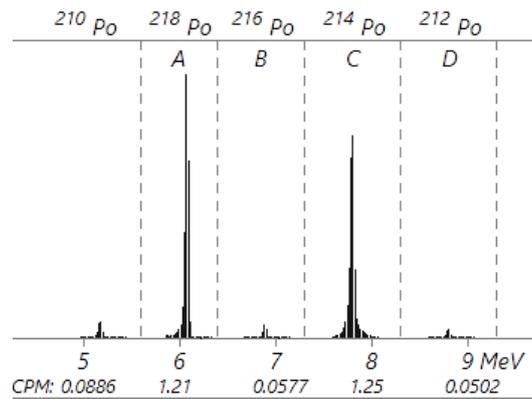
*Time Duration: 23 Hrs., 30 Min.*

## Anexo 10. Análisis concentración de radón - Iglesia San Francisco Bóveda 2



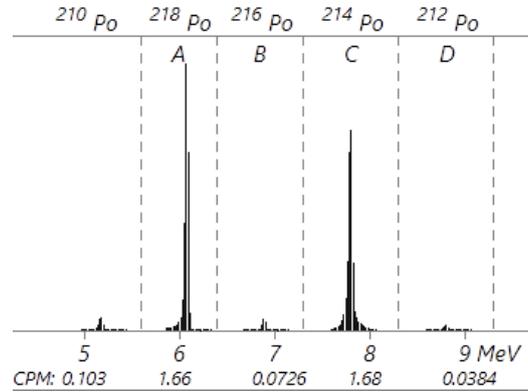
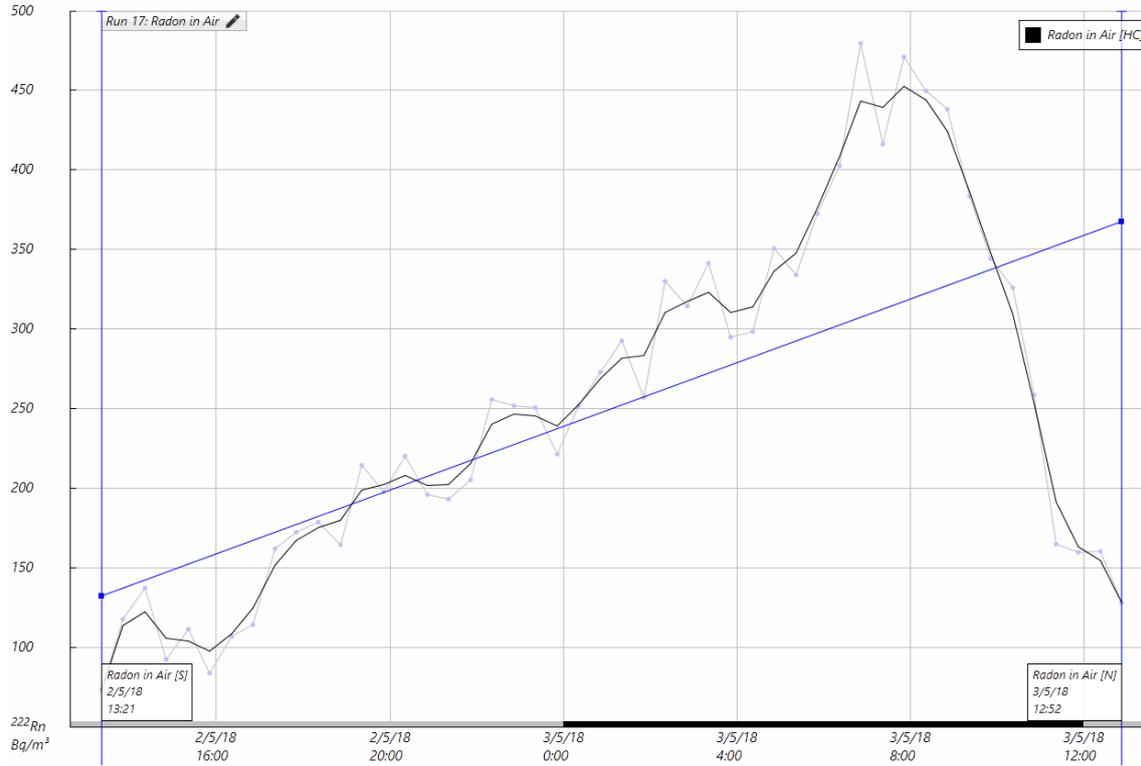
Avg. Radon In Air:  $146 \pm 6 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $-4.63 (\text{Bq/m}^3)/\text{Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $17.1^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $4.13\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $60 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.12:1$   
 Num. Data Pts:  $48$  (Tests 497 to 544)  
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

