

---

Aplicación de técnicas de interpolación geoestadística para el estudio de la tasa de exposición de radiación gamma como parámetro precursor del riesgo de presencia de radón en los edificios del municipio de San Cristóbal de La Laguna.

---

**Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado**  
**Máster en Gestión e Innovación Tecnológica**  
**en la Construcción**  
**Trabajo Fin de Máster**

Autores:	Eduardo Trujillo Gómez
Tutor/a	Eduardo González Díaz
Co-tutor/a	Francisco Javier Jubera Pérez

Julio 2021



D. Eduardo González Díaz, con N.I.F. 43794354-P, profesor del área de Construcciones Arquitectónicas del Departamento de Técnicas y Proyectos en Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de La Laguna y D. Javier Jubera Pérez con N.I.F. 42082702-Q, jefe del servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias.

HACEN CONSTAR

Que la presente memoria titulada:

“Aplicación de técnicas de interpolación geoestadística para el estudio de la tasa de exposición de radiación gamma como parámetro precursor del riesgo de presencia de radón en los edificios del municipio de San Cristóbal de La Laguna.”

Ha sido realizada bajo su dirección por D. Eduardo Trujillo Gómez con N.I.F. 79063173-P.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente y a los efectos oportunos firman la presente en La Laguna a 30 de junio de 2021.



## **Agradecimientos**

A mi padre, por su insistencia para cursar este máster e incitarme a continuar con los estudios. A mi madre y hermana, por su apoyo y colaboración para que tuviera tiempo de dedicarme a superar los trabajos. A mi pareja, Aniria, por hacerme ver que habría una nueva puerta en mi vida.

A mi tutor Eduardo, que me prestó todo su apoyo, conocimiento y recursos. Que me despertó el interés y me motivó para que siguiera explorando las nuevas y viejas tecnologías. Así como a mi co-tutor Javier por confiar en mí para la realización de los trabajos y su orientación y a Claudio, quien me prestó sus conocimientos y tiempo para el desarrollo de este y otros trabajos.

Por último, a todos los profesores del Máster que se esforzaron en transmitirme su conocimiento y crear diálogos de reflexión e interés personal; así como a todos los compañeros que se embarcaron en este Máster que hicieron de él una experiencia inmejorable.

Muchas gracias a todos.

Eduardo Trujillo Gómez



## Resumen

La última modificación del Código Técnico de la Edificación incluye un capítulo nuevo sobre la protección frente al radón en viviendas. Este trabajo consiste en determinar la utilidad de la radiación gamma terrestre como método predictor de zonas de alto potencial de radón en el interior de las edificaciones. A través de los datos de radiación gamma obtenidos de manera experimental, se ha realizado un mapa mediante interpolación geoestadística que, junto con los datos de radón interior, ha servido para localizar zonas de riesgo de altas concentraciones de radón de la zona periférica del casco de La Laguna. Esto ha sido posible gracias a la metodología desarrollada para establecer un método de medición y los datos de radón indoor.

**Palabras clave:** Radiación gamma, radiación gamma terrestre, radón interior, edificaciones, mapa potencial de radón, predicción de radón, IRC, interpolación geoestadística, IDW.



## **Abstract**

The latest modification of the Código Técnico de la Edificación includes a new chapter on protection against radon in building's interiors. This work consists of determining the usefulness of a terrestrial gamma radiation as a predictor method for areas of high radon potential inside buildings. Using the gamma radiation data obtained experimentally, a geostatistical interpolation map has been made through which, together with the interior radon data, it has served to locate risk areas of high radon concentrations in the peripheral area of the old town of La Laguna. This has been possible thanks to the methodology developed to establish a measurement method and indoor radon data.

Keywords: gamma radiation, terrestrial gamma radiation, indoor radon, buildings, radon potential map, radon prediction, IRC, geostatistical interpolation, IDW.



# Índice

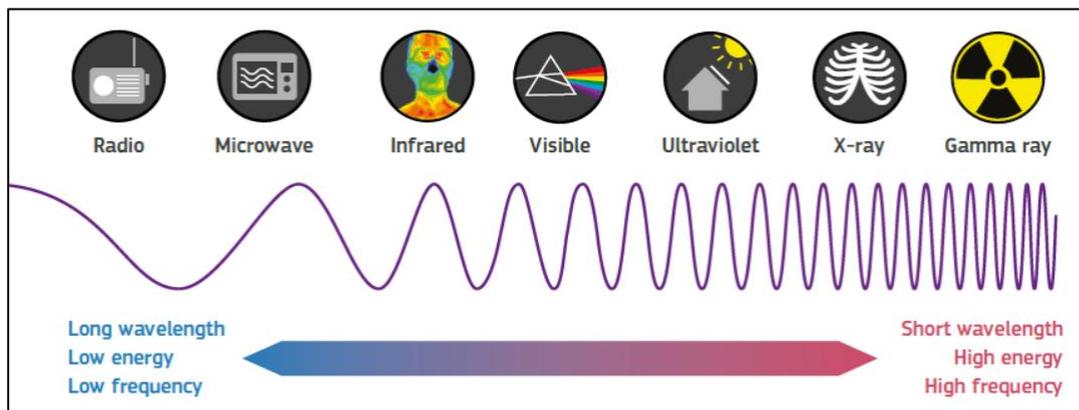
1.	Introducción .....	7
1.1	Fuentes de radiación .....	8
1.2	Efectos biológicos de la radiación ionizante.....	10
1.3	El radón .....	13
1.4	Antecedentes.....	13
1.5	Objetivo .....	15
1.6	Hipótesis.....	15
2.	Estado del arte .....	16
3.	Metodología.....	21
3.1	Instrumento de medición.....	21
3.2	Área de trabajo .....	21
3.3	Localización de puntos .....	22
3.4	Tratamiento de datos con SIG .....	26
3.5	Medidas de radiación gamma.....	26
3.6	Radiación gamma a partir de radioisótopos del suelo.....	27
3.7	Interpolación IDW .....	28
4.	Resultados.....	30
4.1	Comparación de valores gamma experimentales con los obtenidos de las correlaciones de radioisótopos.....	33
4.2	Discusión de resultados.....	35
5.	Conclusiones .....	38
6.	Líneas de trabajo Futuro.....	39
7.	Anexos .....	42
7.1	Procesos de QGIS.....	42
7.2	Valores obtenidos en la campaña de medición de radiación gamma.....	44





# 1. Introducción

La radiación ionizante (en lo sucesivo denominada radiación) es una radiación que transporta suficiente energía para liberar electrones de átomos o moléculas, ionizándolos. La radiación ionizante está formada por partículas subatómicas energéticas (partículas alfa, partículas beta y neutrones), iones o átomos que se mueven a altas velocidades (generalmente superiores al 1% de la velocidad de la luz) y ondas electromagnéticas en el extremo de alta energía del espectro electromagnético (Figura 1). La capacidad de los núcleos atómicos de convertirse espontáneamente (sin acción exterior) bajo la emisión de radiación ionizante se denomina radiactividad (European Commission, 2019).



**Figura 1.** Espectro electromagnético (European Commission, 2019)

La radiactividad es un fenómeno que se produce de manera espontánea en núcleos de átomos inestables emitiendo, mediante su desintegración en otro estable, gran cantidad de energía en forma de radiaciones ionizantes. El ritmo de emisión y el tipo y energía de las radiaciones emitidas son característicos de cada elemento radiactivo. Las radiaciones ionizantes generadas en la desintegración radiactivas pueden ser de tres tipos:

- Alfa, es un flujo de partículas positivas constituido por dos protones y dos neutrones.
- Beta, es un flujo de electrones producido por la desintegración de neutrones en los núcleos radiactivos.
- Gamma, es un flujo de ondas electromagnéticas de alta energía si proviene de la reestructuración del núcleo o de mucha energía si proviene de la reestructuración de capas profundas del átomo (rayos X).



La penetración de la radiación alfa en la materia es muy baja, pudiendo ser detenida por una simple hoja de papel. La radiación beta es más penetrante, necesitándose unos milímetros de espesor de aluminio o metacrilato. Por el contrario, la radiación gamma es muy penetrante por lo que se hacen necesarios espesores importantes de plomo u hormigón para absorberla (SPRL-ULPGC, 2021).

La radiación gamma son ondas electromagnéticas o fotones de la misma naturaleza que la luz visible pero mucho más energética que esta. Es por ello que tiene un poder penetrante de hasta unos 200 metros de aire o de unos 40 cm de suelo. Concretamente, el 90% de la radiación gamma que, originada en el suelo, interacciona con los seres vivos, procede de los primeros 25 cm del mismo.

Los rayos gamma son emitidos por los materiales radiactivos naturales que se encuentran de manera natural en el suelo. Por este motivo, los materiales utilizados en la construcción también emiten radiación gamma a la que todos estamos expuestos (Consejo de Seguridad Nuclear, 2010). La distinta procedencia de los materiales puede influir en una tasa de radiación no correspondiente con la ubicación del edificio. Por tanto, para determinar la tasa de radiación gamma de un lugar, los ensayos deben ser realizados alejados de las posibles fuentes emisoras que desvirtúen los resultados. Las mediciones se deben realizar en terrenos en estado natural lo más alejado posible de materiales artificiales transformados por el ser humano.

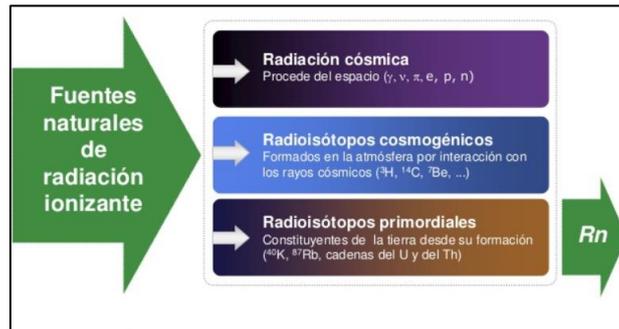
## **1.1 Fuentes de radiación**

En la vida diaria, estamos expuestos a diversas fuentes de radiación que provienen de fuentes de radiación natural, aplicaciones médicas, secuelas de ensayos de armas nucleares, entre otras. La exposición a niveles elevados de radiación ionizante puede ser perjudicial para la salud humana. De hecho, la radiación puede ionizar o excitar átomos mientras atraviesa el tejido y, en gran medida, esta exposición es inevitable. Algunas fuentes de radiación natural se ven afectadas por la actividad humana, en cuyo caso es posible controlar la cantidad de radiactividad liberada. Las medidas correctivas durante la construcción de nuevos edificios o las medidas correctivas tomadas para reducir la exposición de la población son ejemplos de posible control de las fuentes de radiación natural (European Commission, 2019).

