



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

Autor:

Néstor De La Nuez Hernández

Tutores:

Dr. Juan Pedro Díaz González

Dr. Pedro Ángel Salazar Carballo

Julio 2021

1. Tabla de contenidos

1.	TABLA DE CONTENIDOS	2
2.	ABSTRACT	3
3.	SUMMARY IN ENGLISH	3
4.	INTRODUCCIÓN	4
5.	MARCO TEÓRICO	5
	3.1. LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA	6
	3.2. FUENTES RADIATIVAS.....	7
	3.3. RADÓN.....	8
	3.4. EFECTOS PARA LA SALUD.....	9
	3.5. EL RADÓN EN VIVIENDAS.....	10
	3.6. LEGISLACIÓN Y NORMATIVA	10
	3.7. SERIES TEMPORALES.....	11
6.	OBJETIVOS	11
7.	METODOLOGÍA	13
	7.1. MÉTODO DE MEDICIÓN PASIVO.....	13
	7.2. MÉTODO DE MEDICIÓN CONTINUO	18
8.	RESULTADOS	19
	8.1. MÉTODO DE MEDICIÓN PASIVO.....	20
	8.2. MÉTODO DE MEDICIÓN CONTINUO	27
9.	CONCLUSIONES	41
10.	ANEXO	43
11.	BIBLIOGRAFÍA	46

2. Abstract

Se presenta un estudio sobre los niveles de exposición en diferentes institutos de la isla de Tenerife. Estas medidas se llevaron a cabo utilizando detectores pasivos. Además, se obtuvieron medidas activas, en modo continuo, para comprender el comportamiento del radón en zonas internas y sus relaciones con otras variables ambientales. Para ello, se ha llevado a cabo un proyecto colaborativo con diferentes institutos (ca. 18) durante seis meses.

3. Summary in English

The main interest of this TFG is to verify that the levels of exposure to radon gas in the school environment of the island of Tenerife is within the levels recommended by Spanish legislation ($<300 \text{ Bq/m}^3$). That is why approximately twenty Secondary Schools (HEIs) have been selected throughout the island of Tenerife. This Final Degree Project (TFG) has been carried out with the collaboration of the Laboratory of Medical Physics and Environmental Radioactivity (FIMERALL) belonging to the General Service of Aid to the Investigation (SEGAI) of the ULL and the Department of Physical Medicine and Pharmacology of the Faculty of Health Sciences. The activities developed have been carried out for 6 months, which includes: (1) management and distribution of detectors in the various HEIs, (2) placement of radon trace detectors, (3) development of an informative activity in the Centers, (4) collection of detectors after 3 months of exposure and (5) treatment and interpretation of the results.

In addition, a radon gas detector has been placed in continuous mode at FIMERALL facilities to study the behavior and variations of short and medium period, as well as their correlation with the main atmospheric variables.

In the section of theoretical framework a presentation of the topic has been made, starting from the concept of ionizing radiation and its main characteristics. The most relevant information has been introduced later in this work, about the element of the periodic table radon. In this explanation it stands out to mention the carcinogenic effect that the gas has on people and why it is common to find it in all buildings. Radon is the second cause of lung cancer and is exhaled from the ground into any building producing accumulations that increase the concentration of the gas. Finally, this section provides a brief explanation of the legislation governing the subject and the presentation of the concept of time series.

In the next section, the objectives pursued by the work are raised which are divided into two blocks. The first of them focuses on obtaining the data through a passive measurement of the concentration levels in the classrooms of different institutes, in addition it is also proposed to achieve different results with which its can make a bibliographic comparison with other articles and with the Spanish legislation. The second block of objectives is focused on the statistical study of a series of radon measured by a continuous method and trying to use data from other atmospheric variables to understand the dynamics and behavior of radon emissions.

Within the experimental method, the steps taken during the projects to obtain the results are summarized. The first project explains how the placement and collection of detectors have been organized with an interval of three months of measurement. It also comments on the didactic project carried out with the exhibition of informative talks to the students of the different centers. The last part of this first project shows how the data processing has been by explaining the transformation of the raw data to comparable results with other articles.

In the second project, the methodology section contains the technical information of the measurement carried out as the instrumentation used. In addition, the statistical approach is presented by introducing the steps that are followed in the study of normality, stationarity, autocorrelation, cross-correlations with other variables and Fourier's transform. Finally, the optimization of an autoregressive model that allows predicting the behavior of the time series is discussed.

The main block of work is the description of the results, which are divided into two distinct parts according to the project and the measurement used. The results of the passive method begins by introducing a map where the institutes that have collaborated with the work are located and shows the average values of the radon concentration of each one, in order to determine the existence of a geographical factor that influences the data obtained. Subsequently, an analysis of the raw data is performed with the representation of a histogram and the main statistical data (mean, median, geometric mean, standard deviation, ...).

With the main analysis resolved, a study is carried out according to the center, for this a box-plot is made that allows to check the differences and find the centers that stand out the most. In this section it is found that two of the centers have values considerably higher than the average. An analysis is also carried out depending on the floor of the building where the data have been taken, obtaining another box-plot with the four floors used in the placement of the detectors. It is found that there is a non-significant trend where smaller plants have a higher concentration of radon. The final part of this section of results presents the dosimetry obtained by the institute and the comparison of the means obtained on the island of Tenerife with the data obtained in other European countries.

The second section of the results describes the statistics of continuous measurement. It begins by plotting the time series obtained (radon, temperature, pressure, relative humidity) and offering the main data of each one. Then the normality of the radon series is studied by means of a qq-plot, a box-plot and different normality tests, obtaining that the data set does not follow a normal distribution.

The next process that is worked is the decomposition of the series by the additive and multiplicative method, resulting in the second a better option when analyzing the residues of each case. There is also an autocorrelation, partial correlation and cross-correlation of the values with the different atmospheric variables, highlighting the importance of temperature in the variations of radon concentration. By calculating periodograms, the existence of intraday cycles that govern the behavior of the series is confirmed. The last part is a predictive model of ARIMA moving average, with which 20 possible values that precede the time series are obtained.

The conclusions highlight on the one hand the importance of ventilation in schools and that the values recorded in schools are below the legal limit. It also mentions the cyclicity obtained in the time series and the correlation with temperature.

4. Introducción

El radón (Radon-222) es un gas incoloro, inoloro y ubicuo que se produce de forma natural por la desintegración del Radio-226 contenido en las rocas de la corteza terrestre. El gas radón fue declarado cancerígeno humano en 1988 por la Agencia Internacional de Investigación en Cáncer. Adicionalmente la Organización Mundial de la Salud lo ha catalogado como el segundo factor de riesgo de cáncer de pulmón en fumadores y el primero en no fumadores.

El principal interés de este TFG es comprobar que los niveles de exposición frente al gas radón en el entorno escolar de la isla de Tenerife está dentro de los niveles recomendados por la legislación española ($<300 \text{ Bq/m}^3$). Es por ello que se han seleccionado aproximadamente una veintena de Institutos de Secundaria (IES) repartidos por toda la isla de Tenerife. El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se ha realizado con la colaboración del Laboratorio de Física Médica y Radiactividad Ambiental (FIMERALL) perteneciente al Servicio General de Ayuda a la Investigación (SEGAI) de la ULL y el departamento de Medicina Física y Farmacología de la Facultad de Ciencias de la Salud. Las actividades desarrolladas se han llevado a cabo durante 6 meses, donde se incluye: (1) gestión y reparto de detectores en los diversos IES, (2) colocación de los detectores de trazas de radón, (3) desarrollo de una actividad divulgativa en los Centros, (4) recogida de los detectores después de 3 meses de exposición y (5) tratamiento e interpretación de los resultados.

Adicionalmente se ha colocado un detector de gas radón en modo continuo en las instalaciones del FIMERALL con el objeto de estudiar el comportamiento y las variaciones de corto y medio periodo, así como su correlación con las principales variables atmosféricas.

5. Marco teórico

Summary

In the section of the theoretical framework a presentation of the topic has been made, starting from the concept of ionizing radiation and its main characteristics. The most relevant information has been introduced later in this work, about the element of the periodic table radon. In this explanation it stands out to mention the carcinogenic effect that the gas has on people and why it is common to find it in all buildings. Radon is the second cause of lung cancer and is exhaled from the ground into any building producing accumulations that increase the concentration of the gas. Finally, this section provides a brief explanation of the legislation governing the subject and the presentation of the concept of time series.

Este trabajo se centra en los intervalos más energéticos del espectro electromagnético, los cuales engloban las consideradas radiaciones ionizantes. **Las radiaciones ionizantes** son aquellas que poseen energía suficiente para ionizar un átomo siendo capaz de extraer o arrancar un electrón. Se produce radiación ionizante con la desintegración espontánea de los átomos cuya energía es liberada en forma de onda o de partícula, o mediante fuentes de radiación artificiales. Una fuente que genera una reacción nuclear es una **fuentes radiactiva**, esta cualidad se asocia principalmente a los núcleos atómicos inestables. Estos núcleos al fisionarse van a emitir energía en forma de radiación con el fin de estabilizarse, de esta forma si esta radiación alcanza otro átomo será capaz de ionizar. Un material o un gas que posea átomos con núcleos inestables se considera radiactivo. [1,2]

La radiación ionizante se puede distinguir no sólo mediante la intensidad sino también mediante la composición de ésta. Puede encontrarse radiación en forma de onda electromagnética también considerada como fotones de alta energía o mediante partículas subatómicas también con una alta energía. De forma que se generan 5 grupos:

- **La radiación alfa** son núcleos de helio (He^4) formados por dos neutrones y dos protones que se desprenden en ciertas reacciones nucleares.
- **La radiación beta** son flujos de electrones o positrones liberados también en reacciones nucleares cuando se descompone un neutrón o un protón.
- **Los rayos X** son una radiación electromagnética sin carga ni masa, que procede de las capas externas del átomo, donde se encuentran los electrones.

- **Los rayos gamma** es otra radiación electromagnética sin carga ni masa, más energética que los rayos X, y que se produce en la desintegración de algunos elementos radiactivos.
- **Los neutrones libres** son una radiación no ionizante pero que puede interactuar con un núcleo atómico, puede producir la emisión de una partícula cargada o un rayo gamma.

Cómo son diferentes tipos de radiación una de las principales características que hay que tener en cuenta va a ser el **poder de penetración**. Esta característica va a tener mayores importancias en temas de salud, y está relacionada con el tipo de particular asociada a cada radiación, siendo la radiación alfa la menos penetrante puesto que es un núcleo atómico y por tanto posee carga y masa considerable. La radiación beta pese a que también tiene carga posee menos masa y tiene un mayor poder de penetración. Los rayos gamma y los neutrones libres no tienen carga por lo que su poder de penetración es considerablemente mayor. [3]

3.1. Ley de desintegración radiactiva

Un núcleo atómico inestable pese a tener una probabilidad de desintegrarse no se puede conocer el momento exacto en que realizará este proceso. Ley de decaimiento radiactivo Ec. (1), expresa cómo evoluciona la cantidad de radionúclidos en función del tiempo.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1)$$

Donde:

- $N(t)$ es el número de radionúclidos existentes en un instante de tiempo t .
- N_0 es el número de radionúclidos existentes en el instante inicial ($t=0$).
- λ Es la constante de desintegración radiactiva, es decir la probabilidad por unidad de tiempo de que un átomo se desintegre. Es el cociente entre el número de desintegraciones por segundo (**A**) y el número de átomos radiactivos (**N**).

$$\lambda = \frac{A}{N} \quad (2)$$

Un concepto fundamental dentro de esta ley es el tiempo de vida medio de un radioisótopo (τ), muestra el promedio de vida de un átomo antes de desintegrarse y es igual a la inversa de la constante de desintegración radiactiva. Todos los núclidos radiactivos poseen un tiempo característico que controla en gran medida la presencia de estos en la naturaleza.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

En ocasiones se emplea otro concepto, el periodo de semidesintegración, conocido como el tiempo que transcurre para que una cantidad de un isótopo radiactivo se reduzca a la mitad.

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} \quad (4)$$

Durante este TFG se trabajará con la unidad del Sistema internacional Bequerelio (Bq) que cuantifica la actividad radiactiva y hace referencia a desintegración por segundo. Es por tanto una forma de medir la velocidad de desintegración. Otras unidades equivalentes son:

- Rutherford (Rd) $1 Rd = 1 * 10^6 Bq$ (5)
- Curio (Ci) $1 Ci = 3.7 * 10^{10} Bq$ (6)

La velocidad de desintegración es la tasa de variación del número de núcleos radiactivos por unidad de tiempo, de manera que se puede escribir:

$$A(t) = \frac{dN(t)}{dt} = -(-\lambda N_0)e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t) \quad (7)$$

Donde:

- $A(t)$ Es la actividad radiactiva en el instante t .
- A_0 Es la actividad radiactiva inicial ($t = 0$).

Con esta última Ec. (7) se comprueba la relación entre la actividad radiactiva y el número de átomos radiactivos en un instante de tiempo. [4]

Cuando la radiación ionizante interactúa con la materia, la dosis absorbida nos indica la cantidad de energía depositada por unidad de masa (J/Kg). Usualmente dicha unidad se conoce como Gray (Gy) Por otro lado, la dosis equivalente recibida por un individuo es igual a la dosis absorbida corregida por un factor de ponderación (Factor de Calidad) que depende del tipo de radiación y que tiene en cuenta la eficacia biológica relativa de la radiación incidente para producir efectos estocásticos. Este factor de corrección es numéricamente 1 para rayos X. Como el factor de calidad es adimensional la unidad es el julio por kilogramo (J/ Kg) y se le da el nombre especial de Sievert (Sv) para distinguirla de la dosis absorbida. La dosis efectiva es la suma ponderada de todos los tejidos y órganos pertinentes de forma que se tiene en cuenta todos los efectos estocásticos sumando todas las dosis equivalentes. [5]

3.2. Fuentes radiactivas

Tanto en el día a día de las personas como en el transcurso de los años las personas reciben continuamente radiación de diferentes fuentes, aunque estas se agrupan en dos, las naturales y las artificiales.