## Anexo 11. Análisis concentración de radón - Iglesia San Francisco Bóveda 3



Avg. Radon In Air:  $185 \pm 7 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $-7.54 (\text{Bq/m}^3)/\text{Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $17.1^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $4.00\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $60 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.03:1$   
 Num. Data Pts:  $48$  (Tests 545 to 592)  
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 30 \text{ Min.}$

## Anexo 12. Análisis concentración de radón - Iglesia San Francisco Bóveda 4



Avg. Radon In Air:  $250 \pm 8 \text{ Bq/m}^3$   
 Selection Slope:  $+10.0 \text{ (Bq/m}^3\text{)}/\text{Hr.}$   
 Avg. Air Temp:  $17.3^\circ\text{C}$   
 Avg. RH:  $5.21\%$   
 Avg. Leakage Current:  $0.00$   
 Avg. Pump Current:  $56 \text{ mA}$   
 Avg. C/A Count Ratio:  $1.01:1$   
 Num. Data Pts:  $48 \text{ (Tests 593 to 640)}$   
 Time Duration:  $23 \text{ Hrs., } 31 \text{ Min.}$

Anexo 13. Manual Usuario RAD7



# DETECTOR DE RADÓN RAD7

## Manual del Usuario

Propietario \_\_\_\_\_

Serie # \_\_\_\_\_



### REGISTRO DE PRESTACIONES

Fecha	Prestación

Se recomienda enviar anualmente la unidad a DURRIDGE Company, para su recalibración.

DURRIDGE Company Inc.  
524 Boston Rd  
Billerica, MA 01821  
Tel: (978)-667-9556  
Fax: (978)-667-9557  
service@durrIDGE.com  
www.durrIDGE.com