La radiación ionizante natural puede ser cósmica, proveniente del espacio y dependerá de la altitud y localización o de radionucleidos naturales cuando provienen de la corteza



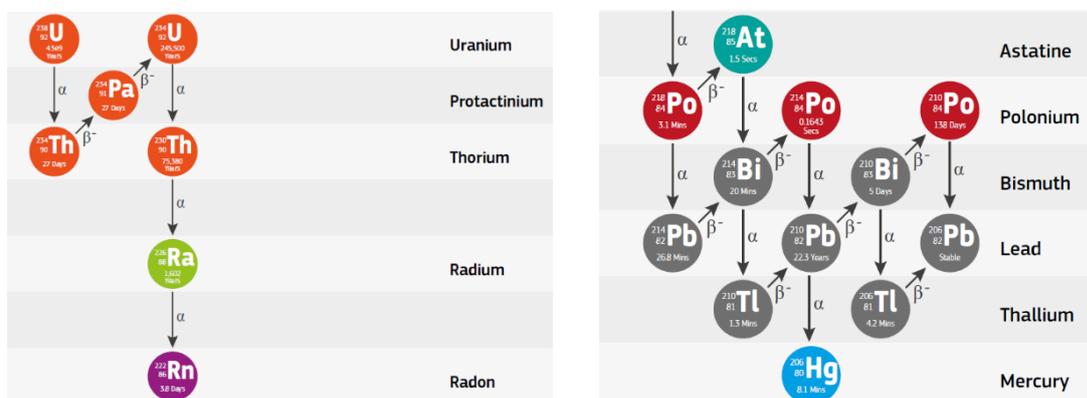
terrestre. Estos radionucleidos se clasifican en cosmogénicos cuando se originan por interacción de la radiación cósmica con los elementos presentes en el aire, agua o capas superficiales del suelo, primordiales, si existen anteriormente a la creación del sistema solar, o secundarios, si son fruto de una interacción de la radiación con la materia (Figura 2).



**Figura 2.** Fuentes naturales de radiación ionizante (García Rubiano, 2019)

Algunos radionucleidos son inestables y se transforman en átomos de otros elementos y en esta transformación los átomos emiten radiaciones ionizantes. Esta propiedad se llama radiactividad y la transformación que sufren los átomos se denomina desintegración. Los radionucleidos primordiales terrestres más importantes son el uranio ( $^{238}\text{U}$ ), el torio ( $^{232}\text{Th}$ ) y el potasio ( $^{40}\text{K}$ ).

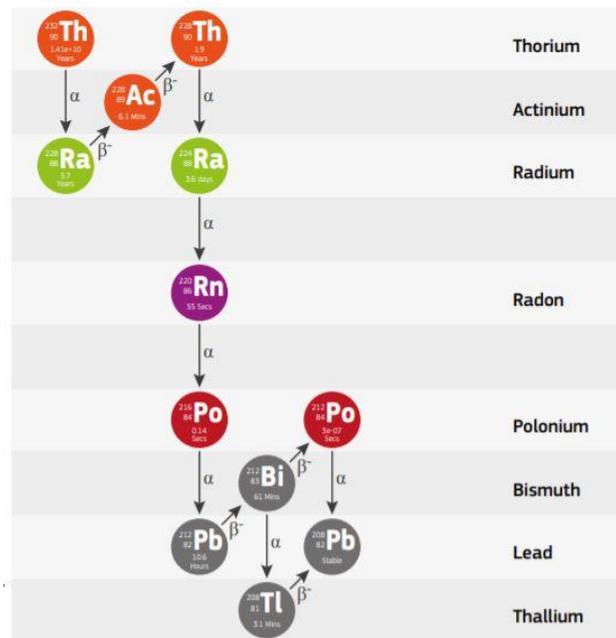
El uranio (número atómico 92) tiene dos radionúclidos primordiales, naturales y de larga duración: el más abundante  $^{238}\text{U}$  (vida media de  $4,5 \times 10^9$  años, 99,274% de la masa total de U) (Figura 3) y el menos abundante  $^{235}\text{U}$  (vida media de  $7,0 \times 10^8$  años, 0,72% de la masa total de U). Ambos decaen por separado a través de series de decaimiento radiactivo largas y complejas que terminan con plomo estable  $^{206}\text{Pb}$  y  $^{207}\text{Pb}$  respectivamente.



**Figura 3.** Serie radiactiva natural del  $^{238}\text{U}$  (European Commission, 2019)



El torio (número atómico 90) tiene un solo radionúclido primordial natural de larga duración, el  $^{232}\text{Th}$  (que tiene la media de vida más larga de todos los isótopos radiactivos de Th,  $1,41 \times 10^{10}$  años, 99,98% de la masa). La larga cadena de desintegración del torio (figura 4) termina con el isótopo estable de  $^{208}\text{Pb}$ .

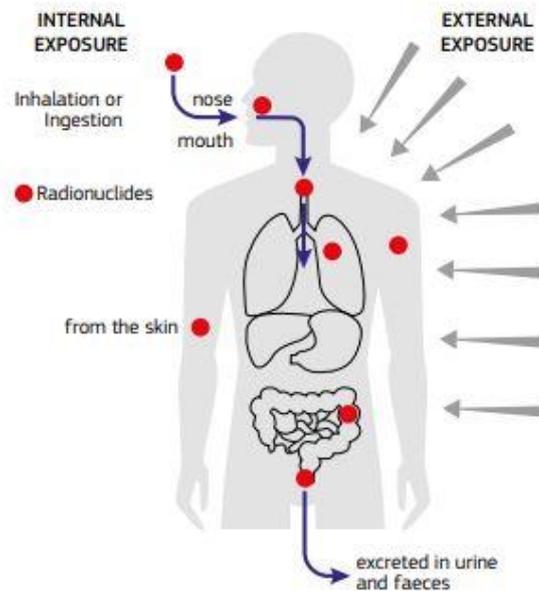


**Figura 4.** Serie radiactiva natural del  $^{232}\text{Th}$  (European Commission, 2019)

El potasio es un metal alcalino (número atómico 19) con 3 isótopos naturales, dos estables ( $^{39}\text{K}$ , 93,3%) y ( $^{41}\text{K}$ , 6,73%) y el radiactivo de larga duración ( $^{40}\text{K}$ , 0,0117%) que se desintegra en  $^{40}\text{Ca}$  o  $^{40}\text{Ar}$  al emitir un rayo gamma de energía 1,46 MeV.

## 1.2 Efectos biológicos de la radiación ionizante

La radiación puede provenir desde una fuente externa del cuerpo que solo causa la dosis en el momento de irradiación o también desde el interior a través de la ingesta o inhalación, en cuyo caso los radionúclidos pueden permanecer irradiando los tejidos durante años. En este caso, la dosis total de radiación dependerá de la vida media del radionúclido, su localización en el interior del cuerpo y la velocidad a la que se elimina del organismo (Figura 5).



**Figura 5.** Representación esquemática de la exposición a la radiación ionizante. Fuente: European Atlas of Natural Radiation.

Inicialmente, la “dosis de radiación”, que se medía en Roentgen (R), era la unidad para medir el efecto de la radiación ionizante, especialmente los efectos biológicos. Posteriormente, se determinó que sólo podía definir con exactitud los fotones, es decir, rayos X y gamma que interaccionen con el aire, por lo que más adelante se adoptó otra unidad capaz de cuantificar la energía depositada sobre cualquier medio, la dosis absorbida, cuya unidad es el Gray (Gy).

**Actividad radiactiva:** se mide en Becquerelios (Bq) y equivale a una desintegración nuclear por segundo. Esta unidad deriva del Sistema Internacional y mide la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva.

**Dosis absorbida:** se mide en Gray (Gy) que equivale a J/Kg y relaciona la cantidad de energía depositada por unidad de masa. Mide el daño biológico producido por radiación ionizante.

**Dosis equivalente:** representa la dosis de radiación para los tejidos vivos y establece la relación entre la dosis absorbida y sus efectos biológicos; y su unidad es el Sievert (Sv) en honor al médico y físico Rolf M. Sievert. (1 Sv = 100 rem).

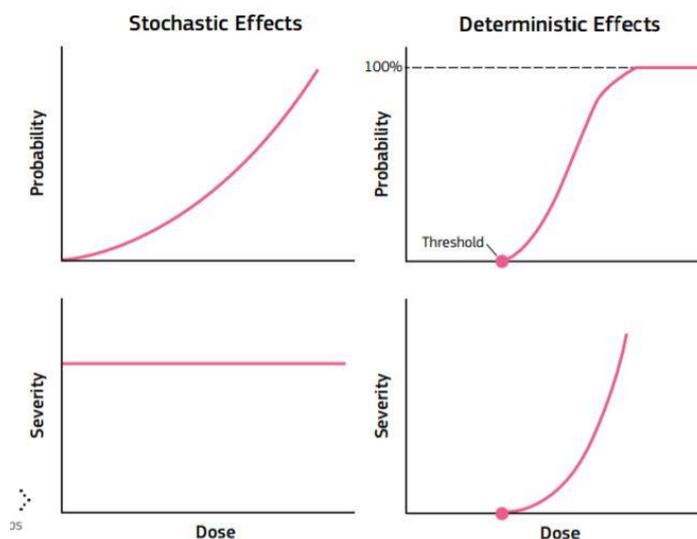


Magnitud	Proceso físico medido	Unidades S.I.
Actividad	Desintegración nuclear	Becquerel (Bq)
Dosis absorbida	Energía depositada	Gray (Gy)
Dosis equivalente	Efecto Biológico	Sievert (Sv)

Se diferencian 2 tipos de efectos los que pueden afectar a la vida de las personas: los efectos deterministas y los estocásticos.

Los **efectos deterministas** se caracterizan por un umbral que, debajo de él, no existe daño reconocido y por encima, el daño aumenta con la dosis. Son el síndrome de radiación aguda y los daños. Los síntomas inmediatos que aparecen después de una irradiación del cuerpo pueden ser reconocidos por encima de una dosis de 0,5 y 1 Gy. Para dosis de entre 2 y 6 Gy, la mortalidad está entre 5-95% sin tratamiento y 5-50% con tratamiento. Si se supera los 10Gy la mortalidad sería del 100%.

Los **efectos estocásticos** son eventos fortuitos, aumentando las probabilidades de efectos con la dosis, aunque la gravedad de los efectos es independiente de la dosis recibida. Se supone que los efectos estocásticos no tienen umbral. Sin embargo, aún no se sabe cómo es la curva para pequeñas dosis (<0,1 Sv). La suposición más prevalente es lineal y sin umbral (Figura 6).