Las fuentes naturales son las que encontramos en el entorno, en la naturaleza. Principalmente son las que provienen o bien de la corteza Terrestre o bien del espacio exterior, esto provoca que no todos los lugares de la Tierra tengan el mismo nivel de radiactividad, llegando a haber lugares con niveles 10 veces más altos que otros principalmente por el tipo de suelo sobre el que se localizan.

En el caso de los rayos cósmicos, la radiación se produce en el interior del sol u otras estrellas del firmamento. Gracias a la atmósfera y la magnetosfera estos rayos son mucho menos potentes cuando llegan a la superficie, aun así, los efectos son notables y más si incrementamos la altura sobre el nivel del mar incluso en cortos periodos de tiempo como en vuelos.

También podemos considerar como fuentes naturales a determinados alimentos que poseen isótopos radiactivos y el agua potable de forma que nuestro cuerpo también posee átomos inestables que se desintegran con el tiempo emitiendo radiación al exterior.

Por otro lado, las **fuentes artificiales** son aquellas producidas por el ser humano, entre ellas destacan las empleadas en la medicina como los rayos X y rayos gamma para diagnosticar enfermedades o para el tratamiento del cáncer u otras enfermedades. En la industria también se maneja el empleo de la radiación para beneficiarse de aplicaciones como las técnicas de radiografía, la medición de alimentos, el control de plagas etc. Una de las fuentes artificiales más conocidas son las centrales nucleares que emplean las reacciones de fisión nuclear para producir energía eléctrica. [6]

Aproximadamente el 84% de la radiación que percibe una persona en su vida proviene de fuentes naturales y un 16% de radiación médica, restando un pequeño porcentaje que es debido a otras fuentes artificiales (Fig. 1). De igual manera se sabe que la radiación proveniente del radón es la principal fuente natural, de manera que es prácticamente la mitad de la dosis

total recibida durante un año. La dosis total anual recibida por una persona según la organización (*Public Health England*) se aproxima a los 2.7 mSv de media al año. [7]

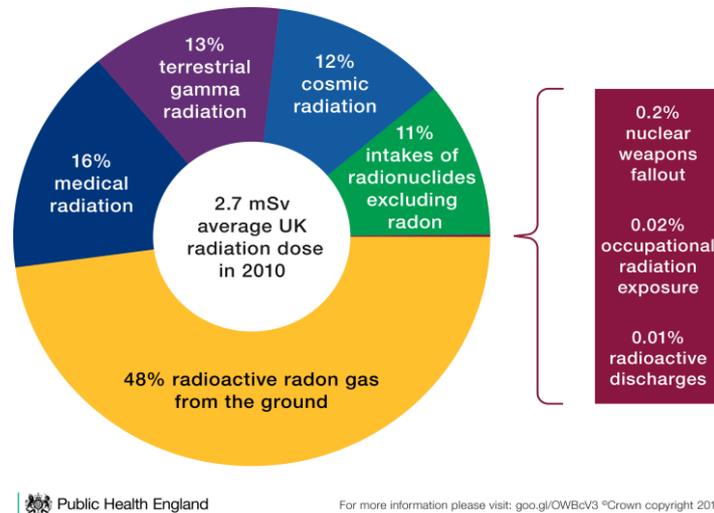


Fig. 1. Distribución de la procedencia de la radiación que recibe una persona anualmente. [7]

3.3. Radón

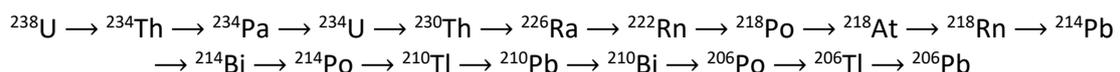
Debido a la gran influencia del radón en la vida de las personas es importante realizar campañas de medición para establecer el riesgo verdadero e investigar en los diferentes factores que propician este tipo de radiación natural y en la tecnología para la detección.

El radón (Rn) es un elemento químico con número atómico 86 perteneciente al grupo de los gases nobles, de manera que presenta una capa de valencia completa y poca reactividad con otros elementos. Es un gas monoatómico con símbolo (Rn) y masa media aproximada de 222u. Hay 37 isótopos diferentes de radón, todos ellos radiactivos y de los cuales solo 5 se encuentran de forma natural en el medio ambiente. El resto son isótopos artificiales generados en los laboratorios.

Isótopos naturales => ^{217}Rn ^{218}Rn ^{219}Rn ^{220}Rn ^{222}Rn

El isótopo 222 es el más abundante en la naturaleza suponiendo más del 80% de todo el radón ambiental y por tanto el que más afecta a la radiación absorbida por las personas. El tiempo de vida media de este isótopo es de 3.823 días y decae mediante la emisión de una partícula α en ^{218}Po . Sus descendientes también emiten partículas α siendo por tanto radiactivos. [8,9]

De forma natural el radón proviene de la serie de desintegración del urani-238 el cual es un elemento que se encuentra en la Tierra y posee un tiempo de vida de 4510 millones de años.



Otros datos del radón son:

Radio atómico	120 pm (radio de Bohr)
1º energía de ionización	1037kj/mol
Densidad	9.73 kg/m3

Punto de fusión	202 K (-71°C)
Punto de ebullición	211.3k (-62°C)
Entalpia de vaporización	16.4 kJ/mol
Entalpia de fusión	2.89 kJ/mol
Calor específico	94 J/(K*kg)

Tabla. 1. Datos físicos característicos del radón. [10]

El radón que es un gas incoloro e inoloro se produce de forma natural por la desintegración del radio 226 contenido en las rocas. Que a su vez procede de la desintegración del uranio. La mayor concentración de radón se produce en el subsuelo a 1 metro de profundidad, y de ahí se filtra por los poros del terreno a la atmósfera. En los suelos porosos, como los arenosos o las gravas, se produce una mayor emanación de radón que en suelos compactos o arcillosos, en los que los gases se filtran con mayor dificultad. Aunque como norma general hay más radón en zonas graníticas que en zonas arcillosas o calcáreas, debido al alto contenido en uranio en estos suelos graníticos.

La presencia de radón emanada por la tierra varía según factores ambientales como la humedad, la presión atmosférica, la temperatura o la época del año. La temperatura es el factor que más influye en la concentración dentro de los edificios, produce la compactación del suelo con las temperaturas más bajas reduciendo el radón emanado. Afecta en la ventilación habitual de las viviendas mediante las costumbres de abrir más las ventanas en los meses calurosos. También la diferencia entre la temperatura exterior e interior de los edificios influye aumentando la concentración de radón en las horas más tempranas del día donde dentro hay más calor que en el exterior. Por otro lado, cuando aparecen bajas presiones o borrascas en un área la exhalación de radón aumenta a diferencia de las altas presiones que dificultan el escape al exterior del gas. [11]

3.4. Efectos para la salud

Un elemento radiactivo emite radiación que interactúa con nosotros de manera nociva. Cuando la radiación ionizante llega a una célula e incide en la cadena de AND puede ocasionar un daño en esta. Por lo general este daño es reparado, pero hay circunstancias en las que no se repara y la célula cambia su comportamiento pasando a ser una célula cancerígena, la cual se reproduce de manera descontrolada y de forma negativa para el cuerpo.

El radón es un gas que se encuentra en el aire, como la radiación que emite son partículas alfa, la epidermis protege a las personas, pero el problema aparece cuando el radón entra en los pulmones, los cuales no están protegidos, al inhalarlo con la respiración una pequeña cantidad de radón es capaz de desintegrarse en nuestro interior emitiendo partículas alfa. Por otro lado, sus hijos son capaces de adherirse al tejido pulmonar continuando la emisión de partículas alfa y provocando efectos lesivos en estas estructuras biológicas hasta que se genera un isótopo estable.

Este efecto provoca que el radón se considere la segunda causa más importante de cáncer pulmonar después del tabaco. Según el artículo *"Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the fase of this health problem?"* (Pérez-Ríos, M., Barros-Dios, J.M., Montes-Martínez, A. et al., 2010) la mortalidad por cáncer de pulmón atribuible exclusivamente al radón oscila entre el 3% y el 5% para exposiciones al radón con valores de 37 Bq/m³ 148 Bq/m³. [12] En el caso de combinar el efecto del radón con el tabaquismo la mortalidad asciende al 22% en las exposiciones más altas. Estos datos concuerdan con otros

ofrecidos por la EPA (*Environmental Protection Agency*) en Estados Unidos que establece que el radón participa en el 25% de los cánceres de pulmón. [13] Según la WHO (*World Health Organization*) establece este porcentaje entre el 3% y el 14% y explica que por cada 100 Bq/m³ que aumente la exposición media de radón a largo plazo este riesgo aumenta un 16%. [14]

3.5. El radón en viviendas

La población en general se ve expuesta a niveles notables de radón principalmente en viviendas, lugares de trabajo, escuelas y cualquier otro edificio donde se pasa tiempo de forma habitual. Estos niveles de radón en los edificios dependen de las características de la roca y el suelo sobre el que están edificadas. El gas que es emitido desde el subsuelo penetra al interior de los edificios a través de grietas en el piso o las paredes, los empalmes en las construcciones o los espacios que quedan en los cimientos alrededor de las tuberías, varillas o bombas. Se prevé y se obtiene por tanto que las concentraciones más elevadas de radón estarán en los pisos inferiores de cualquier edificio principalmente en sótanos y plantas inferiores al nivel del suelo circundante. Aun así, también se encuentra en las plantas superiores ya que el radón las alcanza mediante procesos de convección.

La exposición al radón también puede surgir por parte de los materiales empleados en la construcción, ya que pueden ser fabricados con componentes que pueden emitir radón. Casi cualquier material de construcción hecho de sustancias naturales, incluyendo cemento y yeso, pueden que emitan algún nivel de radón, esta contribución supone entre el 15% y 20% del radón que se encuentra en el interior de la vivienda. También existe una pequeña contribución debida al radón proveniente de las aguas subterráneas debido a que el agua absorbe el radón de las rocas en forma de burbujas que luego son expulsadas una vez el agua llega a la vivienda. Hay que tener en cuenta que el radón absorbido durante la ingesta de agua no supone un problema ya que la radiosensibilidad del estómago es mucho menor que la de los pulmones y por tanto no se ve tan afectado por la radiación. [6,15]

3.6. Legislación y normativa

Como el radón supone un riesgo para las personas, las diferentes organizaciones tanto internacionales como nacionales han intentado confeccionar una serie de leyes preventivas con el fin de minimizar el problema que supone la exposición a esta radiación natural.

En un primer momento, en los países de la Unión Europea se acordaron una serie de medidas para proteger a la población de los riesgos del radón (Recomendación 90/143 EURATOM). Si bien las recomendaciones no tenían un carácter obligatorio. Por parte de la Comunidad Europea se recomendaba que las viviendas de obra nueva cuenten con niveles de radón inferiores a 200 Bq/m³, pudiendo doblar dicho límite para hogares ya construidos. En aquel momento el valor máximo admitido era de 400 Bq/m³ para viviendas previas a la norma. [16]

Actualmente, el 8 de febrero de 2018 entró en vigor la Directiva Europea (2013/59/Euratom) del año 2013. En donde la concentración de referencia en los hogares y centros de trabajo se situó en 300 Bq/m³. Posteriormente dicha norma ha sido transpuesta dentro del nuevo Código Técnico de la Edificación (CTE), aprobado el 20 de diciembre de 2019. El Real Decreto 732/2019 de 20 de diciembre incluye una nueva exigencia básica de salubridad HS6 de protección frente al gas radón, que supone una transposición parcial de la directiva europea, por lo que se establecen las normas de seguridad básicas para la protección contra los peligros derivados de la exposición a radiaciones ionizantes. En esta nueva sección del Código se recogen las medidas reglamentarias para limitar la penetración del radón en los edificios en

función del riesgo de radón del municipio en que se ubiquen, usando como valor de referencia los 300 Bq/m³. [17,18]

3.7. Series temporales

Las medidas de radón se pueden realizar de dos maneras, empleando un método pasivo en el cual se coloca un detector, que capta una medida del radón ambiental a lo largo de un periodo de tiempo extenso, o mediante un método de medición continuo el cual detecta diferentes concentraciones de radón a lo largo del tiempo. Del método continuo se extrae un conjunto de valores cada uno correspondiente a un instante de tiempo, de esta forma se obtiene una serie temporal.

Una serie temporal es una secuencia de observaciones, medidas en determinados momentos de tiempo, generalmente espaciados de manera uniforme y ordenados cronológicamente. Las series temporales se pueden descomponer en tres componentes cuya actuación conjunta genera los valores.

- Tendencia (T_t): Es el cambio de la media a largo plazo, se identifica como un movimiento suave de la serie.
- Estacional (E_t): Simboliza la periodicidad de la serie, recoge las oscilaciones periódicas que suelen estar causadas por ciertos fenómenos. Pueden tener diferentes periodos como, por ejemplo: diaria, semanal, mensual, anual, etc.
- Aleatoria (I_t): Esta componente no sigue ningún patrón de comportamiento, es resultado de factores aleatorios.

Las diferentes componentes que construyen la serie temporal actúan entre ellas de diferentes maneras en cada caso. Los más comunes son el modelo aditivo donde los diferentes términos se suman para obtener la serie temporal y el multiplicativo en el que los términos se multiplican. [19]

$$X_t = T_t + S_t + I_t \quad (8)$$

$$X_t = T_t \cdot S_t \cdot I_t \quad (9)$$

De forma general las series pueden ser:

- Estacionarias: Es una serie estable a lo largo del tiempo, la media y la varianza son constantes pese a la oscilación de los valores.
- No estacionaria: La serie posee tendencia y por tanto la media varía a lo largo del tiempo.

6. Objetivos

Summary

The objectives pursued by the work are divided into two blocks. The first of them focuses on obtaining the data through a passive measurement of the concentration levels in the classrooms of different institutes, in addition it is also proposed to achieve different results with which its can make a bibliographic comparison with other articles and with the Spanish legislation. The second block of objectives is focused on the statistical study of a series of radon measured by a continuous method and trying to use data from other atmospheric variables to understand the dynamics and behavior of radon emissions.

Para realizar este TFG se plantean inicialmente una serie de objetivos, de manera que exista una correlación entre el punto de partida y la meta alcanzada. En primer lugar, hay que tener en cuenta que este trabajo engloba dos proyectos diferentes, de forma que coexisten dos grupos de objetivos diferentes para los cuales previamente hay que obtener una base de conocimientos mediante la búsqueda de información sobre las emisiones de radón en el entorno.