Revisión 7.2.8. © 2014 DURRIDGE Company

**Anexo 14.** Protocolo usado para realizar las mediciones de radón.

**ANSI/AARST MALB 2014**



An American National Standard

# **Protocol for Conducting Measurements of Radon and Radon Decay Products in Schools and Large Buildings**

**AARST CONSORTIUM ON NATIONAL RADON STANDARDS**

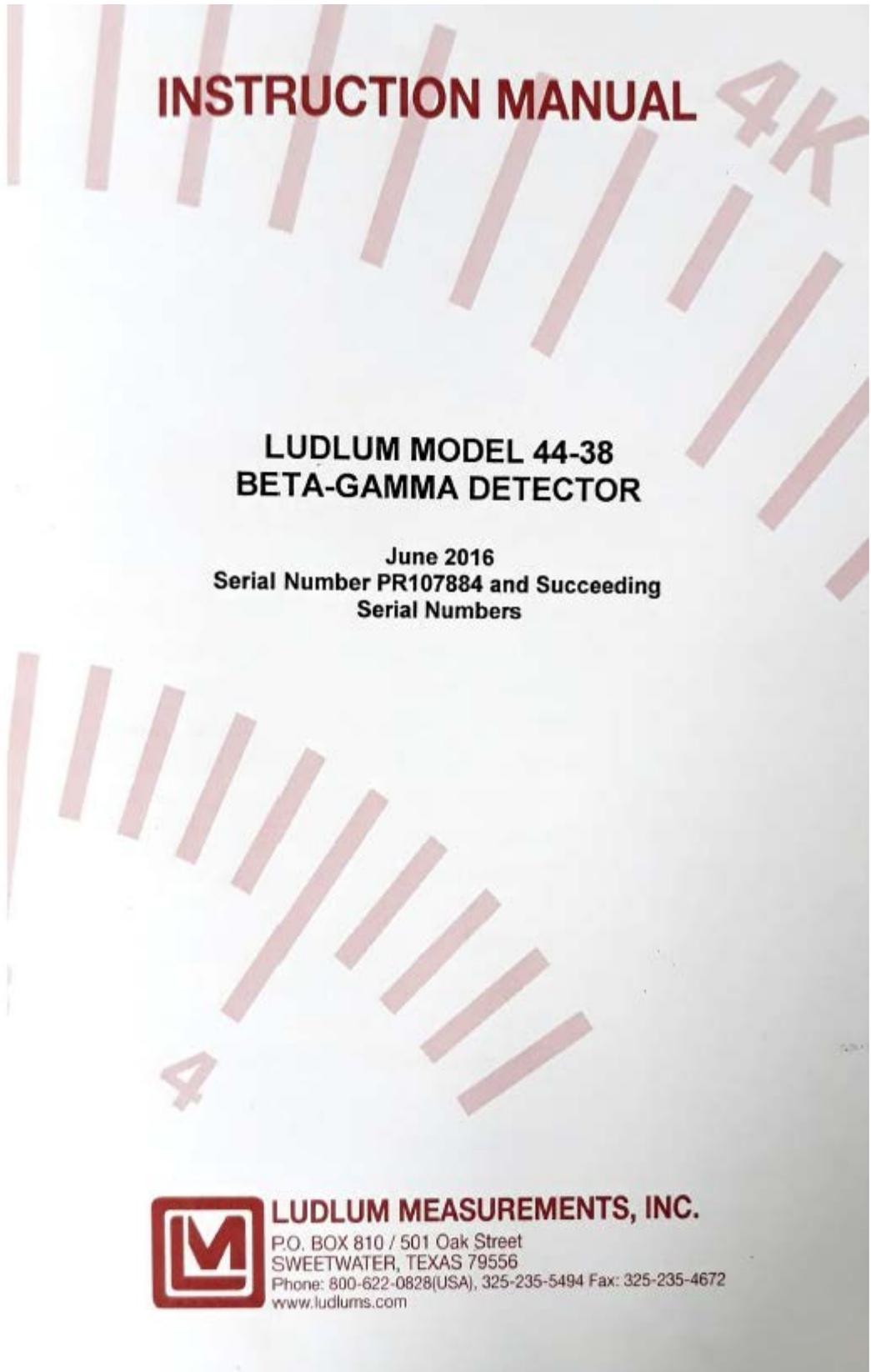
**[www.radonstandards.us](http://www.radonstandards.us)**

**[standards@aarst.org](mailto:standards@aarst.org)**

Copyright © 2015 AARST, P.O. Box 2109, Fletcher, NC 28732



**Anexo 15. Manual de instrucción detector LUDLUM modelo 44-38**



# **INSTRUCTION MANUAL**

## **LUDLUM MODEL 44-38 BETA-GAMMA DETECTOR**

**June 2016  
Serial Number PR107884 and Succeeding  
Serial Numbers**



**LUDLUM MEASUREMENTS, INC.**

P.O. BOX 810 / 501 Oak Street  
SWEETWATER, TEXAS 79556  
Phone: 800-622-0828(USA), 325-235-5494 Fax: 325-235-4672  
[www.ludlums.com](http://www.ludlums.com)

**Anexo 16.** Manual de instrucción detector LUDLUM modelo 3-97

# INSTRUCTION MANUAL

LUDLUM MODEL 3-97

SURVEY METER

April 2016

Serial No. 243808 and Succeeding  
Serial Numbers



**LUDLUM MEASUREMENTS, INC.**

P.O. BOX 810 / 501 Oak Street  
SWEETWATER, TEXAS 79556  
Phone: 800-622-0828(USA), 325-235-5494 Fax: 325-235-4672  
[www.ludlums.com](http://www.ludlums.com)