**Figura 6.** Representación gráfica de los efectos a la exposición de radiación ionizante. Fuente: European Atlas of Natural Radiation.



### 1.3 El radón

Es uno de los descendientes del uranio y el torio, cuya progenie (sólida) puede adherirse a las partículas de aerosol, ser inhalados por el ser humano y continuar su proceso de desintegración en el interior de los pulmones. El radón, que tiene una vida de 3,8 días, se disuelve al emerger del suelo y entrar en contacto con la atmósfera terrestre, sin embargo, cuando se encuentra en un habitáculo cerrado en altas concentraciones es cuando representa un verdadero peligro para los seres vivos.

### 1.4 Antecedentes

La última modificación del Código Técnico de la Edificación incluye un capítulo nuevo dentro del Documento Básico de Salubridad, DB-HS, (Ministerio de Fomento, 2019) dedicado a la protección contra la exposición de gas radón en el interior de las edificaciones. El apéndice B de este capítulo categoriza los municipios según la probabilidad de que los edificios presenten concentraciones de radón por encima del nivel de referencia, fijado en 300 Bq/m<sup>3</sup>. Para Canarias sólo se recogen los municipios de las islas de Tenerife y Gran Canaria, clasificando 29/31 y 21/21 de sus municipios respectivamente como zona 2, siendo esta la más desfavorable.

El catalogar todos estos municipios como zona 2 supone que todas las edificaciones de obra nueva, rehabilitaciones y cambios de uso hayan de incluir una barrera de protección al radón y un espacio de contención ventilado o despresurización del terreno (figura 7). Este hecho supone un incremento del coste de construcción, un conocimiento específico por parte del proyectista y una especialización y buena ejecución por parte del instalador.

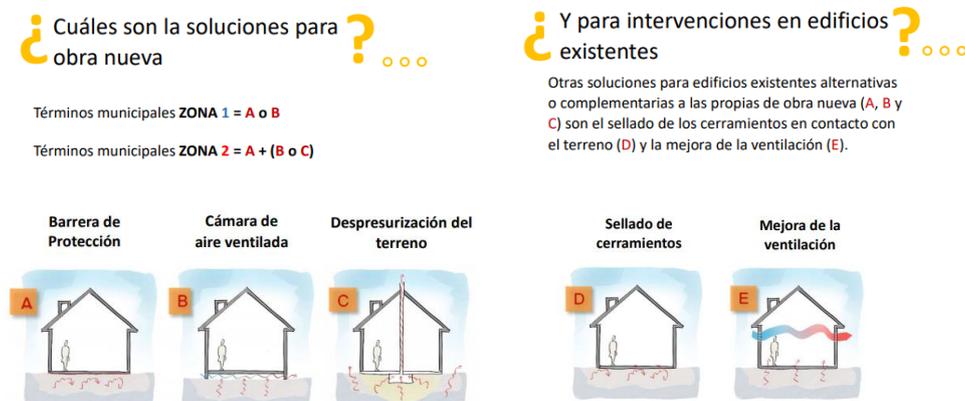
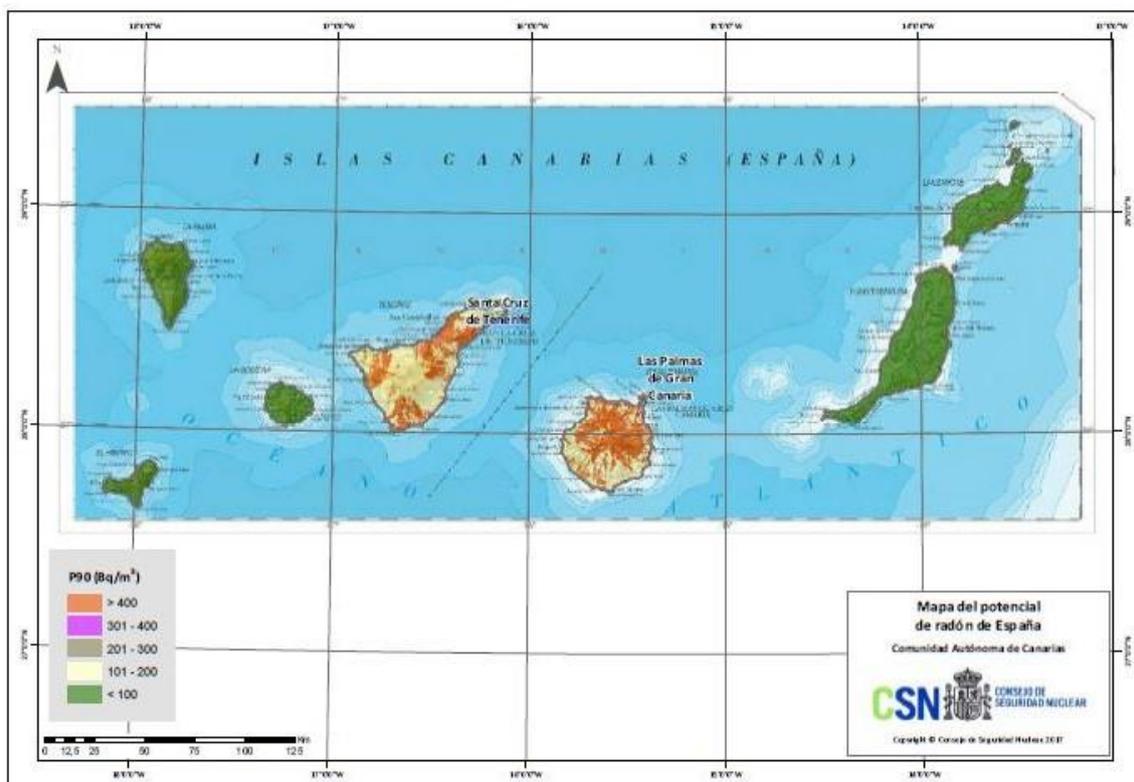


Figura 7. Tomado de <https://www.codigotecnico.org/Guias/GuiaRadon.html>



Sin embargo, los datos recogidos por (Barrera, 2019), demuestran que la concentración de radón en numerosas edificaciones está muy por debajo del nivel de referencia.

Por otra parte, el Consejo de Seguridad Nuclear ha elaborado un Mapa de Exposición al Radón del territorio nacional (Miguel & Acevedo, 2019). Este mapa, dividido por Comunidades Autónomas, se realizó estableciendo una correlación entre la radiación gamma terrestre y la concentración de radón en el interior de las viviendas para la península y las islas Baleares. Sin embargo, el mapa de Canarias (Figura 8) se elaboró en base a los datos de radón por disponerse de una mayor densidad en comparación con los de la península y se acudió directamente a la clasificación por litoestratigrafía. Al no realizar el análisis de radiación gamma, se desconoce la relación entre los niveles de radiación y la tasa de exposición al radón, dando como resultado un mapa, en el caso de la isla de Tenerife y Gran Canaria, que representa las zonas de potencial de radón en base a las características del suelo.



**Figura 8.** Mapa del potencial de radón de las Islas Canarias. Fuente. Cartografía del potencial de radón en España. Consejo de Seguridad Nuclear.



El mapa resultante publicado por el CSN diferencia en las 2 islas capitalinas 2 categorías de suelo: una entre los 101-200 Bq/m<sup>3</sup> y otra por encima de 400 Bq/m<sup>3</sup>.

## 1.5 Objetivo

El objetivo principal de este trabajo es determinar la relación de la tasa de radiación gamma terrestre (TGR) con los datos de radón interior recogidos en (Barrera, 2019) en el área de La Laguna y elaborar mediante técnicas de interpolación geoestadística un mapa de potencial de radón interior de las edificaciones que se asientan sobre el área de estudio.

Por tanto, los objetivos se desglosan en 3 apartados claramente diferenciados:

- Caracterizar mediante medidas de radiación gamma el área periférica del casco de San Cristóbal de La Laguna.
- Estimar valores de TGR mediante el empleo de técnicas geoestadísticas de interpolación de datos.
- Investigar la utilidad de la radiación gamma como variable predictora del potencial de concentración de radón en interiores de vivienda.

## 1.6 Hipótesis

Las tasas de radiación gamma obtenidas de manera directa en el área de estudio conformarán una malla de puntos con determinados valores que caracterizarán el terreno. Las áreas con mayor tasa de radiación gamma identificarán zonas de mayor contenido en uranio y por tanto será más probable que tengan mayores concentraciones de radón.

A partir de los datos de radón interior obtenidos de (Barrera, 2019) realizados en el área de estudio de este trabajo se busca determinar la correlación entre la radiación gamma terrestre (TGR) y la concentración de gas radón en el interior de las viviendas de la zona de estudio, por lo que, de hallarse esa correlación, sería posible predecir el potencial de radón de una ubicación a través de la medición de radiación gamma terrestre en su entorno próximo.

En base a todo ello, se plantea como hipótesis general de este trabajo la siguiente: «La radiación gamma es un indicador apropiado para establecer zonas de actuación prioritaria en las que el potencial de radón sea superior a 300 Bq/m<sup>3</sup>».



## 2. Estado del arte

La directiva 2013/59/EURATOM del Consejo de 5 de diciembre de 2013 (EURATOM, 2014), por la que se establecen normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes, obliga a los países de la unión europea a mapear su territorio obteniendo medidas y mapas de radón para legislar en base a concentraciones locales y ser transcritas a las leyes nacionales antes de febrero de 2018.

A partir de esta directiva nace la modificación del Código Técnico de la Edificación en el año 2019 donde se introduce en su Documento Básico de Salubridad (Ministerio de Fomento, 2019) un nuevo capítulo dedicado a la protección contra la exposición de gas radón en el interior de las edificaciones que establece a nivel legislativo una concentración máxima de 300 Bq/m<sup>3</sup> (nivel de referencia) en estancias habitables.

El apéndice B hace una clasificación dependiendo del municipio en el que se encuentre la ubicación del edificio, que podrá ser zona 1 (potencial medio de radón) o zona 2 (alto potencial de radón) basándose en la tasa de exposición gamma. Esta clasificación se realiza en base a las medidas realizadas por el Consejo de Seguridad Nuclear determinando los municipios con mayor probabilidad de contener concentraciones de radón en el interior de los edificios construidos sin ningún tipo de protección.