El primer objetivo de este TFG se centra en realizar una investigación completa sobre los niveles de radón a los que está expuesto tanto el personal educativo como los alumnos en los institutos de la isla de Tenerife. Para conseguir realizar correctamente este bloque se fijan unos subobjetivos que marcan el procedimiento a seguir durante la toma de datos y el posterior procesado que conllevan. En primer lugar, se fija como objetivo realizar un buen trato con los diferentes centros implicados en el proyecto, de forma que el préstamo de sus instalaciones para las mediciones no suponga ningún problema, y permanezcan informados en todos los procedimientos que se realicen relacionados con ellos.

Otro punto a tener en cuenta es la correcta medición de datos siguiendo el procedimiento establecido, indicado posteriormente en el apartado 6 del método experimental. Con el objetivo de aportar la máxima fiabilidad posible a los datos se pretende generar un sistema metódico y prestar cierta atención al trabajo realizado por los laboratorios externos encargados del análisis de los detectores. También se pretende presentar los datos de una manera sencilla y de fácil explicación con el fin de facilitar la divulgación de los mismos, permitiendo a los centros transmitir la información al alumnado o facilitando el contraste con datos futuros de radón en la isla.

Se plantea también contrastar los datos con informes de otras mediciones de radón obtenidos en otros lugares. Obteniendo unas conclusiones sobre la calidad de los niveles y el riesgo que supone para las personas que destinan tiempo en ese entorno. Comparar finalmente los niveles con la legislación y las regulaciones que se llevan a cabo en España, con el fin de asemejar este trabajo dentro de lo posible al trabajo realizado constantemente en los laboratorios certificados y encargados de proteger a la población con este tipo de mediciones.

El segundo objetivo es el tratamiento de datos de radón medidos de forma continua en el laboratorio del FIMERALL, estos datos han sido obtenidos con una instrumentación capaz de detectar diferentes variables de forma simultánea. En este trabajo se pretende inicialmente analizar la instrumentación y exponer el procedimiento de la toma de datos, para luego pasar a un análisis estadístico de los mismos.

Mediante una serie de reuniones con los tutores se plantea la estructura de TFG, de igual manera se hace entrega de los datos tomados en el laboratorio. Se plantea el objetivo de realizar un análisis de estos datos mediante el programa de análisis estadístico RStudio, con el cual obtener los resultados deseados, consiguiendo extraer el máximo partido a los datos iniciales. También se plantea el modelaje de los datos con el fin de que el análisis realizado para las medidas del laboratorio se pueda emplear para cualquier serie temporal del radón, progresando así en el conocimiento no solo de series temporales, también en el del tratamiento de los datos que presentan las medidas en continuo de diferentes variables.

El objetivo final de esta segunda parte es comprender mejor la dinámica o el comportamiento de los niveles de radón en el interior de una vivienda, inmueble, etc. Obtener

un modelo estadístico que permita describir dicha dinámica, mediante la aplicación de los resultados obtenidos durante el trabajo.

Como objetivos globales de este TFG, se incluye la realización de este documento escrito y su posterior presentación ante un tribunal. También destaca potenciar los métodos de trabajo autónomo, investigación y la realización de proyectos donde la responsabilidad recae en el alumno. En este trabajo se pretende plasmar tanto las capacidades adquiridas durante el grado de física como los nuevos conocimientos adquiridos en esta asignatura finalizando así la formación necesaria para superar el grado.

7. Metodología

Summary

This section summarizes the steps taken during the projects to obtain the results. The first project explains how the placement and collection of detectors have been organized with an interval of three months of measurement. It also comments on the didactic project carried out with the exhibition of informative talks to the students of the different centers. The last part of this first project shows what the data processing has been by explaining the transformation of the raw data to comparable results with other articles.

In the second project, the methodology section contains the technical information of the measurement carried out as the instrumentation used. In addition, the statistical approach is presented by introducing the steps that are followed in the study of normality, stationary, autocorrelation, cross-correlations with other variables and Fourier transform. Finally, the optimization of an autoregressive model that allows predicting the behavior of the time series is discussed.

Con los objetivos iniciales planteados, el siguiente paso es comenzar con el trabajo científico, realizando la toma de datos y desarrollando las ideas principales de cada proyecto. En este apartado se explicará el procedimiento seguido en cada caso, la instrumentación utilizada y la organización tanto del tiempo dedicado como del volumen de trabajo.

7.1. Método de medición pasivo

Este TFG inicialmente se planteó centrado en el proyecto de medir radón en los diferentes institutos, fue a posteriori que se amplió para albergar la sección de medición y análisis de mediciones de radón en continuo. Es por este motivo que la mayor parte del tiempo, inicialmente se dedicó a la organización y realización de esta parte del trabajo. Lo primero que hubo que tener en cuenta en los cálculos del tiempo de realización fue el tiempo de medición pasiva, durante el cual se tomarían los datos. Para este caso el tiempo de exposición fue de tres meses durante los cuales los detectores debían estar colocados en las diferentes aulas sin ser manipulados. Este espacio de tiempo es considerable teniendo en cuenta que luego los detectores deben ser recogidos y enviados a analizar en un laboratorio especializado. Estos tiempos de espera supusieron ciertos inconvenientes y el planteamiento de la medición en continua, la cual no traía consigo ningún tiempo de espera inicial, únicamente se centraba en la búsqueda bibliográfica y el análisis estadístico de los datos.

En los primeros meses junto con el planteamiento de los objetivos y las metas temporales comentadas, fue necesaria una búsqueda de información centrada en el radón, sus características y la importancia de los estudios en este campo. Este proceso de búsqueda trata de actualizar y concienciar, además de ser una introducción necesaria para este trabajo, puesto

que permite obtener mejores conclusiones cuando se realicen los análisis de los datos. En esta parte es importante centrarse en las fuentes más fiables de información, bien contrastadas y encontrar los datos más actuales posibles. Esta información recopilada aporta una base dentro del tema que se plasma en la creación del primer apartado introductorio de este trabajo.

Para seguir con la cronología, lo primero fue pedir los detectores, buscando laboratorios certificados que ofrecieran el servicio de análisis de radón. Estos laboratorios deben contar con el certificado ISO-11665-4, que les permite realizar medidas de acuerdo con la normativa establecida en el país. Para este trabajo se contactó con dos de ellos, el primero fue el laboratorio LARUC empresa asociada a RADUCAN, localizado en Cantabria, sin embargo, para el segundo encargo de detectores se pasó a colaborar con el laboratorio privado AGQ-Labs situado en Sevilla. Ambos laboratorios suministraron los mismos modelos de detectores, categorizados como detectores de trazas nucleares en estado sólido (SSNTD). [20,21]

Tal como se muestra en la figura 2 izquierda los detectores son pequeños dispositivos cilíndricos con una cavidad interna donde se encuentra una pequeña pieza de plástico CR-39 (Fig. 2 centro), también conocido como PADC. Esta pieza capta la energía liberada en una fisión de un átomo de radón dejando una marca minúscula representada por un punto negro. Cuando el plástico está en contacto con el aire de una habitación va a registrar las sucesivas reacciones que suceden en su entorno, de manera que cada proceso dejará una marca visible tras un proceso de revelado químico. Dicho revelado se realiza en medio cáustico en caliente (NaOH 1M, 80°C), durante dicho proceso las pequeñas alteraciones del polímero crecen y se hacen visibles a escala micrométrica. Para el análisis de los detectores los laboratorios acreditados emplean microscopios con microcámaras, los cuales toman una imagen del CR-39 (Fig. 2 derecha) para permitir realizar una cuenta automatizada de las trazas registradas.

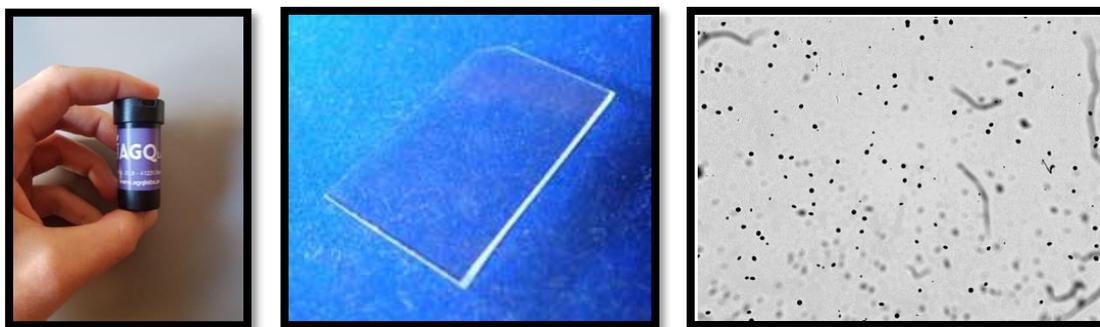


Fig. 2. (Izquierda) Detector pasivo de radón. (Centro) Lamina de plástico CR-39 [22] (Derecha) Imagen tomada con un microscopio donde se muestra las trazas de radón.

A partir del número de trazas detectadas en el detector pasivo y el tiempo de exposición se puede obtener el valor de la actividad de gas radón o concentración con la Ec. (10). Los detectores adquiridos para este trabajo poseen un plástico CR-39 con una superficie efectiva de 10.7 mm² y el factor de conversión de $40 \frac{kBq \cdot mm^2 \cdot h}{m^3}$, de manera que para un detector concreto solo es necesario tener el tiempo en horas que el detector ha estado expuesto al aire de una habitación.

$$\text{Concentración} \left[\frac{Bq}{m^3} \right] = \frac{\text{n}^\circ \text{ de trazas} \cdot \text{factor de conversión} \left[\frac{kBq \cdot mm^2 \cdot h}{m^3} \right]}{\text{superficie} [mm^2] \cdot \text{tiempo} [h]} * 1000 \left[\frac{Bq}{kBq} \right] \quad (10)$$

En este caso el proceso de medida ha superado los tres meses. En noviembre de 2020 se comenzó a contactar con los diferentes institutos de la isla, con el fin de informar del proyecto y pedir prestadas las instalaciones para colocar los detectores. Este trabajo se dividió entre tutor y alumno para facilitar la organización de las fechas programadas y la comunicación con los diferentes centros. Con el fin de que los centros no negaran la participación se propuso ofrecer una compensación mediante la realización de charlas informativas a los alumnos y una pequeña práctica donde los mismos alumnos podrían aprender el proceso de medición que se estaba llevando a cabo en sus aulas. Durante el mes de diciembre comenzó la colocación de los detectores, los cuales desde el laboratorio venían cerrados en bolsas de aluminio, para que no estuvieran en contacto con el aire durante su transporte. Una vez abiertos se colocaron directamente en un lugar discreto donde no produjera ningún tipo de molestia. Es importante tener en cuenta que los detectores deben estar alejados de puertas y ventanas tratando de no situarlos donde haya corrientes de aires ya que solo en lugares donde el aire se mantenga estático se obtienen buenas medidas. También interesa que el detector se sitúe a una cierta distancia de paredes y suelo (30- 50 cm) para que las medidas sean lo más neutrales posibles y no se vean alteradas por la cercanía a las fuentes emisoras de radón.

La colocación de los detectores fue un trabajo que supuso ciertas complicaciones, puesto que los profesores informaron que por motivos de sanidad las ventanas y puertas permanecían abiertas prácticamente todo el día. Además, en las aulas de muchos centros no disponían de lugares tranquilos y discretos donde los alumnos no intervinieran en la medición mediante la manipulación o sustracción de los detectores. Estos contratiempos se trataron de solucionar con los profesores mediante la selección de las mejores aulas y la colocación de carteles informativos cerca del detector para procurar la seguridad de este. La Fig. 3 muestran los lugares escogidos para algunos de los detectores y los carteles correspondientes, en ambos casos se colocó el detector sobre un armario que había pegado a una pared.



Fig. 3. Lugares de colocación de los detectores con sus correspondientes carteles informativos.

Con el fin de llevar un seguimiento de los detectores en cada centro se han colocado 5 detectores los cuales cada uno dispone de un código de identificación, que permite tenerlo localizado durante todo el proceso de toma de datos y posterior análisis. En cada centro, durante la colocación se ha rellenado una hoja, (mostrada en el anexo), donde se indica el aula, el piso, el número de alumnos del aula y las horas lectivas en el aula. Con esta información no solo queda bien localizado cada detector, sino que también se puede observar el riesgo que supone el radón para cada grupo de alumnos. En la ficha técnica también se coloca la fecha de entrega con el fin de controlar el tiempo de exposición de cada detector y los datos de la persona de contacto del

centro. En total fueron 18 centros educativos repartidos por toda la isla los que participaron en el proyecto, la localización de estos centros se muestra en la figura 6 cuyas coordenadas se recogen en la tabla 8 del anexo junto con las fechas de colocación y recogida de cada centro.

La gran mayoría de los detectores fueron colocados antes de las navidades con la intención de que pasaran las navidades en activo. La intención fue incluir esta época donde las aulas están vacías y por tanto disminuye el riesgo de pérdida o manipulación de los detectores, además de que las aulas permanecen parcialmente cerradas, propiciando un aumento del gas radón y permitiéndose compensar la excesiva e inusual ventilación debida a las medidas preventivas por la pandemia. También fue importante ajustarse a esta fecha para poder tener tiempo tras las mediciones para el análisis de los detectores y de los datos obtenidos.

Durante los tres siguientes meses se dedicó el tiempo al análisis de los datos en continuo, junto con la realización de charlas didácticas en los centros implicados. A cada centro se le ofreció la posibilidad de dar una charla presencial o telemática a uno o varios grupos de alumnos Fig. (4 Izquierda). Esta tarea también se dividió con el tutor repartiendo los centros con el fin de disminuir la carga de trabajo. La gran mayoría de los centros prefirió una charla presencial para mejorar el contacto con los alumnos, de forma que se realizaron principalmente en salas de conferencias o salones de actos. La charla cuenta con una introducción al tema de la radiación ionizante, centrándose en la radiación natural y concluyendo con la profundización en el radón, mencionando el origen, consecuencias para la salud, protocolos e instrumentación de medida, legislación, medidas de mitigación etc. En todas las sesiones de charla se realizó una posterior ronda de preguntas donde los alumnos podían aclarar dudas sobre lo explicado y preguntar acerca de otras inquietudes que les surgieran y que tuviera lugar preguntar a un estudiante de física. Las charlas supusieron varias horas de trabajo que permitieron mejorar los conocimientos en el tema y tener la experiencia de introducirse en la divulgación científica por parte del estudiante.