**Anexo 17. Habitación 3 Pinturas – Museo de la Catedral**



**Anexo 18. Habitación 3 Pinturas – Museo de la Catedral**



**Anexo 19.** Habitación 4 Sala de arte religioso – Museo de la Catedral



**Anexo 20.** Habitación 4 Sala de arte religioso – Museo de la Catedral



**Anexo 21.** Habitación 6 Sala de vestimenta – Museo de la Catedral



**Anexo 22.** Habitación 6 Sala de vestimenta – Museo de la Catedral



**Anexo 23.** Habitación de las reservas del museo.



**Anexo 24.** Habitación de las reservas del museo.



**Anexo 25.** Medición con el equipo LUDLUM modelo 3-97 / 44-38 - Museo de la Catedral.



**Anexo 26.** Entrada a las criptas – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 27.** Cripta 1 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 28.** Cripta 1 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 29.** Cripta 2 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 30.** Cripta 2 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 31.** Cripta 3 – Iglesia de la Catedral.



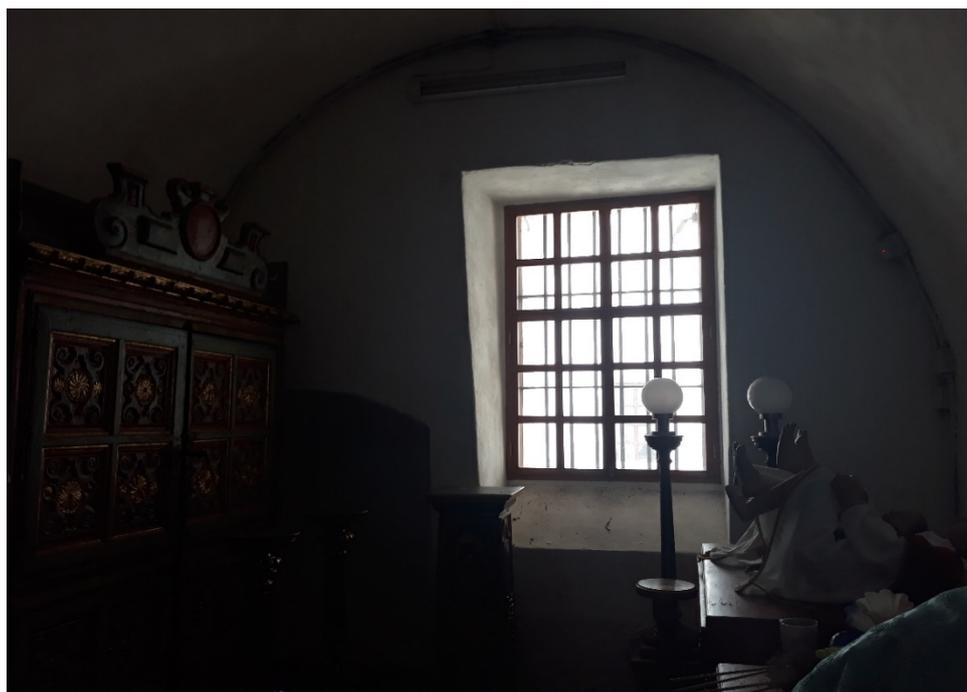
**Anexo 32.** Cripta 3 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 33.** Medición con el equipo LUDLUM modelo 3-97 / 44-38 – Iglesia de la Catedral.



**Anexo 34.** Habitación de Reservas 1 – Iglesia de San Francisco



**Anexo 35.** Habitación de Reservas 2 – Iglesia de San Francisco



**Anexo 36.** Bóveda 2 – Iglesia de San Francisco



**Anexo 37. Bóveda 3 – Iglesia de San Francisco**



**Anexo 38. Bóveda 4 – Iglesia de San Francisco**



**Anexo 39.** Medición con el equipo LUDLUM modelo 3-97 / 44-38 – Iglesia de San Francisco.



**Anexo 40.** Medición con el equipo AirFlow.



**Anexo 41.** Parámetros de distancia para el monitoreo.



**Anexo 42.** Parámetros de altura para el monitoreo.