La Cartografía del Potencial de Radón en España (Miguel & Acevedo, 2019) establece “zonas de actuación prioritaria” o “zonas propensas al radón” para intervenir con mayor urgencia y recursos. Los métodos para determinar estas áreas se dividen en 3 categorías:

- **Directos:** mediciones de concentración de radón en viviendas.
- **Indirectos:** basados en variables correlacionados con el radón, como, por ejemplo, la radiación gamma.
- **Híbridos:** combina ambos métodos.

En función de estos criterios, el CSN ha desarrollado el Mapa Predictivo de Exposición al Radón (García-Talavera San Miguel et al., 2013) basado en un método híbrido donde se combinan los datos de radón interior en viviendas y la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de que establece 3 zonas de riesgo que van de 0 a 2: zonas sin riesgo (0), zonas de riesgo medio (1) y zonas de alto riesgo (2).



El mapa Marna (Suárez-Mahou et al., 2000) cataloga la superficie del territorio nacional a través de datos de radiación gamma terrestre medidos a 1 metro de altura del terreno (Figura 9). Sin embargo, las primeras fases de MARNA no cubrieron todo el territorio peninsular y fue solo a partir de 2008 cuando se inició un estudio de los territorios extra peninsulares: Canarias y Baleares, así como las ciudades de Ceuta y Melilla.

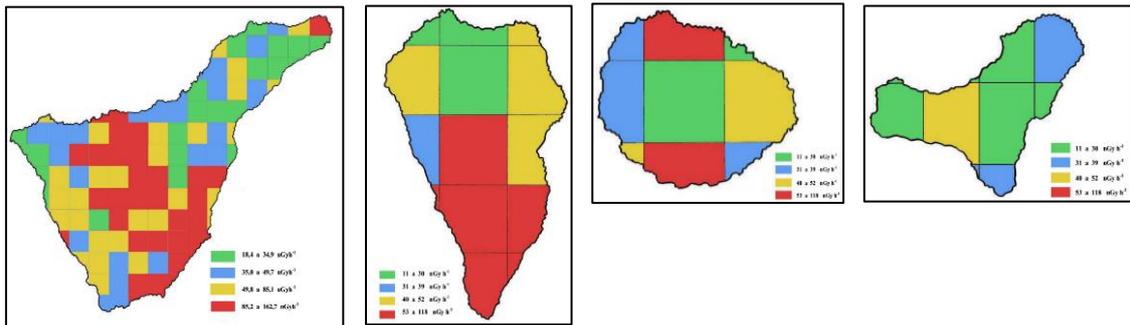


**Figura 9.** Mapa de radiación gamma natural en España (MARNA). Consejo de Seguridad Nuclear, 2001.

Canarias tiene una geología singular en relación con el resto del territorio español debido a su origen volcánico. La determinación de la concentración radio isotópica en suelos y rocas volcánicas de Canarias, así como las medidas de radiactividad ambiental, contribuyen a un mejor conocimiento de las fuentes de sus magmas, y su relación con el riesgo de exposición al radón interior y exterior, (Quindós Poncela et al., 2004)(García-Talavera et al., 2013). Las medidas de radiactividad ambiental realizadas en las Islas Canarias Orientales como parte del proyecto MARNA fueron realizadas por (Arnedo et al., 2017) con un total de 613 medidas de radiación gamma sobre una superficie de 4095 km<sup>2</sup> correspondientes a las islas de Gran Canaria, Fuerteventura, Lanzarote y La Graciosa (ver Tabla 1).



Por otra parte, para las Islas Occidentales existen referencias de medidas llevadas a cabo por (Fernández de Aldecoa, 2000) con un total de 132 valores (Figura 10) sobre una superficie de 3380 km<sup>2</sup> correspondientes a las islas de Tenerife, La Palma, Gomera y El Hierro.



**Figura 10.** Mapa radiométrico de la tasa de dosis absorbida en aire, debida a radiación gamma ambiental terrestre en las Islas Canarias occidentales (Fernández-Aldecoa, 2000)

La Tabla 1 muestra la superficie de cada una de las islas Canarias (ISTAC. Insituto Canario de Estadística, 2020) junto con un resumen del número de medidas de radiación gamma realizadas por diferentes autores.

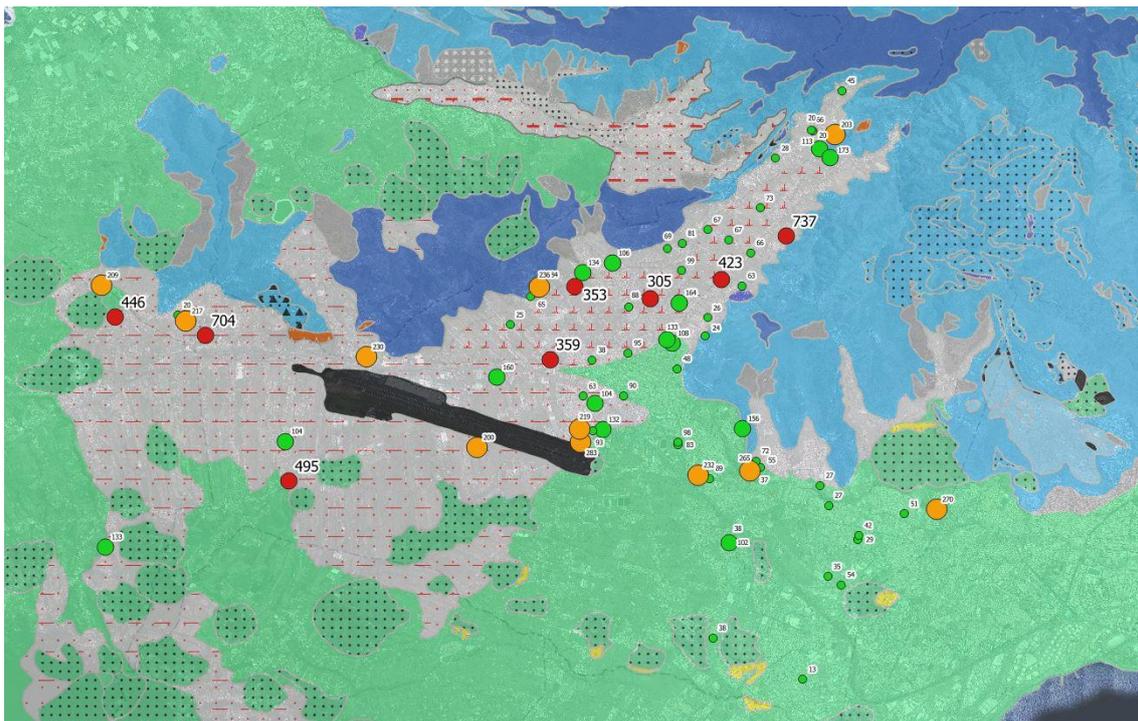
**Tabla 1.** Numero de medidas de radiación gamma realizadas por diferentes autores en las islas Canarias.

Demarcación	Superficie (km <sup>2</sup> )	Nº valores radiación gamma	Referencia
<b>Islas Occidentales</b>	<b>3.381,17</b>	<b>132</b>	(Fernández-Aldecoa, 2000)
Tenerife	2.034,38	103	
La Palma	708,32	13	
La Gomera	369,76	10	
El Hierro	268,71	6	
<b>Islas Orientales</b>	<b>4.094,83</b>	<b>613</b>	(Arnedo et al., 2017)
Gran Canaria	1.560,10	320	
Fuerteventura	1.659,74	167	
Lanzarote	845,94	119	
La Graciosa	29,05	7	



Cabe resaltar que la presencia de una tasa elevada de radiación gamma no está necesariamente vinculada a la presencia de radón, razón por la que se considera este método como un **indicador cualitativo** para localizar zonas con potencial de radón para después determinar con estudios más profundos el grado de presencia de radón (Quindós et al., 2008).

En la actualidad, se disponen de datos reales de concentración de gas radón interior (IRC) de las ciudad de La Laguna, (Tenerife), publicadas por (Briones et al., 2021). Estos valores se representan en la Figura 11 para la zona objeto de estudio en este TFM. Los datos se obtuvieron a través de detectores RSKS alojados en el interior de diversos inmuebles y tipologías. Estos detectores son cilindros plásticos con una cámara permeable al aire que contiene una lámina detectora de partículas alfa (Figura 12).



**Figura 11.** Localización de los valores de radón interior en viviendas de San Cristóbal de La Laguna (Barrera, 2019).



**Figura 12.** Muestras de un detector RSKS. Fuente: (Manual de Uso Radosys, 2013).



### 3. Metodología

#### 3.1 Instrumento de medición

El instrumento empleado para la toma de valores de radiación gamma es el radiómetro Ludlum Model 3019 Digital microR Survey Meter. Este instrumento contiene un detector con sensibilidad de 175 cpm por microR/h que mide la radiación gamma de fondo hasta un nivel máximo de 50 microR/h.



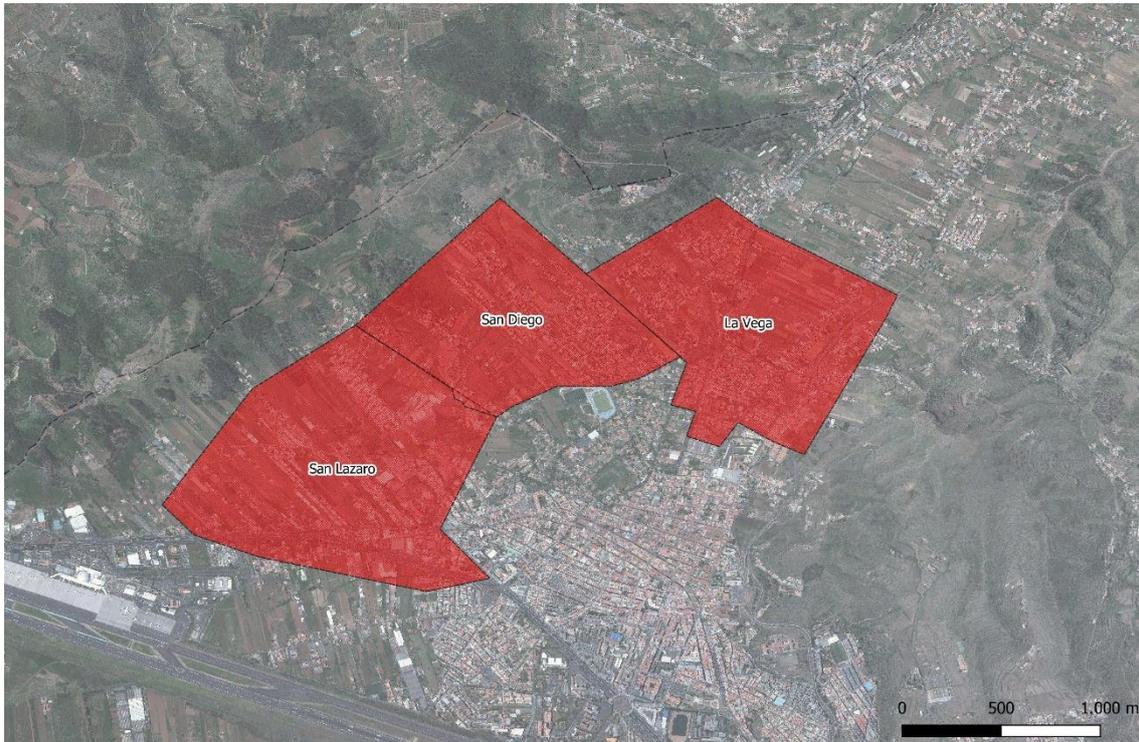
Figura 13. Radiómetro Ludlum 3019.