La realización de las charlas se prolongó durante dos meses, de forma que para mediados de marzo se habían impartido prácticamente la totalidad. Restaba únicamente la recogida de los detectores de cada centro, que se realizó rápidamente una vez pasado el plazo de los tres meses de medición. En esta parte del trabajo se encontró que la mayoría de los centros presentó alguna pérdida de detectores, por lo general se limitó a uno por centro, aunque algún caso llegó a dos desapariciones, que se achacaron principalmente a los alumnos que asistían a clases en las respectivas aulas. Aun así, la mayoría de los detectores fueron recuperados sin problemas, y mediante el procedimiento correcto, el cual se trata de envolver en platina los detectores con el fin de no modificar los datos durante el traslado al laboratorio de análisis. El papel de aluminio impide que entre aire en el dispositivo e impide que el radón exterior al dispositivo sea detectado. Un ejemplo de este tratamiento se muestra en la figura (4 Derecha) donde además los detectores se trasladan en un táper para mejorar el control de estos.



Fig. 4. (Izquierda) Fotografía de la charla en el IES Tegueste. (Derecha) Detectores envueltos en papel de aluminio preparados para el envío.

Con los detectores recogidos se procedió a realizar un envío a los laboratorios acreditados en Sevilla y Cantabria. Los laboratorios especializados se encargaron posteriormente de emplear la instrumentación necesaria y realizar el envío de un informe de los datos obtenidos en cada detector. Este informe trae los datos aportados por el cliente sobre las fechas y el lugar de exposición y aporta los valores de la exposición en $[(\text{kBq} \cdot \text{h}) / \text{m}^3]$, y la concentración en $[\text{Bq}/\text{m}^3]$, junto con un valor de incertidumbre asociado. A los laboratorios de medición se les puede exigir ciertas condiciones durante la medida, pero en este caso no se indicó ninguna normativa y tampoco hubo incidencias en ninguno de los ensayos realizados. En esta etapa del proceso surgieron algunos problemas relevantes. El primero, fue las dificultades que surgieron en algunos envíos, los cuales se retuvieron en aduana demasiado tiempo impidiendo que llegaran a los laboratorios a tiempo para obtener los datos y utilizarlos en este trabajo. De manera que la lista de institutos con datos útiles se redujo a 13. Por otro lado, en los datos recibidos de los laboratorios resultó que varios detectores tenían valores inferiores al límite de detección, que por lo general se encontraba en torno a los 10-15 $[\text{Bq}/\text{m}^3]$.

La última parte de este proyecto consistió en realizar la estadística de los datos, empleando gráficos con los que representar los diferentes valores obtenidos y que permiten compararlos para obtener la máxima información posible. Uno de los puntos a tratar dentro del análisis de datos ha sido la realización de un mapa de Tenerife donde los institutos queden representados en función de los niveles de radón registrados, para ello ha sido necesario buscar las coordenadas de cada instituto e introducirlas para su posterior procesado en R-Studio.

Dentro de los resultados obtenidos también se incluyen los cálculos de la dosis anual recibida por los alumnos de las aulas siguiendo la Ec. (11). Además, se procura obtener conclusiones, empleando los datos y los conocimientos previos obtenidos en la búsqueda de información, también contrastando los datos con otros informes y/o publicaciones similares que midan el radón en instalaciones públicas dentro y fuera de España, y con una comparación de los valores establecidos en la legislación y en las recomendaciones de las organizaciones referentes en el tema.

$$D_{Rn} \left[\frac{\text{mSv}}{\text{año}} \right] = C_{Rn} \cdot D \cdot H \cdot F \cdot T \quad (11)$$

Donde:

- C_{Rn} = Concentración de radón $[\text{Bq}/\text{m}^3]$

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

- D = Factor de conversión de dosis ($9 \cdot 10^{-6}$ [mSv· m³/ Bq · h])
- H = Factor de ocupación (0.14)
- F = Factor de equilibrio (0.4)
- T = Tiempo de ocupación ($24 \cdot 365= 8760$) [h/año]

7.2. Método de medición continuo

El otro objetivo de este TFG se realizó durante los tiempos de espera del proyecto anterior, completando así el horario y el contenido. Aunque inicialmente el trabajo consistía únicamente en medidas de forma pasiva en los institutos, se sugirió establecer un estudio de medidas de radón continuo donde los datos vienen dados en función del tiempo. Este tipo de medidas permite realizar una estadística más profunda y por tanto para este trabajo sirvió de introducción a la programación en R-Studio que fue el lenguaje empleado en todos los ejercicios realizados.

Los datos empleados en esta parte del trabajo fueron registrados en el laboratorio de radiactividad del FIMERALL. Las medidas comenzaron el día 7 de junio de 2018 y terminaron el día 15 de noviembre de 2018. Los registros de Radón y variables ambientales (presión, temperatura, humedad) se adquirieron cada tres horas durante un total de 161.25 días que equivale aproximadamente a 5 meses. Para la medición del radón en continuo, se empleó el instrumento Radon Scout PLUS (Fig. 5), el cual es uno de los mejores detectores de radón en continuo del mercado actual. Entre sus características destacan una sensibilidad muy alta con 1.8 cpm/kBq/m³ y un rango desde 0 hasta 2 MBq/m³ con un error de $\pm 5\%$. Además, el aparato es ideal para hacer estudios de radón, ya que también mide otras variables atmosféricas como la presión, la temperatura y la humedad de forma simultánea. El instrumento mide el radón con una cámara de medición equipada con un detector de semiconductores de silicio y una colección de alto voltaje. Por tanto, cuando un átomo de radón se fisiona en el interior de la cavidad la energía desprendida es captada por el silicio que transmite un fotón posteriormente amplificado para su detección electrónica. Otra ventaja muy relevante que posee este instrumento es que ha sido certificado por la US-EPA/ NRSB y tiene un certificado de calibración que cumple los requisitos de la DIM ISO EN 17025. [22]



Fig. 5. Detector de radón Radon Scout PLUS. [23]

Los datos registrados fueron cedidos por el tutor Pedro Ángel Salazar con el fin de completar el trabajo, añadiendo una sección extra que sirve de introducción para la parte estadística de este trabajo. El planteamiento de este trabajo surgió durante la etapa de colocación de detectores, posteriormente comenzó a trabajarse el tema conceptualmente para

adquirir los conocimientos necesarios en el ámbito matemático y tras diferentes charlas con el tutorado se decidió los puntos a tratar en este apartado.

Es por ello que inicialmente se planteó realizar un estudio estadístico descriptivo de los datos (estudio de normalidad, estacionariedad, homocedasticidad, correlaciones con variables exógenas, etc). Para posteriormente realizar un estudio en el dominio del tiempo y de la frecuencia usando las funciones de autocorrelación y la transformada de Fourier, respectivamente. El objetivo de este estudio era comprobar si las variaciones temporales de las medidas registradas eran aleatorias o por el contrario siguen algún patrón cíclico. Posteriormente se planteó el empleo de técnicas de análisis temporal como modelos autorregresivos y de medias móviles (ARIMA) para proponer una fórmula sencilla que permitiese describir las variaciones de radón con respecto al tiempo. Si bien en el presente trabajo no se profundiza en los conceptos matemáticos y el modelado, si se da una pincelada y se arroja algo de luz a la dinámica temporal del radón. Es decir, como se ve a posteriori, las fluctuaciones del gas radón a lo largo del día están controladas por las variables atmosféricas y presenta un comportamiento que se puede correlacionar con los valores anteriores. En definitiva, las variaciones intradías no son aleatorias (ruido blanco) si no que siguen un patrón determinado por las variables exógenas y su propia dinámica.

8. Resultados

Summary

The results of the passive method begins by introducing a map where the institutes that have collaborated with the work are located and shows the average values of the radon concentration of each one, in order to determine the existence of a geographical factor that influences the data obtained. Subsequently, an analysis of the raw data is performed with the representation of a histogram and the main statistical data (mean, median, geometric mean, standard deviation, ...).

With the main analysis resolved, a study is carried out according to the center, for this a box-plot is made that allows to check the differences and find the centers that stand out the most. In this section it is found that two of the centers have values considerably higher than the average. An analysis is also carried out depending on the floor of the building where the data have been taken, obtaining another box-plot with the four floors used in the placement of the detectors. It is found that there is a non-significant trend where smaller plants have a higher concentration of radon. The final part of this section of results presents the dosimetry obtained by the institute and the comparison of the means obtained on the island of Tenerife with the data obtained in other European countries.

The second section of the results describes the statistics of continuous measurement. It begins by plotting the time series obtained (radon, temperature, pressure, relative humidity) and offering the main data of each one. Then the normality of the radon series is studied by means of a qq-plot, a box-plot and different normality tests, obtaining that the data set does not follow a normal distribution.

The next process that is worked is the decomposition of the series by the additive and multiplicative method, resulting in the second a better option when analyzing the residues of each case. There is also an autocorrelation, partial correlation and cross-correlation of the values with the different atmospheric variables, highlighting the importance of temperature in the

variations of radon concentration. By calculating periodograms, the existence of intraday cycles that govern the behavior of the series is confirmed. The last is a predictive model of ARIMA moving average, with which 20 possible values that precede the time series are obtained.

8.1. Método de medición pasivo

Anteriormente se ha explicado cómo los diferentes detectores colocados en los diferentes institutos de la isla han aportado datos a este trabajo. Los datos permiten extraer resultados y conclusiones que se repasan a continuación. El proyecto contaba con 18 centros los cuales habían aceptado colaborar con nosotros, todos ellos han sido representados en el mapa de la figura 6. Los centros aparecen repartidos por toda la isla, aunque no de forma equitativa, ya que se ha priorizado los centros que han ofrecido un contacto más rápido y con localizaciones más cercanas. Aun así, se ha conseguido muestras en varios puntos sobre todo en la zona más al norte y densamente poblada y en el sur de la isla. Hay que tener en cuenta también que en el centro de la isla debido a la orografía no se dispone de ciudades o pueblos con centros educativos, de forma que no se han tomado muestras en esta área.

El mapa se ha realizado mediante un contorno dado por un conjunto lo suficientemente grande de puntos en coordenadas del sistema UTM, de manera que se aprecie como un continuo representado la isla de Tenerife. A posteriori se han añadido los puntos correspondientes a los centros mediante la búsqueda de las coordenadas de cada centro en el mismo sistema empleado. Los puntos negros del mapa son los 5 institutos cuyos detectores no pudieron analizarse a tiempo para este trabajo debido a retrasos en la aduana. De forma que solo se han colocado en el mapa de forma informativa y para una futura adición de los datos obtenidos. Por otro lado, los demás colores muestran los institutos cuyas medidas se han registrado correctamente.

Para cada instituto se ha realizado la media aritmética de los valores registrados por los diferentes detectores colocados en las aulas. De forma que los colores representados en el mapa nos indican el valor de esta media, entre más rojo es el punto observado mayor es la concentración que se ha registrado durante los tres meses. Mientras que en los puntos verdes y amarillos las concentraciones son menores, por lo general por debajo de 100 Bq/m^3 , indicando que se ha medido muy poco radón en estos centros. Hay que tener en cuenta que la media de los detectores se ha realizado sin contabilizar los detectores perdidos durante el periodo de medición, que en total han sido 9. Pero si se han tenido en cuenta los detectores con valores inferiores al límite de detección los cuales fueron 12. Para estos detectores se ha realizado una estimación al alza, se ha supuesto que el valor registrado por ellos es el mismo que el laboratorio encargado ha establecido como límite de detección. En total han sido 56 detectores los que se han recuperado durante el proyecto y a los cuales se les ha asignado un valor sobre la concentración de radón medida en los tres meses expuestos en las aulas.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

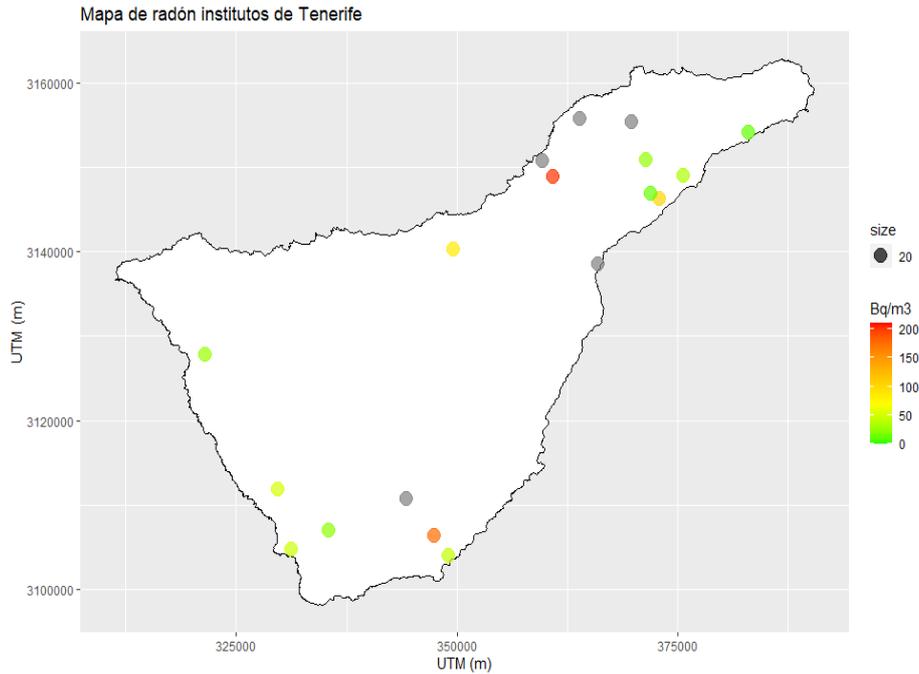


Fig. 6. Mapa de Tenerife donde los puntos negros corresponden con los centros que participaron, pero no se obtuvo los datos a tiempo y los puntos en color indica la concentración media en los centros con datos.