#### 3.2 Área de trabajo

La extensión geográfica de este trabajo responde a 2 factores principalmente: la ubicación de las mediciones de radón interior disponibles y la presencia de terreno con escasa alteración por parte del hombre.

Estos factores excluyen el casco de la ciudad por su alto porcentaje de suelo edificado, que es prácticamente su totalidad, delimitando el área de trabajo a la bolsa de suelo que lo rodea por el lado norte y oeste; y en cuyo interior se encuentran los sectores de San Lázaro, San Diego y La Vega (Figura 14).

Además, estas zonas se caracterizan por albergar en su interior viviendas unifamiliares de 1 o 2 alturas, lo que las convierte en zonas ideales para el estudio.



**Figura 14.** Área de trabajo. Fuente. Elaboración propia.

### **3.3 Localización de puntos**

El sistema empleado se ha basado en las localizaciones geográficas de las mediciones de radón interior publicadas en (Barrera, 2019). Mediante un programa de información geográfica se han localizado los puntos sobre un mapa y se procede a buscar terrenos que cumplan las condiciones de entorno sobre el que medir; normalmente se buscan terrenos sin alteraciones de origen antrópico.

La selección de los puntos se ha llevado a cabo siguiendo los siguientes criterios:

- Las localizaciones deben estar repartidas lo más homogéneamente posible en el interior del área de trabajo.
- Las localizaciones deben encontrarse en terrenos que no hayan sufrido transformaciones ni alteraciones antrópicas, es decir, terreno en estado natural.
- En la medida de lo posible, estas localizaciones deben estar próximas a las localizaciones donde se tiene información de IRC con la condición de que no haya elementos o edificaciones cercanas que puedan afectar o desviar la lectura de las mediciones.
- Que sean lugares de medición sean accesibles.



Una vez localizados los puntos se le ha asignado un ID cuya nomenclatura viene definida por el código del sector y un número según su localización en el mapa siguiendo un orden de izquierda a derecha y de arriba abajo. Así, por ejemplo, (Figura 15) en la referencia: SL01, “SL” es el sector de San Lázaro y “01” indica el orden en el mapa.



**Figura 15.** Ejemplo de distribución de los puntos dentro del área de trabajo.

### **3.3.1 Condiciones climatológicas**

Las mediciones no se podrán llevar a cabo en días con lluvia ni en los 7 días siguientes del día en el que haya cesado la lluvia, de modo que el terreno haya recobrado unas condiciones normales de humedad.

### **3.3.2 Condiciones del entorno:**

- Evitar zonas boscosas con denso arbolado.
- Evitar mediciones cerca de embalses de agua o charcos.
- Medir en suelos preferiblemente llanos, evitando laderas próximas o fondos de barranco.
- En zonas no urbanas que así lo permitan:



- Alejarse un mínimo de 15 m de cualquier edificio.
- Alejarse un mínimo de 10 m de muros o zonas pavimentadas o asfaltadas.
- En zonas urbanas:
  - En los solares que se vayan a medir, colocarse lo más centrado posible y alejado de cualquier muro, fachada, zona pavimentada o asfaltada, y/o rellenos con material ajeno al terreno del solar.
  - Debe anotarse en el estadillo los elementos constructivos del entorno y la distancia aproximada.
- Evaluar la alteración del terreno: serán preferentes terrenos nada o pocos modificados, evitando rellenos constructivos o de cultivos. En caso de que el terreno disponga de cierta alteración, debe anotarse en el estadillo.

### **3.3.3 Método de caracterización radiométrica de un punto:**

- La medición se realiza mediante radiómetro LUDLUM Model 3019, disponiendo la sonda detectora a 1 m del suelo.
- Primera lectura:
  - Posición que cumpla las condiciones del entorno.
  - Anotar coordenadas UTM, fecha y hora.
  - Tiempo total de medición: 5 min.
  - Dejar 1 min para estabilización del aparato.
  - Anotar 5 lecturas espaciadas 1 min cada una:
    - Minuto 1:00 – 1ª anotación
    - Minuto 2:00 – 2ª anotación
    - Minuto 3:00 – 3ª anotación
    - Minuto 4:00 – 4ª anotación
    - Minuto 5:00 – 5ª anotación
  - Realizar media y desviación de la medida
- Segunda lectura:
  - Desplazarse aproximadamente 5 – 10 m de la primera posición y que cumpla las condiciones de entorno. No escoger como segundo punto de lectura un terreno que sea visiblemente diferente al primero.
  - Repetir el proceso realizado en la primera lectura



- Si la diferencia entre las medias obtenidas entre la primera lectura y la segunda supera  $1 \mu\text{R/h}$  se procede a una tercera lectura
- Tercera lectura:
  - Desplazarse aproximadamente 5 – 10 m de la segunda posición e intentando conformar una figura aproximada de un triángulo equilátero con respecto a los dos primeros puntos y que cumpla las condiciones del entorno.
  - Repetir el proceso realizado en las dos primeras lecturas.
- Caracterización del punto
  - El punto se ubicará en el centro geométrico aproximado de las dos o tres lecturas realizadas, usando la media aritmética y desviación estándar de las lecturas.

### 3.3.4 Verificación de la localización a nivel de calle (Street View)

Tomando los criterios establecidos, se procede a la localización específica de los puntos de medición a través de plataformas de consulta remota que ofrecen panorámicas aéreas y a nivel de calle (Street View). En este caso, se ha utilizado el visor de Grafcan por ser la plataforma específica del Gobierno de Canarias.

Las posibles ubicaciones de medición se buscan mediante vista aérea. Seguidamente, se inicia el visor Street View para detectar la situación del terreno. Durante este trabajo se han desechado casi el 40% de las localizaciones inicialmente seleccionadas, bien porque resultan ser extensiones de cultivo, bien porque se trata de recintos privados y vallados, o bien porque se encuentran edificadas. Este elevado número de descartes se debe a la distinta interpretación del terreno visto desde fotograma aéreo y visto a pie de calle (Figura 16).



**Figura 16.** Ejemplo de localización inicialmente seleccionada desde la ortofoto y posteriormente descartada al visualizar el lugar mediante Street View.



### **3.4 Tratamiento de datos con SIG**

El Sistema de Información Geográfica que se va a utilizar para este trabajo es QGIS, un software libre de código abierto basado en el lenguaje de programación C++ y un complemento de desarrollo que permite programar acciones y a través de C++ o Python.

Este programa permite manejar tanto bases de datos como archivos ráster y vectoriales.

La información perteneciente a cada punto de medición se recoge en hojas de Excel que contendrán datos como el ID, las coordenadas UTM, la altura y el valor de radiación gamma ambiental. Dentro del programa, esta información se transforma en datos geoespaciales que localizan en el mapa la información sobre la radiación gamma medida, la altura y demás datos.

### **3.5 Medidas de radiación gamma**

La campaña de medición se realizó de febrero a mayo siguiendo el protocolo de actuación descrito en la metodología. Generalmente, con un área seleccionada, se giraba visita a la zona y se procedía a la toma de valores con el radiómetro montado sobre un trípode a un metro de altura sobre el terreno. Se obtenía la media de los valores arrojados durante los 5 minutos de cada muestra y a su vez se realizaba el promedio de las 2 mediciones a 5 metros de distancia, sólo si entre un punto y otro había una diferencia mayor a  $1 \mu\text{R/h}$  se procedía a realizar una tercera medición de forma que formara un triángulo y de ese modo hacer la media de los 3 puntos y suponer caracterizado ese punto.

Los valores obtenidos en cada medición con el radiómetro Ludlum 3019 se le conoce como el nivel de radiación gamma ambiental, el cual incluye las fuentes de radiación iónica proveniente del suelo, de los materiales que se encuentran a su alrededor y de la radiación cósmica.

Para este trabajo se ha considerado únicamente fuentes externas de radiación gamma que provienen de la presencia de radioisótopos en el suelo, materiales de construcción, agua y aire. En este sentido, el componente de radiación cósmica (fondo cósmico) se estimó utilizando la ecuación propuesta en el informe de Naciones Unidas de 1993 (Arnedo Ayensa, 2014).



$$\dot{R}(z) = 3.69[0,21e^{-1.65z} + 0.79e^{0.453z}] \quad (2)$$

donde  $\dot{R}(z)$  es la tasa de exposición debida al fondo cósmico para latitudes próximas a Canarias expresada en  $\mu\text{R/h}$  y  $z$  la altitud expresada en kilómetros.

Por lo tanto, para aislar la radiación proveniente del suelo, a los valores obtenidos en la campaña de medición se le descuenta el fondo cósmico y se considera nulo la radiación proveniente de materiales por aplicar estrictamente la metodología.

### 3.6 Radiación gamma a partir de radioisótopos del suelo

En cuanto a las correlaciones a emplear, diversos autores coinciden en la aplicación de combinaciones lineales de contribuciones debido a la concentración de los distintos radioisótopos presentes en el suelo, adoptando como forma general la siguiente expresión:

$$D = \sum_i a_i [X_i] \quad (1)$$

siendo  $D$  la dosis absorbida,  $[X_i]$  la concentración del radioisótopo  $i$ -ésimo considerado y  $a_i$  el factor de conversión de tasa de dosis definido como la tasa de dosis absorbida o equivalente a un metro de la superficie del terreno por unidad de concentración de actividad del radionúclido considerado. La diferencia entre los distintos autores radica en los radioisótopos considerados para la ponderación y el valor de los factores de conversión de dosis. En la Tabla 2 se muestran algunos de los factores de conversión que pueden encontrarse en la literatura.

**Tabla 2.** Factor de conversión de dosis

$^{238}\text{U}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Referencias
0.4630	0.0012	0.6040	0.0417	Satio and Jacob (1995)
0.4300	--	0.6660	0.0422	Beck (1980)
0.3990	0.0100	0.5437	0.0399	Clouvas et al. (2000)
0.4551	--	0.5835	0.0429	Quindós et al. (2003)



### 3.7 Interpolación IDW

El primer método de interpolación es la Distancia Inversa Ponderada (IDW) donde se suman los valores de cada punto con respecto a la distancia. Éstos se pueden realizar en potencia de 1 o en potencia de 2, en cuyo caso sería una ponderación del cuadrado de la distancia. Cabe destacar que el cuadrado de la distancia ofrece datos una influencia global mayor mientras que la potencia 1 suaviza la superficie interpolada.

Para la obtención de valores en localizaciones donde no ha sido posible la medición directa experimental se ha procedido a la interpolación de los valores directos experimentales más próximos al punto requerido aplicando como criterio de interpolación del inverso de la distancia.

A continuación, se muestra el procedimiento seguido para la obtención del punto LV-15 con coordenadas UTM (X: 371741; Y: 3153300) (Figura17). En la Tabla 3 se muestran los puntos más próximos a LV-15 medidos de forma directa. Para la obtención del valor de la radiación gamma terrestre interpolada se aplicará la siguiente ecuación:

$$TGR_{est} = \frac{\sum D_i \cdot (1/d_i)}{\sum 1/d_i} \quad (2)$$

siendo  $TGR_{est}$  la dosis absorbida estimada por interpolación,  $TGR_i$  la dosis absorbida medida directamente en los puntos más próximos al punto que se quiere estimar, y  $d_i$  la distancia correspondiente de cada punto considerado al punto que se quiere estimar.



**Figura 17.** Localización del punto LV-15 y los valores próximos a interpolar. Elaboración propia.



**Tabla 3.** Tasa de radiación gamma terrestre (TGR) de puntos próximos a LV-15.

Código	UTM-X (m)	UTM-Y (m)	Distancia (m)	TGR <sub>i</sub> (µR/h)
LV4	371456	3153251	288	6,58
LV5	371569	3152995	349	5,17
LV7	371978	3153102	312	4,95
LV12	372054	3153249	324	4,92
LV13	371751	3153089	208	5,47
LV14	371977	3153365	249	5,54

La radiación gamma terrestre estimada por interpolación resultante es:

Código	UTM-X (m)	UTM-Y (m)	TGR <sub>est</sub> (µR/h)
LV15	371741	3153300	5,47

El cálculo realizado de manera manual tiene como resultado un TGR<sub>est</sub> de 5,47 µR/h, siendo coincidente con el valor estimado (Figura 18) mediante la interpolación geoestadística del programa de información geográfica.

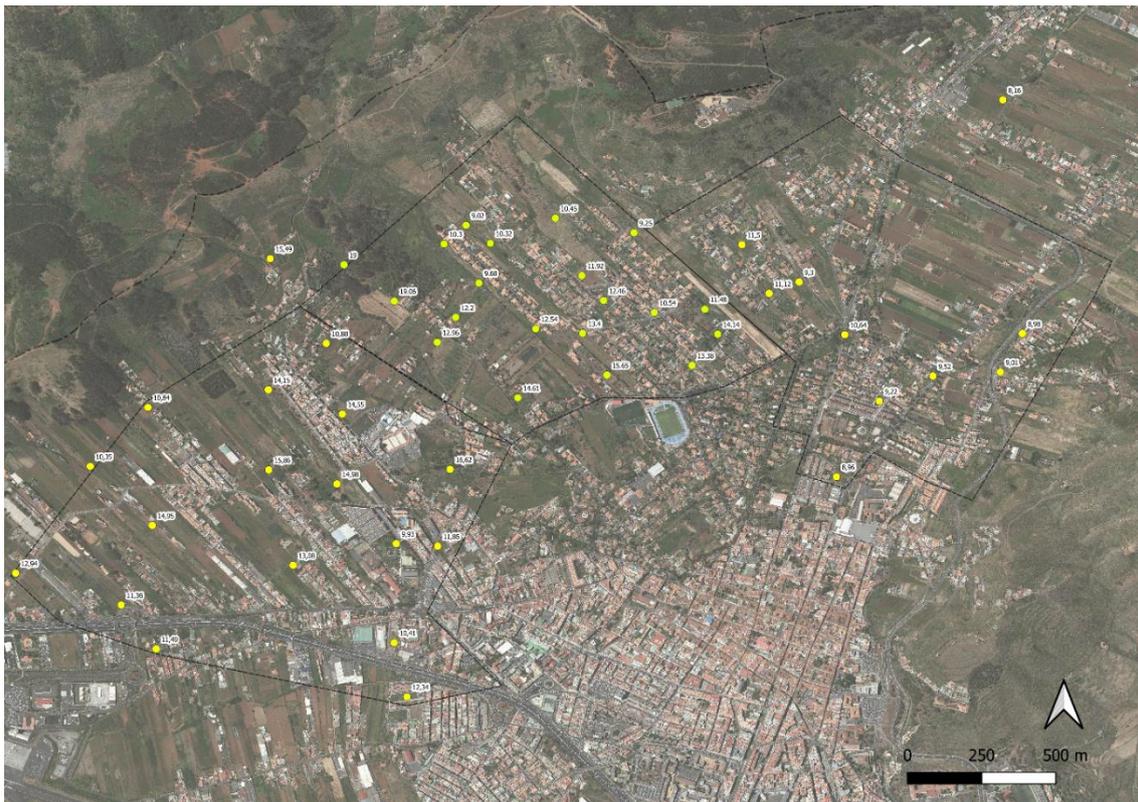
Objeto espacial	Valor
▼ IDW comprobación interp...	0
▼ IDW comprobación inter...	
Banda 1	5.4743332
▶ (Derivado)	

**Figura 18.** Cálculo estimado de radiación gamma terrestre en el punto LV-15. Elaboración propia.

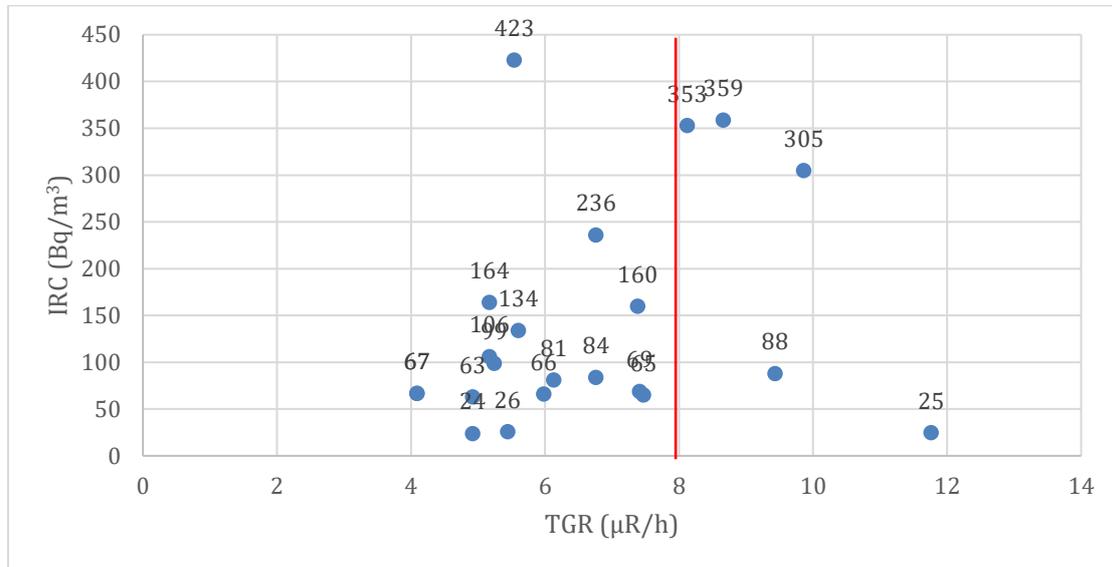


## 4. Resultados

El trabajo de campo de medición directa de radiación gamma abarca un área de 4 km<sup>2</sup> y recoge 52 puntos de información (Figura 19). A partir de la nube de puntos de radiación gamma medidos directamente sobre el terreno ha sido posible crear un mapa de color mediante la interpolación de los datos. El resultado arrojado por el programa de información geográfica es un degradado de blancos y negros donde cada tono de gris representa el valor estimado de radiación gamma de una zona determinada. La interpretación del mapa dependerá de la comparación entre la radiación gamma terrestre (TGR) y la concentración de radón interior (ICR) de las viviendas. La figura 20 representa y establece límites entre ambos factores.



**Figura 19.** Localización de las ubicaciones de las medidas de radiación gamma realizadas durante la campaña de medición.



**Figura 20.** Relación entre TGR e IRC. Elaboración propia.

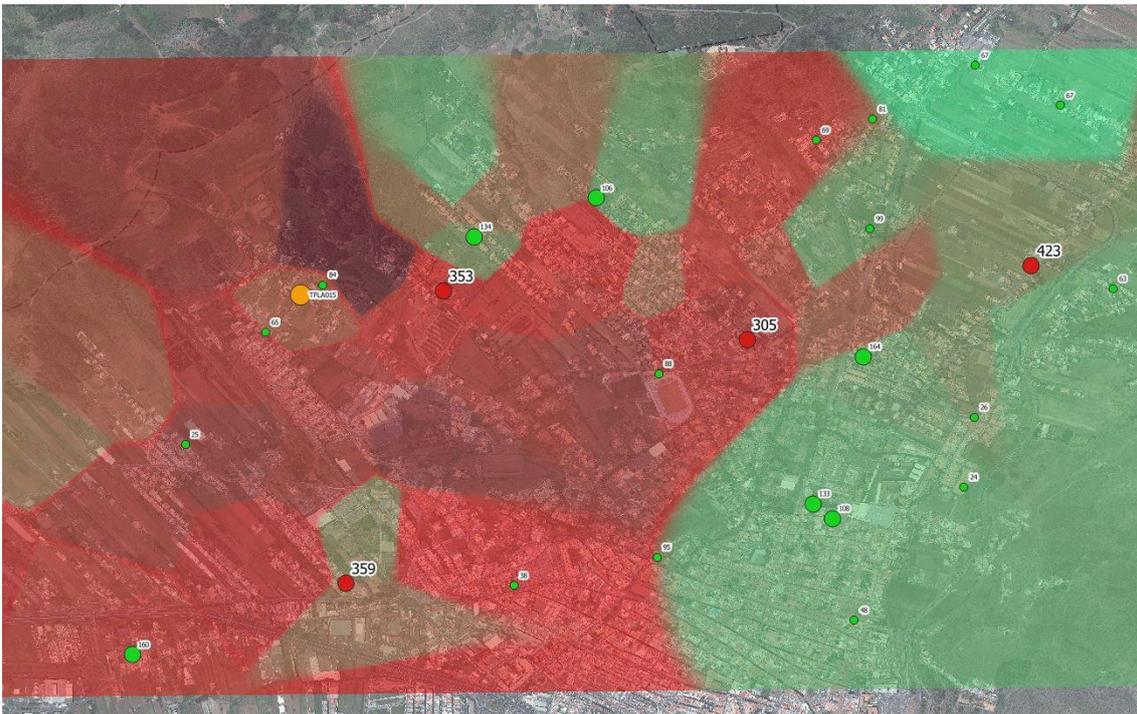
Según la figura anterior, se podría considerar  $8 \mu\text{R/h}$  como el límite radiación gamma terrestre a la hora de hacer una primera aproximación al nivel de riesgo por radón, donde los valores inferiores se consideran como zonas seguras y los superiores empiezan a superar el nivel de referencia ( $300 \text{ Bq/m}^3$ ) establecido en el DB HS6 del Código Técnico de la Edificación. El valor de  $423 \text{ Bq/m}^3$  se asienta sobre una litología distinta a la del resto de los datos analizados, sobre una zona catalogada como “depósitos de barranco” (Figura 21) de la cual no se tienen más datos para comparar y será necesario un estudio más profundo sobre este tipo de terrenos.