En el mapa se aprecia que la mayoría de los detectores posee un valor medio de concentración de radón bastante bajo, solo dos puntos destacan claramente, pero como estos puntos no están juntos no se puede establecer una zona en la isla con mayor concentración que otra. Incluso entre institutos muy cercanos como se aprecia en el área de Santa Cruz las diferencias son suficientemente grandes como para ver que el lugar geográfico no está siendo un factor determinante en las concentraciones obtenidas.

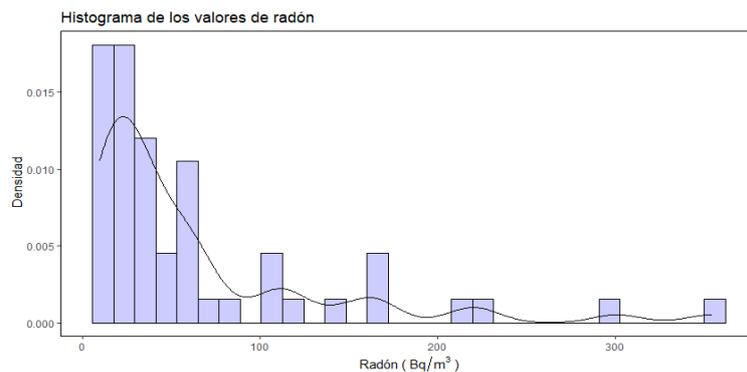


Fig. 7. Histograma con todos los valores de los detectores recuperados.

Con todos los datos registrados se ha realizado un histograma que muestra la densidad de detectores según el rango de valores obtenidos en cada uno de ellos Fig. 7. Se muestra como la mayoría de los detectores han dado valores inferiores a 50 Bq/m³. Sin embargo, hay valores que destacan bastante alejándose de lo más probable con valores mucho más altos a los 100 Bq/m³. Estos valores singulares por lo general se encuentran en conjunto dentro de los institutos cuyos valores medios superan los 150 Bq/m³ como se muestra en el mapa de la figura 6. De forma general se aprecia que la distribución de datos se presenta en forma de una distribución

normal logarítmica, la cual acumula los valores en la primera zona del histograma y luego decae rápidamente. También se puede obtener los datos básicos como la media, mediana y moda de los valores y otros datos relevantes como se muestran en la tabla 2. En estos datos destaca la comparación entre la media aritmética y la media geométrica, ya que los valores distan mucho. Esta discrepancia surge porque la media geométrica es menos sensible a los valores extremos y por tanto tiende a estar más cerca de los valores de la mediana y la moda. Hay que tener en cuenta que el valor de la moda registrado corresponde a los valores mínimos asignados a los detectores cuando estos estaban fuera del límite de detección.

Media	64.589
Mediana	35
Media geométrica	39.985
Desviación estándar	73.06
Rango intercuartílico	10, 20, 35, 66, 354
Test Lilliefors	p-value = $3.157 \cdot 10^{-9}$

Tabla 2. Datos estadísticos del conjunto de valores obtenido en los detectores.

Con los datos obtenidos se puede hacer un test de normalidad, aunque por el histograma ya se intuye que el resultado va a ser que la hipótesis nula no se cumple. Eligiendo el test de Lilliefors el cual se ajusta a esta muestra, se observa que el p-value es muy inferior al 0.05 necesario para que se acepte la hipótesis. Con esto ya se descarta totalmente la idea de que exista normalidad en los datos medidos.

Los datos de los detectores se pueden agrupar según el instituto donde han sido colocados para realizar un box-plot que muestre con mayor claridad la diferencia entre cada centro. En la figura 8 se muestra la caja correspondiente a cada instituto, cada una de ellas muestra el valor de la mediana mediante la línea central, que equivale al valor representado en el mapa. Con este box-plot se puede obtener mucha información, ya que muestra una representación muy simplificada con los datos más relevantes necesarios para comprar los valores obtenidos en los diferentes institutos. Aquí se observa como los institutos Magallanes y Sabino Berthelot, son los mismos que destacan por tener valores de concentración media cercanos a los 200 Bq/m³. También está representado los institutos que presentan muchos detectores en el límite de detección como pasa con los I.E.S. San Andrés y Las veredillas cuyas cajas no poseen apenas valores fuera de la media, diferenciándose de otros centros que poseen valores más distribuidos en torno a los 50 Bq/m³. Un detalle que se puede encontrar fácilmente en los box-plot son los detectores que han obtenido un valor lejos de la mediana del centro donde se han colocado, algunos ejemplos claros son los institutos: Sabino Berthelot, La Orotava y Adeje, que presentan un punto alejado de la caja que reúne los valores entre el percentil 25 y 50.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

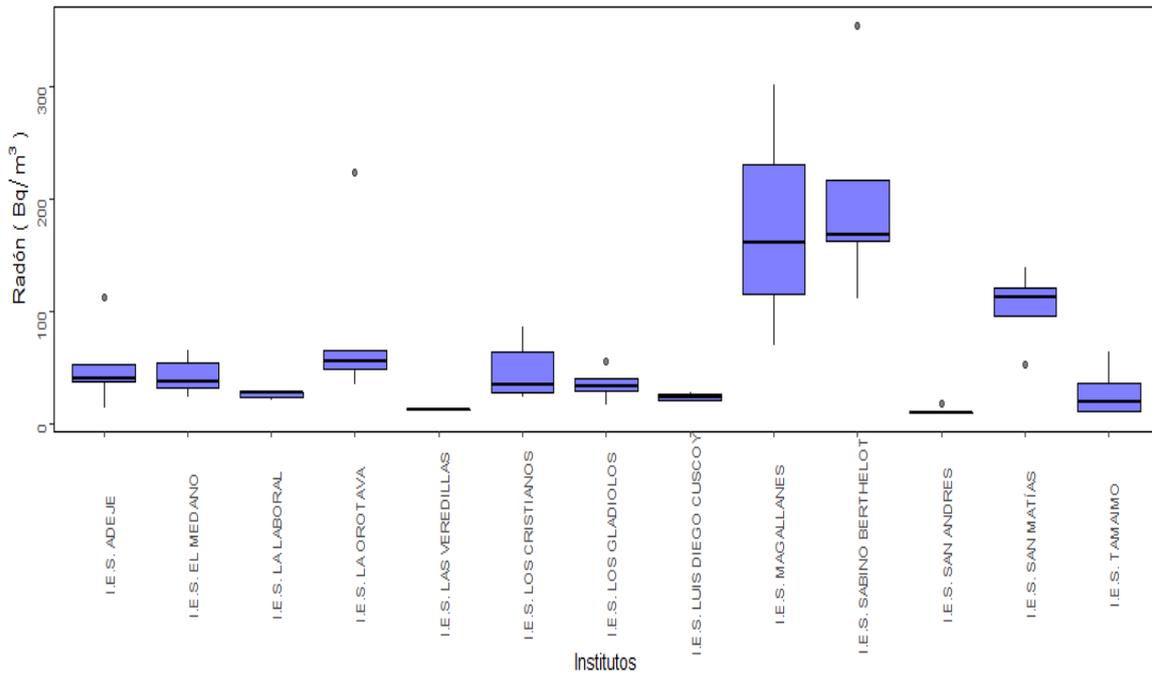


Fig. 8. Box-plot de los datos de los detectores organizados según el instituto donde se han colocado.

Con la comparación entre institutos ya realizada, se pasa a analizar los centros en particular para comparar de una manera más eficiente los valores obtenidos por cada detector. Previamente hay que tener en cuenta que como se muestra en box-plot de la figura 8 hay centros que no tienen detectores destacables entre las medidas obtenidas. Sin embargo otros presentan mayor discrepancia entre los valores obtenidos y por tanto se pueden representar como se muestra en la figura 9, donde se puede ver las diferencias entre valores de un mismo centro de forma más precisa. Estas gráficas muestran 6 ejemplos de los institutos más relevantes según la distribución de datos.

Rápidamente se identifica lo comentado anteriormente en los diferentes casos del box-plot, ya que los institutos Sabino Berthelot y La Orotava poseen un valor bastante alto que destaca sobre el resto. También se aprecia como para los demás centros los valores están más juntos y por tanto son muestras más homogéneas. Este efecto pudo haber sido producido por diferentes motivos, pero el primero que hay que tener en cuenta es la posición que han ocupado los detectores durante la medición. Hay que tener en cuenta como ha sido la ventilación de la habitación o aula donde se han colocado, además de la cercanía al suelo o las diferentes paredes. En la mayoría de los centros se encuentran valores muy cercanos al límite de detección (10- 15 Bq/m³), posiblemente debido a que los detectores han estado cerca de corrientes de aires y por tanto impidiendo que el radón se acumule en el área y se detectara, algunos ejemplos son: Los Gladiolos y El Médano (Fig. 9). Hay que destacar también que los centros Luis Diego Cuscoy y Los Gladiolos son ejemplos de centros con alguna pérdida de detectores en la etapa de medición, ocasionando la falta de valores tanto en las gráficas correspondientes como de forma general en todos los resultados. Por último, con los gráficos de la figura 9 se puede observar cómo en algunos edificios los datos son muy próximos y poseen valores muy similares como en Luis Diego Cuscoy, mientras que en otros las medidas abarcan un espectro más amplio y distribuido como es el caso de Los Cristianos.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

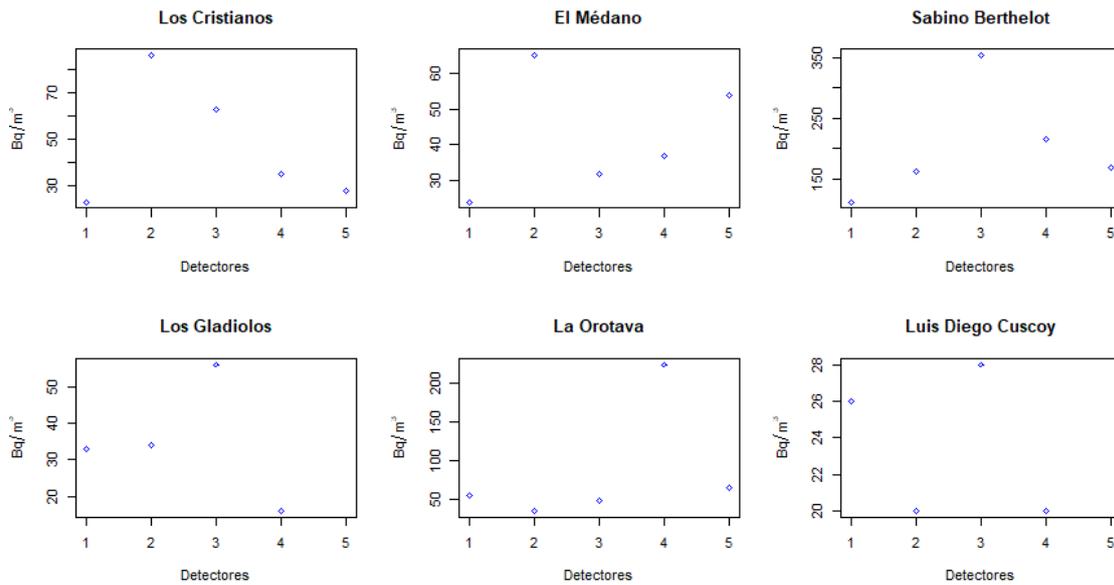


Fig. 9. Datos obtenidos en 6 centros diferentes (Los Cristianos, El Médano, Sabino Berthelot, Los Gladiolos, La Orotava, Luis Diego Cuscoy)

Durante la colocación de los detectores se consideró anotar no solo el aula donde medía cada detector sino también la planta en la que se encontraba el aula. Este proceso permite obtener una clasificación de los detectores según las plantas ocupadas durante el proyecto. Ofreciendo una nueva variable para estudiar, y obtener conclusiones. Con los valores obtenidos en función de las plantas se puede realizar un box-plot (Fig. 10), donde los datos se distribuyen entre las cuatro plantas empleadas en las medidas. Durante la colocación de los detectores se ha procurado tener mayor presencia en las plantas más bajas, aun así, se ha obtenido una buena distribución entre las plantas.

En la gráfica se aprecia como el piso 0 es el que tiene una distribución mayor, esto se debe a que fue la planta en la que más detectores se colocaron puesto que es la más común, ya que todos los centros cuentan con este piso y que en muchos de ellos es la más baja o incluso la única. Para comparar los diferentes box-plot es fácil emplear la mediana de los valores registrados en cada piso. Se observa que esta mediana es más alta en el piso -1 y luego va descendiendo a medida que se aumenta el nivel. Esto quiere decir que hay una ligera tendencia en los valores de la media que decrece en función del piso. Sin embargo, es una tendencia no significativa debido a que la diferencia entre los valores de estas medianas es bastante pequeña. Además, hay valores que estando en un piso inferior son superiores a la mayoría de los datos del siguiente piso, indicando que hay muchas medidas que no cumplen lo establecido por las medias. Se ve también que la planta 0 es la más controvertida en valores extremos, esto se debe a que este piso es más complicado de calificar en un edificio cuando la orografía no es completamente plana. Otro factor que influye mucho e impide aceptar la tendencia es la escasez de valores de forma general, y más concretamente en otras plantas diferentes al piso 0. Aunque no sea significativa, sigue el comportamiento esperado en el cual cuanto mayor es el nivel del piso menor es la concentración de radón. Como el radón es exhalado desde el terreno es normal que en sótanos las concentraciones sean más elevadas mientras que en los pisos más alejados del contacto con el terreno apenas se perciba el gas.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

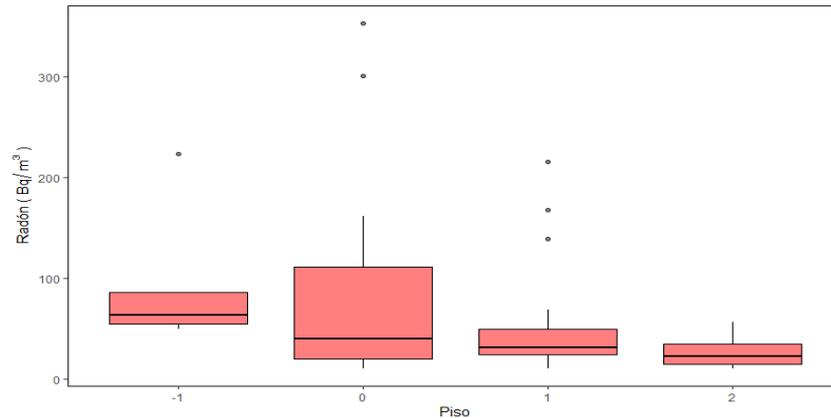


Fig. 10. Box-plot de los datos de los detectores organizados según el piso donde se han colocado.