**Figura 21.** Situación del punto 423 sobre el mapa geológico de La Laguna.



Con estos datos se puede clasificar la información fruto de la interpolación para asignar colores en función de su nivel de radiación gamma terrestre, siendo el verde para las zonas de bajo riesgo, naranja para los de medio y rojo para las zonas de peligro; y obtener así un Mapa de Potencial de Radón Interior en viviendas de la zona norte y oeste de la ciudad de San Cristóbal de La Laguna (Figura 22).



**Figura 22.** Mapa de potencial de radón en el interior de edificaciones basado en la relación de TGR y el ICR. Elaboración propia.



#### 4.1 Comparación de valores gamma experimentales con los obtenidos de las correlaciones de radioisótopos

Por otra parte, la Universidad de La Laguna junto con la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, realizaron un estudio de los radioisótopos del suelo, en el que se analizó el contenido de Potasio y Radio de distintas ubicaciones. Este método consiste en la toma de muestras de terreno natural en las zonas requeridas para su análisis geoquímico, el cual permite conocer las concentraciones de los elementos radiactivos que contribuyen de manera significativa a la tasa de dosis absorbida de radiación gamma y a partir de estas concentraciones poder estimar la radiación gamma.

El área de estudio de este TFM abarca 2 muestras de la campaña de estudio de los radioisótopos del suelo cuyo análisis se refleja en la tabla 2. Con estos datos se procede a comprobar mediante el método de interpolación del cuadrado de la distancia (IDW) la capacidad de acierto del sistema.

**Tabla 2.** Estudio de los radioisótopos del suelo dentro del área de trabajo del TFM.

Datos medida			K-40		Ra-226		Ra-228	
Muestra	UTM X	UTM Y	A(Bq/kg)	u(Bq/kg)	A(Bq/kg)	u(Bq/kg)	A(Bq/kg)	u(Bq/kg)
LALA08	370507	3153732	305,0	19,4	13,6	6,6	55,1772	3,82315
LALA09	370486	3153243	326,0	18,8	48,9	2,5	67,8503	4,10988

TGDR UNSCEAR-2008	
TGDR(nGy/h)	u(nGy/h)
52,3	6,2
77,2	4,4

La figura 23 representa el mapa del sector de San Diego donde se localiza la muestra de suelo LALA08 y LALA09 con los datos de radiación gamma experimentales interpolados. La herramienta de GIS permite consultar la información asignada a cada pixel de la capa obtenida tras el cálculo. En este caso tenemos que el valor calculado mediante el método de interpolación para el punto LALA08 es de **6,37  $\mu$ R/h** (Figura 24) y para el punto LALA09 es de **8,71  $\mu$ R/h** (Figura 25).



Figura 23. Mapa de San Diego con la capa de interpolación de radiación gamma.

Objeto espacial	Valor
▼ IDW-radionuclidos	0
▼ IDW-radionuclidos	
Banda 1	6.37
▶ (Derivado)	

Figura 24. Resultado del cálculo de interpolación de radiación gamma para el punto LALA08.

Objeto espacial	Valor
▼ IDW-radionuclidos	0
▼ IDW-radionuclidos	
Banda 1	8.7099372
▶ (Derivado)	

Figura 25. Resultado del cálculo de interpolación de radiación gamma para el punto LALA09.



A continuación, se representa en la tabla 3 una comparativa de los valores obtenidos en el ensayo del terreno con los datos obtenidos mediante el método de interpolación para calcular la fiabilidad del método.

**Tabla 3.** Comparación de datos experimentales con las correlaciones de los radioisótopos del suelo.

	Rad. Gamma estudio suelo (nGy/h)	Conversión nGy/h a $\mu$ R/h	Rad. Gamma estudio suelo ( $\mu$ R/h)	Valor interpolado en QGIS ( $\mu$ R/h)	Error
LALA08	52,3	8,76	<b>5,97</b>	<b>6,37</b>	<b>6,70 %</b>
LALA09	77,2	8,76	<b>8,81</b>	<b>8,71</b>	<b>1,14 %</b>

## 4.2 Discusión de resultados

La campaña experimental de radiación gamma deja caracterizada el área periférica del casco de San Cristóbal de La Laguna gracias a la alta densidad de puntos obtenidos. Estas mediciones realizadas sobre suelo no alterado por el hombre representan un mapa del estado radiológico del suelo muy fiable gracias a la metodología aplicada. La comparación entre los valores medidos y los estimados a partir de la concentración de radioisótopos del suelo, establecen unos márgenes de error bastante bajos, inferior al 10% por lo que se puede afirmar que la metodología es correcta.

La realización del mapa se ha conseguido mediante técnicas geoestadísticas donde se ha rellenado la información a través de los datos interpolados. Esta herramienta permite estimar datos aproximados de un área a partir de unos pocos datos conocidos, lo que permite caracterizar un territorio de manera rápida y eficaz.

En el caso que nos concierne, se ha tratado de establecer una relación entre la radiación gamma terrestre y la concentración de radón interior en el suelo de La Laguna, como realizó (García-Talavera San Miguel et al., 2013) en la península, donde la geología del terreno es distinta a la de Canarias. Los datos de radón interior utilizados para este propósito son los publicados por (Barrera, 2019) y recogen información de radón indoor de Santa Cruz de Tenerife y La Laguna. Sin embargo, el número de testigos dentro del área de estudio no supone una cifra suficiente para determinar dicha relación.



Por otra parte, existen algunos datos de radón interior que desvirtúan las gráficas y se desconoce su razón, aunque las principales hipótesis son aquellas que están relacionados con los sistemas constructivos, los materiales y los usuarios. A continuación, se exponen los factores que se consideran pueden influir en las mediciones de concentración de gas radón interior:

- **Hábitos de uso de los inquilinos.** Incluso en zonas con escasa emanación de radón desde el terreno, la falta de ventilación puede causar altos niveles de concentración de radón en el interior de los inmuebles.
- **Permeabilidad de los edificios.** Al contrario que en el caso anterior, en zonas de alto potencial de radón, la falta de estanqueidad de las carpinterías y el resto de la envolvente hace que el inmueble tenga suficiente renovación de aire como para evitar las concentraciones internas de gas radón.
- **Presencia de humedad en el terreno.** Los terrenos con presencia de agua dificultan la emanación del gas a través de los poros y grietas que se ven colmatados, produciéndose dicha emanación por las zonas secas donde el gas puede circular, es decir, justo debajo de las edificaciones. Este fenómeno desvirtúa las mediciones de radiación gamma, pues disminuye los valores en el terreno abierto y aumenta la concentración de radón en el interior de las viviendas, motivo por el cual las campañas de medición se realizaron pasados al menos 7 días desde la última lluvia.
- **Rellenos en la cimentación.** El uso de materiales con contenido de  $^{226}\text{Radio}$  (de naturaleza desconocida) como elementos de relleno puede provocar acumulación de radón en el interior de viviendas incluso cuando la emanación natural del terreno en el que se asienta es escasa.
- **Despresurización del terreno.** Los edificios que tengan a su alrededor terrenos constantemente arados o que hayan sido excavados, presentarán probablemente valores de concentración de radón inferiores debido a que este hecho facilita la circulación del gas hacia esos puntos, mientras que la presión



ejercida por el propio peso del edificio mantiene el terreno sobre el que se asienta más compacto.

- **Existencia de forjado sanitario.** En ocasiones, en esta zona de estudio, se presentan construcciones realizadas con forjado sanitario debido al grado de humedad que presenta el terreno. Esta acción también ayuda a la disminución de presencia de radón en el interior de las edificaciones ya que el espacio que queda entre el forjado y el terreno actúa como cámara de circulación de aire por el cual se disipa el gas.

A pesar de esto, se considera que la utilidad de la radiación gamma como variable predictora del potencial de concentración de radón en interiores de viviendas es positiva, existiendo otros trabajos que siguen esta línea (García-Talavera San Miguel et al., 2013) (Briones et al., 2021). Sin embargo, en este caso se hace necesario un mayor número de datos de radón en el interior de las viviendas de dicha zona para concluir una relación fiable en la zona de estudio de este TFM.



## 5. Conclusiones

La campaña experimental de radiación gamma deja caracterizada el área periférica del casco de San Cristóbal de La Laguna gracias a los puntos obtenidos que suponen un avance en cuanto a la caracterización del terreno, elevando la densidad de puntos de 1 medición de radiación gamma existente en la bibliografía a 53 en los 4 km<sup>2</sup> que. Esto permite diferenciar áreas en base a su potencial de radiación ionizante, que está estrechamente ligada al potencial del gas radón.

Las comparaciones entre los dos valores de radiación gamma terrestre estimados a partir de la concentración de radioisótopos del suelo y los medidos experimentalmente tienen un margen de error del 6,70% y 1,14 %.

Se ha logrado un mapa de potencial de radón de la zona periférica del casco de La Laguna realizado a partir de datos de radiación gamma terrestre donde los valores interpolados definen las zonas de riesgo de gas radón en el interior de las viviendas. Así se estima que para la determinación más fiable entre TGR y la concentración en el interior de las edificaciones es necesario un mayor número de muestras de IRC, clasificar y evaluar los edificios donde se analiza la concentración de manera que se unifiquen los criterios/resultados y conocer los sistemas constructivos de los edificios, así como la procedencia de los materiales.