Finalmente, comparando los valores obtenidos para cada IES y el promedio general se concluye que todos los centros cumplen con la normativa vigente, no superando el límite legal de 300 Bq/m³. Las diferencias obtenidas entre diferentes centros pueden venir determinados por (1) por las características geológicas del entorno, (2) métodos de construcción de los edificios y materiales empleados, (3) antigüedad de la edificación y desperfectos estructurales y quizás más importante este año (4) diferentes criterios de ventilación empleados por cada uno de los centros.

Centro	Concentración media de radón (Bq/m ³)	Dosis media anual (mSv/año)
Adeje	51	0,225
Los Cristianos (Adeje)	47	0,207
Manuel Gonzales (La Orotava)	85,6	0,377
El Medáno (Granadilla de Abona)	42,4	0,187
Sabino Berthelot (El sauzal)	202,2	0,892
San Matías (Santa Cruz de Tenerife)	104,25	0,460
Luis Diego Cuscoy (Arona)	23,5	0,103
Magallanes (Granadilla de Abona)	177	0,781
Los Gladiolos (Santa Cruz de Tenerife)	34,75	0,153
La Laboral (San Cristóbal de La Laguna)	25,67	0,113
Taimimo (Santiago del Teide)	28	0,123
San Andrés (Santa Cruz de Tenerife)	11,6	0,051
Las Veredillas (Santa Cruz de Tenerife)	12	0,052

Tabla 3. Valores de concentraciones y dosis medias para cada centro.

Con el análisis estadístico realizado, se procede a calcular la dosimetría, que permite obtener una idea más directa del efecto que tiene el radón sobre las personas, para ello se utiliza la Ec. 11 descrita en el método experimental y empleamos las concentraciones medias de cada centro para obtener la tabla 3. Los resultados se han obtenido asumiendo 6 horas lectivas en 5 días a la semana y durante todo el año, restando las 12 semanas de vacaciones que tiene un estudiante medio, se obtiene entonces un factor de ocupación $H = 0.14$. Los valores obtenidos para cada centro son cercanos a las medianas representadas en el box-plot de la figura 8, donde la mayoría tienen valores similares y razonables. Teniendo en cuenta que la media de radiación que recibe una persona durante un año es cercana a los 2.7 mSv/año o 2.4 mSv/año según “Public Health England” [7] y “UNCEAR” [24] respectivamente, se observa que todos los resultados están por debajo de 50% del valor. Aun así, teniendo en cuenta que el factor de ocupación simboliza el porcentaje de tiempo anual expuesto a la radiación solo los centros con un valor inferior a 0.378 mSv/año (14% del valor original) estarían por debajo de la media anual.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

Hay que tener en cuenta que estos niveles medios consideran toda la radiación absorbida mientras que el radón únicamente contribuye a aproximadamente la mitad de estas cifras. De esta manera, según el tiempo de exposición supuesto, los valores medios de dosis recibida debido a la exposición al radón son 0.181 mSv/año y 0.176 mSv/año siguiendo el orden anterior.

En el caso de los centros medidos tenemos que 6 de ellos están por debajo, y 7 por encima. Concretamente son 4 los centros que destacan con un valor claramente superior, de forma que son a los que más importancia hay que dar a la hora de realizar una detección de radón más profunda, con un registro de medidas más amplio.

País	Centro	Concentración media (Bq/m ³)	Media geométrica (Bq/m ³)
Finlandia	Colegios y Colegios residenciales	82 y 86	42 y 39
Portugal (Porto)	Guarderías y Primaria	62	47
Portugal (Distrito de Braganza)	Guarderías y Primaria	193	147
Turquía	Primaria	49	42
Serbia	Primaria	119	-
Bulgaria	Guarderías	132	101
Republica de Macedonia	Colegios	88	76
Republica Checa	Colegios	204	-
Hungría	Guarderías	233	231
Polonia	Guarderías	90	78
Eslovaquia	Guarderías	317	214
Rusia	Guarderías	59	42
Sur de Italia	Colegios	215	-
Italia	Colegios	-	92
Corea	Colegios	97 (Semestre de primavera) 158 (Semestre de otoño)	-
Bosnia Herzegovina	Colegios	128	99
Kosovo	Colegios	198	-
Arabia saudí	Colegios	17	17
Serbia (Kragujevac)	Colegios y Guarderías	60	-
Sudan	Colegios	59	-
Suecia	Colegios	158	-
Portugal	Colegios	197	197
España (Isla de Tenerife)	Secundaria	66	40

Tabla 4. Valores de concentraciones de radón en centros de diferentes países anexando los resultados obtenidos en este trabajo. Recuperado de: *"Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools-Enforcement of the Radiation Act"* [25]

Los datos obtenidos en este caso particular se pueden comparar con los datos registrados en artículos científicos y publicaciones dentro del mismo ámbito. En el artículo *"Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools-Enforcement of the Radiation Act"* [25] los autores realizan un estudio más extenso que el presente, midiendo la concentración de diferentes centros finlandeses. El artículo cuenta con una muestra de 1176 colegios, mucho más extensa que la de este proyecto, pero mediante la media se puede realizar una ligera comparación. La tabla 4 extraída del artículo muestra medidas realizadas en diferentes países mediante varios métodos de muestreo. A esta se le ha añadido las medias aritmética y geométrica obtenidas en la isla de Tenerife para poder realizar una comparación simple acerca de los valores.

Los valores que muestra la tabla 4 de los diferentes países, en su mayoría son mucho mayores que los obtenidos en este trabajo, destacando que algunos superan los 200 (Bq/m³) de manera que alcanzan los valores extremos obtenidos en las mediciones del proyecto. Se observa que al igual que se ha obtenido, la media geométrica es considerablemente inferior a la media aritmética en todos los casos lo que indica que los valores extremos por lo general han estado por encima de la media suponiendo un problema ya que dado los valores elevados que se encuentran en la tabla los datos extremos deben ser concentraciones mucho mayores. Es importante tener en cuenta que una de la diferencia entre los datos reside en la cantidad de muestras tomadas en cada país. En el caso de Finlandia la cantidad de datos supera con creces a lo muestreado en la isla, dando como resultado una media mucho más precisa en cuanto a lugar geográfico se refiere. También hay que tener en cuenta el método y los detectores empleados en cada uno de los proyectos que se hayan llevado a cabo en cada país. Estas variables pueden influir considerablemente en los datos, pero aun así hay casos con diferencia suficiente como para considerar que la situación de las emisiones de radón en Tenerife con respecto a otros países está por debajo de la media.

Summery

The results of the passive method begins by introducing a map where the institutes that have collaborated with the work are located and shows the average values of the radon concentration of each one, in order to determine the existence of a geographical factor that influences the data obtained. Subsequently, an analysis of the raw data is performed with the representation of a histogram and the main statistical data (mean, median, geometric mean, standard deviation, ...).

With the main analysis resolved, a study is carried out according to the center, for this a box-plot is made that allows to check the differences and find the centers that stand out the most. In this section it is found that two of the centers have values considerably higher than the average. An analysis is also carried out depending on the floor of the building where the data have been taken, obtaining another box-plot with the four floors used in the placement of the detectors. It is found that there is a non-significant trend where smaller plants have a higher concentration of radon. The final part of this section of results presents the dosimetry obtained by the institute and the comparison of the means obtained on the island of Tenerife with the data obtained in other European countries.

8.2. Método de medición continuo

Con los datos obtenidos en el laboratorio con la instrumentación mencionada y tras aplicar el procedimiento estadístico se ha obtenido una serie de resultados en su mayoría graficados para facilitar su exposición en este trabajo.

En primer lugar, se parte de obtener las gráficas de las series temporales con las que se va a trabajar a lo largo de esta primera parte de los resultados, puesto que permiten una rápida visualización de los datos. Las figuras desde la 11 a la 14 muestran las 4 series temporales, de las cuales la más relevante es la del radón y en la cual se centra este trabajo. Las otras tres aportan las variables de la presión, temperatura y humedad relativa que permiten una mejor comprensión del comportamiento temporal del radón.

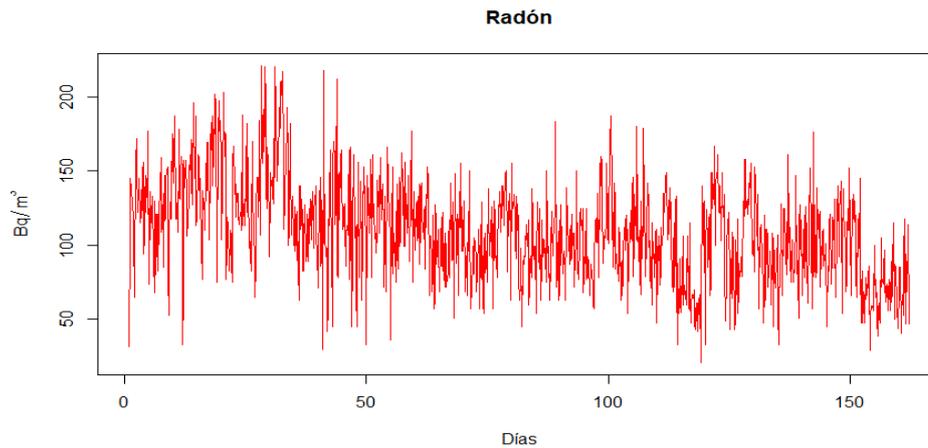


Fig. 11. Datos de radón medidos con el instrumento Radon Scout Plus.

Para los datos de radón medidos y mostrados en la figura 11 se obtienen una serie de datos generales que aportan una gran información a la hora de trabajar con la estadística de los datos.

La media aritmética de los datos es: $\bar{x} = 109 \text{ Bq/m}^3$.

La mediana es: $\tilde{x} = 108 \text{ Bq/m}^3$.

Los valores más comunes 78 y 102 Bq/m^3 .

Desviación estándar: $\sigma \pm 34 \text{ Bq/m}^3$

Una de las principales metas de este apartado es comprobar si es una distribución estadísticamente normal, de manera que es importante comprobar la semejanza entre la media y la mediana las cuales son bastante similares. Sin embargo, es necesario realizar un test de normalidad robusto a la serie de radón.

Otros datos sobre la serie temporal del radón son:

Rango o amplitud de los datos = 21 – 221 Bq/m^3 (mínimo y máximo).

Percentiles = 25%, 50%, 75%, 100% -> 85 Bq/m^3 , 108 Bq/m^3 , 130 Bq/m^3 , 221 Bq/m^3 .

Rango intercuartílico (Q3-Q1) = 130-85 Bq/m^3

El rango intercuartílico da una idea de la dispersión de los datos y es por su naturaleza menos sensible a valores extremos o outliers. Ofrece información de cómo se distribuyen los datos. El 50% de los valores se encuentran en el rango de 85 a 130 Bq/m^3 y ofrece una idea de cómo puede ser la varianza y la desviación de los datos.

Para el caso de las demás variables los datos más relevantes se reúnen en la tabla 5.

	Media $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{N}$	Mediana \tilde{x}	Moda
Presión [mb]	979.4279	979	979
Temperatura [°C]	23.2096	23	23
Humedad [%]	58.5600	59	60

Tabla 5. Datos estadísticos de las variables atmosféricas.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

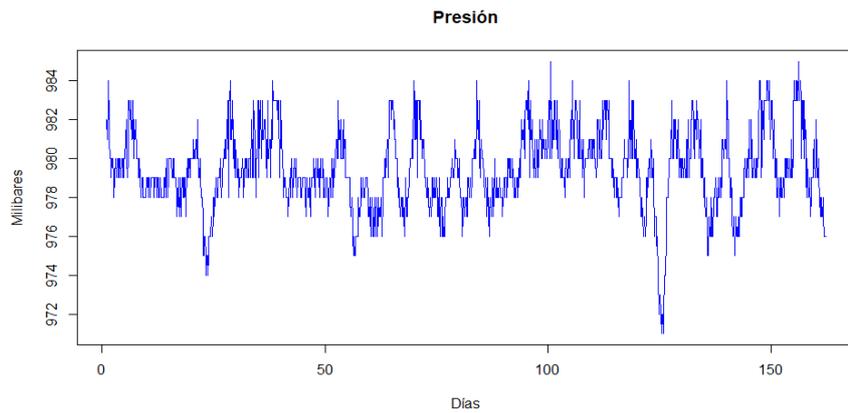


Fig. 12. Datos de la presión obtenidos por el instrumento Radon Scout Plus.

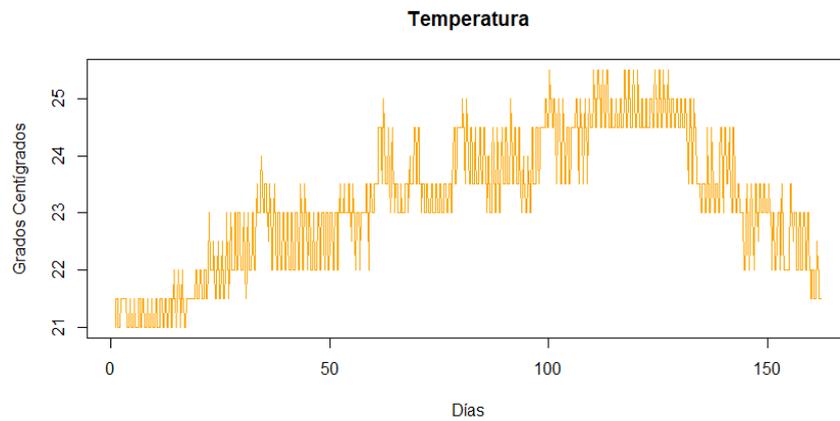


Fig. 12. Datos de la temperatura obtenidos por el instrumento Radon Scout Plus.

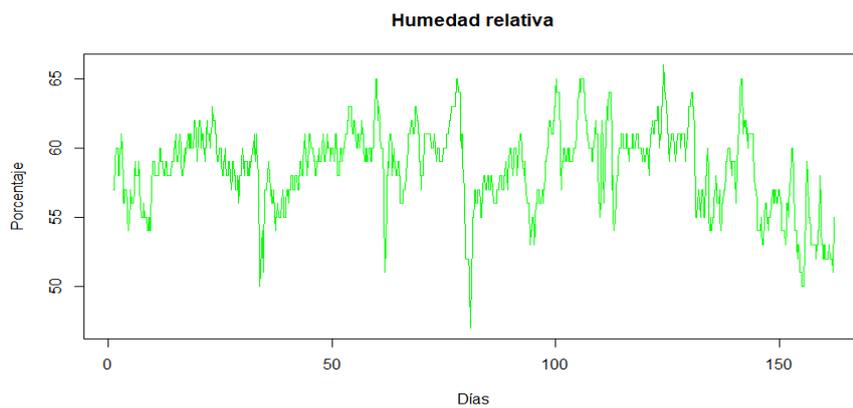


Fig. 14. Datos de la humedad relativa obtenidos por el instrumento Radon Scout Plus.

Normalidad de los datos de Radón

Una característica que aporta mucho a un conjunto de datos a la hora de trabajar con ellos es conocer si siguen una distribución normal. Esta propiedad es de bastante utilidad y se puede aprovechar de varias maneras. No solo permite predecir con mayor exactitud la evolución de la variable, sino que también se puede aplicar la regla empírica de la desviación estándar. Esta regla consiste en que el 68% de las observaciones van a estar dentro de $\pm\sigma$ el 95% dentro

de $\pm 2\sigma$ y el 99.7% dentro de $\pm 3\sigma$. Para estudiar la normalidad de una serie de datos se pueden emplear diferentes métodos: representación de histograma, gráficos de cuantiles, representación de diagramas de cajas y bigotes, test de normalidad, etc. A continuación, se emplean algunas de estas técnicas a la variable de la concentración de radón. [26]

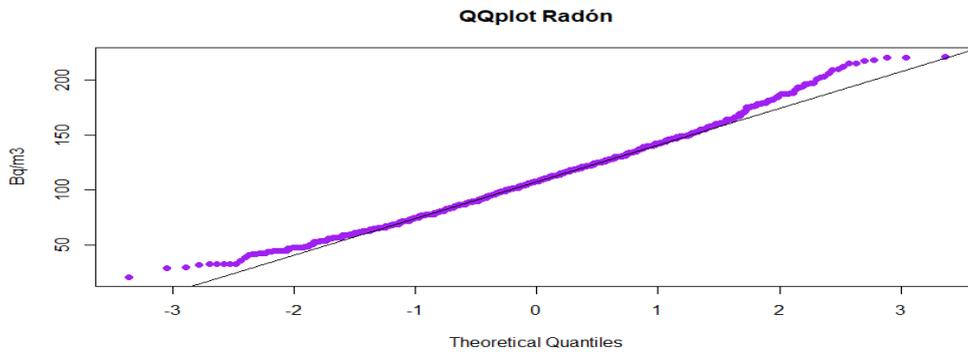


Fig. 15. QQ-plot de los datos de radón.

En la figura 15 se presenta un gráfico QQ-plot o gráfico de distribución normal, el cual es un gráfico Cuantil-Cuantil que permite observar cuán cerca está la distribución de un conjunto de datos a alguna distribución ideal, o comparar la distribución de dos conjuntos de datos.

En este caso se emplea para comprobar si la distribución de datos de radón es normal. Para ello el programa calcula los cuantiles de nuestra distribución representado en color violeta, por otro lado, genera una recta indicando cómo serían los cuantiles de una distribución normal en este caso. Se observa que la mayoría de los datos con valores intermedios coinciden con los cuantiles teóricos, de manera que se observa una cierta normalidad, sin embargo, en los extremos hay ligeras desviaciones. Como estas desviaciones están por encima de la recta se predice que hay una cierta acumulación de datos en los extremos de la supuesta distribución normal.

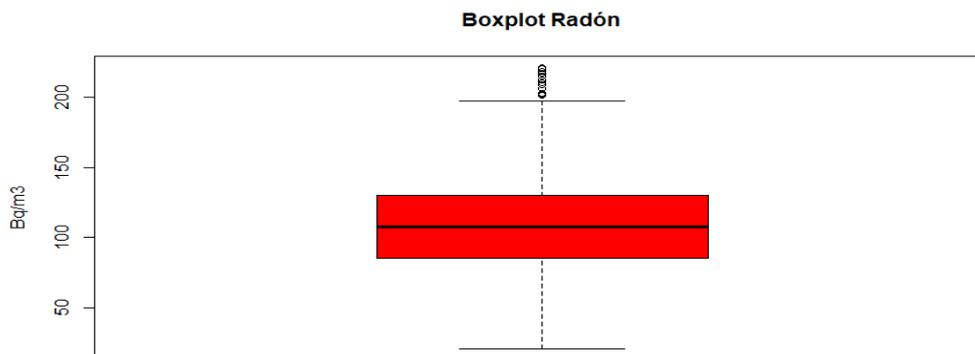


Fig. 16. Box-plot de los datos de radón.

Por otro lado, en la figura 16 un diagrama de caja es otra manera de representar un conjunto de datos mediante una representación gráfica de sus cuantiles. Además, transmite cierta información extra como los valores de la mediana, representada por una línea negra en medio de la caja, el valor máximo y mínimo no atípico con las líneas de los extremos y los valores

atípicos con puntos por fuera del margen. También se sabe que el 50% de los valores entran dentro de la caja. En este caso se observa que de forma similar a una distribución normal los datos se distribuyen de forma equitativa a ambos lados de la mediana. Sin embargo, se encuentra que los datos fuera de la caja abarcan un gran rango de valores, también destaca la gran cantidad de valores atípicos que se encuentran en la parte superior del gráfico indicando así que la distribución de datos de radón diverge ligeramente con respecto a una distribución normal.

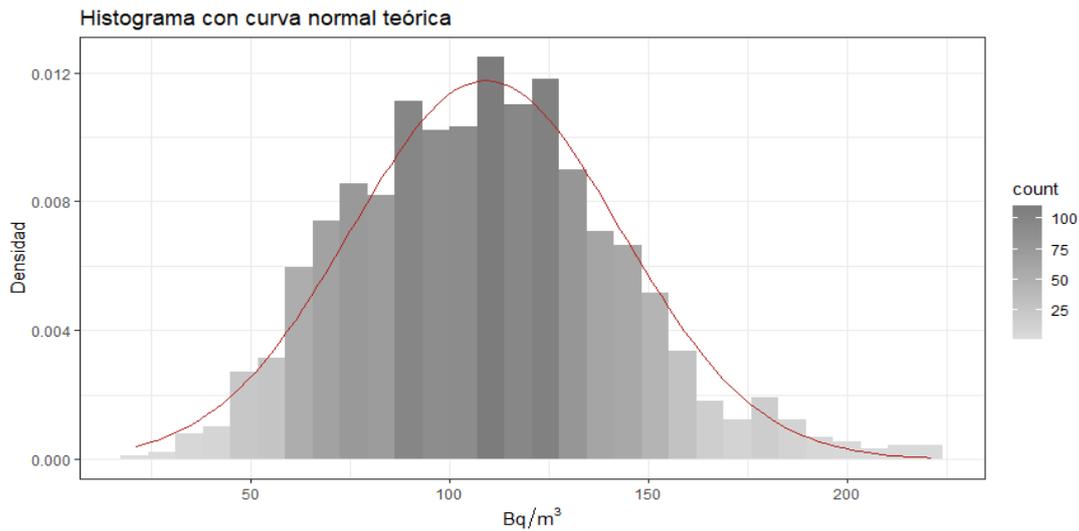


Fig. 17. Histograma con los datos de radón.

De forma natural se puede colocar los datos en un histograma (Fig. 17) donde se muestra la frecuencia de los datos con un mismo valor. El histograma se asemeja a una campana de Gauss, puesto que la mayoría de los datos medidos tiene un valor cercano a la media y los más alejados son menos comunes generando así columnas más altas en el centro del histograma y más pequeñas en los extremos. En la gráfica, la intensidad del color gris también muestra la cantidad de cuentas que hay en cada valor, ya que gracias a la leyenda se tiene una guía que ofrece un valor aproximado, donde las barras más oscuras son las que registran más datos con el mismo valor.

La curva roja que se ve en el histograma representa la campana de Gauss ideal, es decir una representación normal, la cual se ajusta ligeramente a los datos tratados. Aun así, se aprecia lo que se menciona anteriormente, en los extremos la curva roja no se ajusta tanto a las barras del histograma. Esto confirma las desviaciones de los datos con respecto a una distribución normal. Cuando una distribución se inclina en una dirección u otra se dice que tiene un sesgo o que es asimétrica. En este caso la distribución posee una asimetría o sesgo positivo con valores más elevados de lo esperado en una distribución normal. Otra información visual que aporta el histograma es el valor de la desviación estándar mencionada anteriormente $\sigma \pm 34$

Test de hipótesis

Para comprobar la normalidad de los datos de una forma más empírica se propone el uso de los test de hipótesis. Un test de hipótesis es un procedimiento estadístico mediante el cual se investiga la verdad o falsedad de una hipótesis sobre una característica de una población. Para ello lo primero es establecer una hipótesis nula (H_0) y otra alternativa (H_1) que refuta la hipótesis nula, Los test de hipótesis tratan de acumular evidencia para refutar la hipótesis nula.

Aun así, nunca se puede estar absolutamente seguro de estar justificados en refutar la hipótesis nula ya que puede haber ciertas aleatoriedades en las muestras. Como existe la posibilidad de refutar injustificadamente la H_0 , hay que determinar un nivel mínimo de significancia (α) y por tanto la probabilidad (p) de hacerlo injustificadamente. De manera que se puede elegir $p \leq 0.05$, es decir que el nivel de significancia debe ser menor del 5%. Con este nivel se puede asegurar que se realiza la elección correcta, siempre y cuando el p-value sea superior al elegido.

- H_0 : La distribución es normal
- H_1 : La distribución es no normal

Mediante estos test entonces intentaremos rechazar la hipótesis nula a nuestro nivel de significancia (0.05). Si p-value < 0.05 el test nos indica que hay diferencias significativas entre H_0 y la distribución de la variable radón.

Test	p-value
Shapiro-Wilk	$4.656 \cdot 10^{-7}$
Kolmogorov-Smirnov	0.2696
Lilliefors	0.02025
Jarque-Bera	$7.602 \cdot 10^{-7}$

Tabla 6. Resultados de diferentes test de normalidad.

Como se muestra en la tabla 6 hay cuatro p-value los cuales corresponden cada uno a un test de normalidad diferente. Rápidamente se observa que los valores se diferencian mucho unos de otros, esto se debe a la forma de interpretación de datos que posee cada uno de los test.

El test Shapiro-Wilk es el más común entre los test de este tipo, puesto que es el que se emplea para muestras pequeñas. Esta prueba parte de la media y la varianza de la muestra y luego con los datos ordenados de mayor a menor, calcula las diferencias entre: el primero y el último; el segundo y el penúltimo; el tercero y el antepenúltimo, etc. Por último, emplea los coeficientes de Shapiro-Wilk para obtener el p-value. Es un test desarrollado para muestras con un tamaño máximo de 50 datos por lo que en este caso solo se ha calculado como punto de partida, teniendo en cuenta que la muestra estudiada supera esta cifra.

El segundo test empleado, el Kolmogorov-Smirnov se emplea para estudiar si una muestra procede de una población con una determinada distribución, por lo que no está limitado a que la distribución sea normal. Este test parte de que la media y la varianza de la población son conocidas pese a que en la mayoría de los casos no es posible, por ello este test no es tan potente como otros, además de que no es tan correcto emplearlo en el estudio de normalidad.

El tercer caso mostrado en la tabla 6, el test Lilliefors asume que la media y la varianza son desconocidas y está especialmente desarrollado para contrastar la normalidad, siendo así la alternativa ideal al test de Shapiro-Wilk para muestras mayores de 50 datos. Hay que tener en cuenta que cuanto más grande es la muestra más fácil es encontrar evidencias que contradigan a la hipótesis nula.

El último caso es el test de Jarque-Bera el cual no requiere de los parámetros de la muestra y es un poco más complejo. El test cuantifica qué tanto se desvían los coeficientes de asimetría y curtosis de los esperados de una distribución normal.

Viendo los resultados de los diferentes test se aprecian ciertas diferencias entre ellos, pero la mayoría coinciden en tener un p-value inferior a 0.05 descartando por tanto la hipótesis nula. Aun así, hay grandes diferencias entre los resultados. El caso de Shapiro-Wilk muestra un valor bastante pequeño el cual no se puede aceptar en este trabajo por los requisitos del test. El Kolmogorov-Smirnov sin embargo, indica que se puede aceptar la hipótesis nula, y por tanto que la distribución puede ser normal. El más interesante es el test Lilliefors el cual también descarta la hipótesis nula, dando como resultado un valor cercano a la condición impuesta $p \leq 0.05$. Con este valor se confirma que la muestra corresponde a una distribución no normal y por tanto no es conveniente realizar test de hipótesis paramétrico. Además, los intervalos de confianza son aproximados y por tanto no tan precisos como en una distribución normal. [27]

Descomposición de la serie

Con la serie temporal de radón interesa realizar una descomposición de manera que se observen las componentes principales lo mejor posible. Para ello se proponen dos tipos de descomposición, la aditiva Ec. (8) y la multiplicativa Ec. (9). Se pretende comparar los residuos en ambas para comprobar cuál de los dos métodos de descomposición es mejor.