## 6. Líneas de trabajo Futuro

Dado que el mayor problema encontrado es el bajo número de testigos de radón interior, parece interesante repetir este trabajo aumentando el número de muestras. Con el mapa de radiación gamma obtenido, que se entiende suficientemente denso para el área de trabajo, convendría rehacer la correlación entre TGR e IRC para establecer con mayor precisión los valores límites entre ambos factores.

Además, existe la posibilidad de que los valores de radiación gamma se comporten de manera distinta en suelos de tipo basáltico y arcilloso, debido al grado de porosidad que presentan cada uno y que los rayos gamma sólo sean capaces de traspasar 40 cm de terreno. En otras palabras, la cantidad de radón capaz de traspasar el terreno puede ser la misma en un terreno o en otro, pero la resistencia al paso de la radiación gamma puede ser distinta.



## BIBLIOGRAFÍA

- Arnedo Ayensa, M. Á. (2014). Evaluación del fondo radiactivo natural de las Islas Canarias Orientales, implicaciones radiológicas sobre la población. In *Tesis Docotral* (Vol. 1, Issue 1).
- Arnedo, M. A., Rubiano, J. G., Alonso, H., Tejera, A., González, A., González, J., Gil, J. M., Rodríguez, R., Martel, P., & Bolivar, J. P. (2017). Mapping natural radioactivity of soils in the eastern Canary Islands. *Journal of Environmental Radioactivity*, 166, 242–258. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.07.010>
- Barrera, C. B. (2019). *Concentración de Radón en edificaciones del municipio de San Cristóbal de la Laguna*. Máster en Gestión e Innovación Tecnológica en la Construcción. Escuela de Doctorado y Estudios de Posgrado. Universidad de La Laguna.
- Briones, C., Jubera, J., Alonso, H., Olaiz, J., Santana, J. T., Rodríguez-Brito, N., Tejera, A., Martel, P., González-Díaz, E., & Rubiano, J. G. (2021). Methodology for determination of radon prone areas combining the definition of a representative building enclosure and measurements of terrestrial gamma radiation. *Science of The Total Environment*, 788, 147709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147709>
- Consejo de Seguridad Nuclear. (2010). *Dosis de radiación*. 68–70.
- EURATOM. (2014). Normas de seguridad basicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. *Diario Oficial de La Unión Europea*, L13/1-73. <http://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf>
- European Commission. (2019). *European Atlas of Natural Radiation*.
- Fernández-Aldecoa, J. C. (2000). *Radiación natural en aire y suelos de las islas Canarias occidentales*. Universidad de La Laguna.
- Fernández de Aldecoa, J. C. (2000). *Radiación natural en aire y suelos de las islas Canarias occidentales*. Universidad de La Laguna.
- García-Talavera, M., García-Pérez, A., Rey, C., & Ramos, L. (2013). Mapping radon-prone areas using  $\gamma$ -radiation dose rate and geological information. *Journal of Radiological Protection*, 33(3), 605–620. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/33/3/605>



- García-Talavera San Miguel, M., Martín-Matarranz, J. L., Gil de Mingo, R., García Cadierno, J. P., & Suárez Mahou, E. (2013). El mapa predictivo de exposición al radón en España. *Colección Informes Técnicos* 38.2013, 141(1), 40–42.
- García Rubiano, J. (2019). *Radioactividad natural y radón en Canarias*. Jornadas Técnicas de Radón. ULPGC.
- ISTAC. Instituto Canario de Estadística. (2020). *Estadísticas de la Comunidad Autónoma de Canarias*.
- Manual de uso Radosys*. (2013). 2013.
- Miguel, M. G.-T. S., & Acevedo, F. J. L. (2019). *Cartografía del potencial de radón de España*.
- Ministerio de Fomento. (2019). *Documento Básico HS. Salubridad*. 2013, 1–129. <http://www.arquitectura-tecnica.com/hit/Hit2016-2/DBHE.pdf>
- Quindós, L. S., Fernández, P. L., Sainz, C., Fuente, I., Nicolás, J., Quindós, L., & Arteche, J. (2008). Indoor radon in a Spanish region with different gamma exposure levels. *Journal of Environmental Radioactivity*, 99(10), 1544–1547. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.011>
- Quindós Poncela, L. S., Fernández, P. L., Gómez Arozamena, J., Sainz, C., Fernández, J. A., Suárez Mahou, E., Martín Matarranz, J. L., & Cascón, M. C. (2004). Natural gamma radiation map (MARNA) and indoor radon levels in Spain. *Environment International*, 29(8), 1091–1096. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00102-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00102-8)
- SPRL-ULPGC. (2021). *¿Qué es la radiactividad? | ULPGC - Universidad de Las Palmas de Gran Canaria*.
- Suárez-Mahou, E., Fernández-Amigot, Á., Moro, M., García-Pomar, D., Moreno, J., & Lanaja, J. (2000). INT-04-02 Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural.pdf. In *Colección Informes Técnicos Consejo de Seguridad Nuclear*.



## 7. Anexos

### 7.1 Procesos de QGIS

#### 7.1.1.1 Configuración inicial

Colocación de mapa base WMS, Sistema de coordenadas correspondiente al territorio de trabajo, siendo para este caso el siguiente:

**EPSG:32628 – WGS 84 / UTM zone 28N.**

#### 7.1.1.2 Introducción de las localizaciones

Se crea una tabla de Excel con los **Campos** necesarios (columnas) y el valor de los mismos, denominados **Registros** (filas). Los campos necesarios para la localización de puntos serán las coordenadas X e Y en formato UTM, así como los valores obtenidos de la radiación gamma y cada uno de sus identificadores (**ID**).

Con este archivo, entendido como base de datos, se introducen los valores en el programa QGIS, mediante una capa de texto delimitado, en el cual se carga la base de datos en formato .CSV indicando que los datos se encuentran separados por puntos y comas, los campos donde se encuentran las coordenadas X e Y, y el sistema de coordenadas correspondiente a nuestro territorio.

Una vez cargados los datos es cuestión de procesar/filtrar/ordenar el contenido de modo que se identifique su localización, su identificación y su valor. Para ello hay que cargar y modificar las etiquetas, la simbología y modificar la tabla de atributos. Se trata de un proceso laborioso de gestión de la información para poder visualizarla de manera que represente datos útiles.

#### 7.1.1.3 Representación por tamaño

Para identificar las zonas con tasas de radiación gamma más elevadas, se decidió representar dichos puntos con un tamaño proporcional a su valor de radiación. Para realizar este procedimiento hay que seguir los siguientes pasos:



- Seleccionar la capa
- Abrir la tabla de atributos
- Conmutar modo edición
- Crear “Campo nuevo” (Ctrl +W)
- Darle nombre y seleccionar el tipo. En este caso en el que trabajamos con número decimales se deberá seleccionar “*Numero decimal (real)*”.

Finalizada la preparación del campo con el que vamos a trabajar, seguimos con los siguientes puntos:

- Abrir propiedades de la capa
- En la pestaña de Simbología, cambiar de “*No symbols*” a “**Graduado**”
- En el parámetro “Valor” seleccionar el campo anteriormente configurado.
- En el parámetro “Método” seleccionar “Tamaño”
- En los parámetros “Tamaño desde” y “hasta” iremos cambiando los tamaños hasta encontrar el que mejor se adapte a las necesidades. En este caso pondremos desde 2 hasta 12.
- Click en el botón “Clasificar”. Aparecerán los valores contenidos en dicho campo. Se podrán configurar el número de “Clases” y el “Modo”. En este caso se han utilizado 6 Clases y el Modo *Pretty Breaks*
- Aplicar
- Aceptar



## 7.2 Valores obtenidos en la campaña de medición de radiación gamma

### 7.2.1 Mediciones realizadas en el área de San Lázaro

ID	UTMX	UTMY	VALOR
SL1	368653	3152367	12,94
SL2	368909	3152774	10,35
SL3	369007	3152241	11,36
SL4	369106	3152998	10,84
SL5	369115	3152545	14,95
SL6	369123	3152071	11,49
SL7	369524	3153564	15,49
SL8	369512	3153061	14,15
SL9	369709	3153237	10,88
SL10	369760	3152965	14,55
SL11	369739	3152697	14,98
SL12	369588	3152387	13,08
SL13	369936	3152466	9,93
SL14	370121	3152749	16,62
SL15	370076	3152455	11,86
SL16	369966	3151878	12,34



### 7.2.1.2 Fotografías de lugares de medición



**Imagen 1. SL01**



**Imagen 2. SL02**



**Imagen 3. SL05**



**Imagen 4. SL07**



**Imagen 5. SL11**



**Imagen 6. SL15**



### 7.2.2 Mediciones realizadas en el área de San Diego

ID	UTMX	UTMY	VALOR
SD1	369772	3153538	19
SD2	369940	3153397	19,06
SD3	370083	3153237	12,96
SD4	370146	3153332	12,2
SD5	370110	3153614	10,3
SD6	370226	3153463	9,68
SD7	370185	3153685	9,02
SD8	370266	3153615	10,32
SD9	370415	3153285	12,54
SD10	370352	3153021	14,61
SD11	370486	3153709	10,45
SD12	370573	3153488	11,92
SD13	370645	3153391	12,46
SD14	370573	3153266	13,4
SD15	370653	3153105	15,65
SD16	370750	3153650	9,25
SD17	370815	3153343	10,54
SD18	370986	3153354	11,48
SD19	371028	3153258	14,14
SD20	370940	3153139	13,38



### 7.2.2.1 Fotografías de lugares de medición



**Imagen 1. SD3**



**Imagen 2. SD15**



**Imagen 5. SD16**



**Imagen 6. SD19**



### 7.2.3 Mediciones realizadas en el área de La Vega

ID	UTMX	UTMY	VALOR
LV1	371113	3153600	11,5
LV2	371203	3153412	11,12
LV3	371304	3153455	9,3
LV4	371456	3153251	10,64
LV5	371569	3152995	9,22
LV6	371422	3152706	8,96
LV7	371978	3153102	9,01
LV8	371998	3154146	8,16
LV9	372684	3154001	10,08
LV10	372794	3154003	10,14
LV11	372850	3153950	9,64
LV12	372054	3153249	8,98
LV13	371751	3153089	9,52
LV14	371977	3153365	9,6



### 7.2.3.1 Fotografías de lugares de medición



**Imagen 1. LV3**



**Imagen 2. LV6**



**Imagen 1. LV7**



**Imagen 2. LV13**