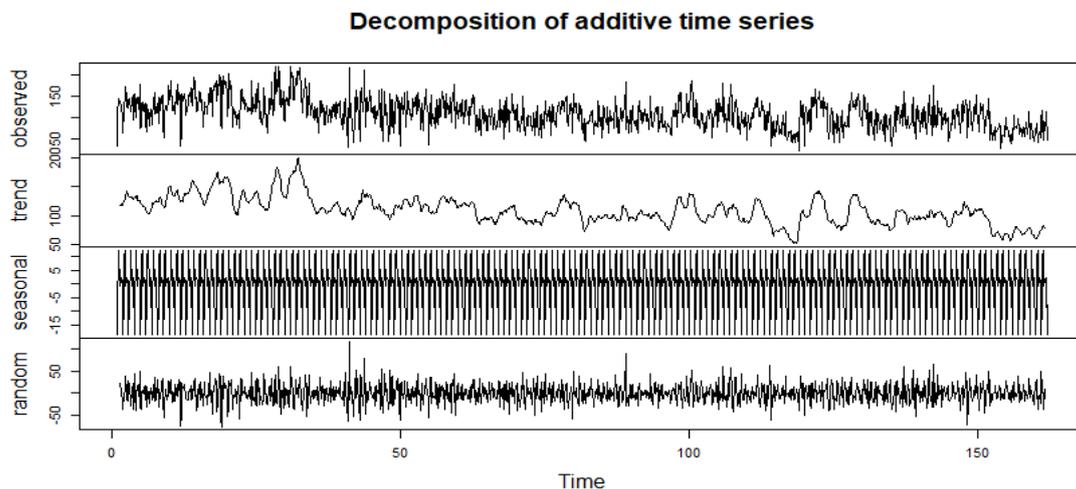


Fig. 18. Descomposición aditiva de la serie de radón. (a) Serie temporal de la concentración de radón. (b) Tendencia de la serie. (c) Estacionalidad de la serie. (d) Residuos de la descomposición.

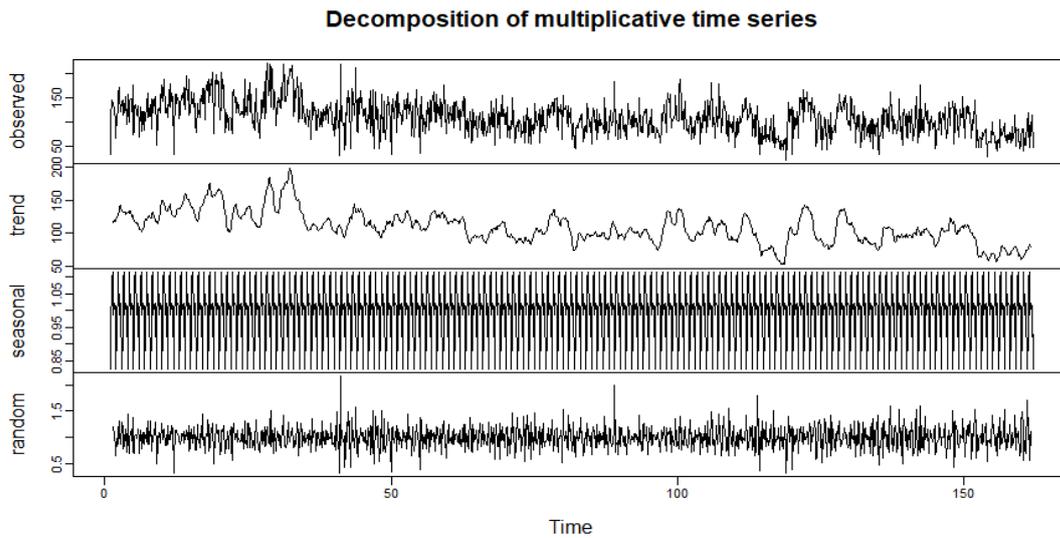


Fig. 19. Descomposición multiplicativa de la serie de radón. (a) Serie temporal de la concentración de radón. (b) Tendencia de la serie. (c) Estacionalidad de la serie. (d) Residuos de la descomposición.

En las figuras 18 y 19 se muestran las diferentes series en las que se ha descompuesto la serie temporal principal. Cada una de ellas ofrece algunas notas muy importantes a la hora de tener en cuenta el comportamiento de las emisiones de radón. Descomponer una serie temporal en diferentes componentes ayuda a predecir el comportamiento de la serie a corto, medio y largo plazo, supone una gran ayuda cuando se trabaja con procesos naturales que se ven afectados por otras variables. En este caso particular, el análisis por componentes es sencillo y no permite obtener información muy precisa, pero deja intuir algunos factores que influyen en la toma de datos.

Al analizar la tendencia mostrada en la Fig. 18.b y Fig.19.b se observa que no hay una gran tendencia lineal, las gráficas muestran una serie de picos que se repiten a lo largo del tiempo, junto con una ligera caída en el valor de los datos. Observando la frecuencia de los picos concuerdan de forma aproximada con las duraciones de las semanas, esto se puede deber a algún comportamiento que se realizó durante la toma de datos en el laboratorio. Un factor como mantener la puerta de la habitación cerrada o abierta puede influir en la tendencia de los datos a medio plazo. Cuando una habitación se mantiene mucho tiempo sin ventilar la concentración de radón va aumentando progresivamente hasta que alcance un valor estable o hasta que se vuelva a ventilar la habitación y se equilibre la cantidad de radón con el ambiente. Por otro lado, la disminución a largo plazo de la cantidad de radón se puede comparar fácilmente con la gráfica de la figura 12 donde la temperatura muestra un comportamiento inverso. Es fácil entender este comportamiento, cuando hace más calor, se mantiene la costumbre de abrir más las ventanas y puertas, de manera que se ventilan más las habitaciones y dificulta que se formen grandes concentraciones de radón. De esta manera es previsible que en los meses más calurosos se detecte una tendencia negativa contraria a los meses más fríos.

Para analizar la estacionalidad de la serie temporal de radón hay que tener en cuenta la Fig. 18c y Fig. 19c, donde se muestra un comportamiento oscilatorio. Este comportamiento viene incluido dentro de la serie temporal estudiada como pequeñas variaciones repetitivas en el valor de los datos. Observando la gráfica se aprecia un pequeño comportamiento estacionario

con frecuencia diaria, donde la concentración de radón varía en torno a 10 Bq en el caso de la descomposición aditiva y en torno a 1Bq/m³ en la multiplicativa. Este comportamiento se explica mediante la idea de que los datos son tomados en un laboratorio donde la mayor parte de la actividad es durante el día la concentración de radón disminuye a estas horas, mientras que durante la noche todo se mantiene cerrado y sin mucha ventilación lo que propicia un aumento de la concentración del gas. Este efecto alcanza su máximo en las horas previas a la entrada del personal de trabajo representando así la importancia de la ventilación como medidas preventivas.

El último gráfico representado en las figuras 18 y 19 indica comportamientos aleatorios que no se pueden predecir con la descomposición realizada, ya bien sea porque hay alguna variable que no se tiene en cuenta o porque el comportamiento que se está estudiando es aleatorio por naturaleza. Estos residuos no deben poseer ninguna tendencia ni ciclicidad para que sean lo más aleatorios posibles. Los resultados permiten obtener una comparación entre ambos métodos, permitiendo así, comprobar cuál es el método más efectivo para este caso particular. En la tabla 7 se muestran las desviaciones estándar de ambos conjuntos de residuos y los p-value del test de normalidad de Lilliefors. Los valores indican que ninguno de los dos conjuntos son normales estadísticamente, pero existe una gran diferencia en los valores de las desviaciones. Las desviaciones muestran como el método aditivo es una peor elección frente al multiplicativo el cual posee un valor considerablemente más pequeño. También se observa en las gráficas de los residuos Fig. 18 y Fig. 19 donde los valores registrados en el caso aditivo son un orden de magnitud más grande.

Método de descomposición	Desviación estándar	p-value Test Lilliefors
Aditivo	21.4616	0.00873
Multiplicativo	0.2051	0.00350

Tabla 7. Desviación estándar y p-value de los residuos de las descomposiciones.

Autocorrelación y correlación cruzada

En el estudio de las series temporales es importante tener en cuenta la correlación de los datos, es decir saber la dependencia que tiene un valor concreto con sus valores pasados y futuros. Hay casos en que los datos están correlacionados con valores anteriormente registrados y en otras ocasiones dependen de otras variables. Por ello mediante las gráficas de correlación es fácil observar el valor de los coeficientes de correlación que forman la función de correlación.

En el caso de la autocorrelación o correlación simple (ACF), los valores de los coeficientes muestran una suma de la correlación directa entre un valor y su anterior y la correlación indirecta de un valor con anteriores. En la primera gráfica de la figura 20 se observa el valor de estos coeficientes, para el caso de la serie temporal del radón. Hay que tener en cuenta que el primer valor en este caso el más alto indica únicamente la relación directa con el dato anterior ya que en este caso no existe una relación indirecta. Se observa que el por el valor de este coeficiente los datos se ven sustancialmente condicionados por el valor anterior a ellos, lo que implica que la serie no es aleatoria. Por otro lado, en la misma figura se aprecia como los demás coeficientes poseen un valor significativo cuando los datos distan un máximo de 20 días, a partir de este tiempo los datos pierden correlación con los resultados previos.

El valor de los coeficientes de la correlación simple presenta una gran caída a partir del primer día de diferencia, donde los valores rondan el 0.4, el resto de los coeficientes se sitúan

por debajo del 0.3 comenzando a ser una correlación ligera. Por debajo del valor 0.1 ya se considera despreciable o valores no correlacionados. Por tanto, pese a que a partir del valor 50 días de diferencia los valores estén dando negativo informando de una correlación inversa, como los datos son tan pequeños no tiene relevancia suficiente.

En la gráfica central Fig. 20, se observa la misma autocorrelación que en el caso superior pero ampliada en los 25 primeros días. De esta forma se permite apreciar como existen una serie de picos con una periodicidad diaria, de forma que con 24 horas de diferencia los valores se correlacionan de manera más intensa. Es evidente, que este efecto guarda correlación con las variables atmosféricas que poseen ciclos diarios como la temperatura, presión y humedad, así como con el propio régimen de ventilación de una oficina (con ciclos de actividad por el día). Estos ciclos producen que las emisiones de radón desde la tierra se ajusten de igual manera.

En la gráfica inferior Fig. 20, se muestra la correlación parcial (PACF) del radón la cual ofrece el valor de los coeficientes únicamente con una relación directa, de manera que los valores deben ser igual o inferiores al caso anterior que representa una suma. El valor del primer coeficiente en este caso posee el mismo que en la gráfica anterior donde también sólo representaba el valor de la relación directa, sin embargo, se aprecia una gran diferencia en el resto de los valores, donde el descenso es más intenso. La correlación de los valores a partir del segundo es prácticamente despreciable y más aun considerando el segundo salto que se produce cuando el contraste se realiza con una diferencia mayor a un día. Este comportamiento indica que pese a haber una pequeña correlación indirecta no se registra una gran correlación directa entre los diferentes valores.

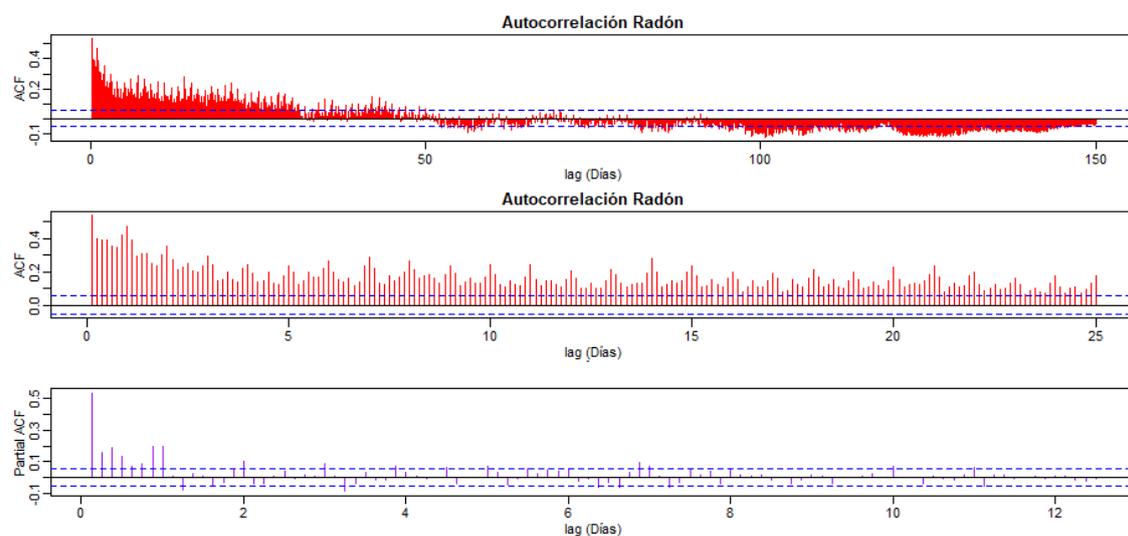


Fig. 20. Gráfica de la autocorrelación del radón (Arriba). Gráfica de la autocorrelación del radón 25 días (Medio). Gráfica de la correlación parcial del radón.

Correlación cruzada

Otra forma de ver la dependencia matemática de los valores es mediante una autocorrelación cruzada con otras variables. Mediante este tipo de correlación se puede tener una idea del efecto que tienen algunas variables climáticas en la emisión de radón. En la figura 21 se encuentra la correlación cruzada del radón con las tres variables que ofrece la instrumentación empleada en este trabajo. Los datos seleccionados para realizar este cálculo de coeficientes incluyen los 15 días previos y posteriores a un dato de radón medido, debido a que,

a partir de esta diferencia temporal se supone una correlación no significativa en comparación con la muestra total de datos medidos. Aunque se haya decidido tomar este margen considerablemente grande en ambos sentidos temporales, para este caso físicamente interesa centrarse en los valores a la derecha del punto central, el cual indica la correlación entre valores medidos simultáneamente. Los valores de la derecha muestran la correlación entre un valor de la variable que se emplea y el valor del radón días después.

En la gráfica superior Fig. 21 se muestra la correlación cruzada entre el radón y la presión la cual posee una correlación débil (<0.2) a $t=0$. Se observa un ligero crecimiento en ciertos coeficientes a la derecha del punto central, este crecimiento indica una pequeña correlación entre los datos que poseen menos de una semana de diferencia, aunque tampoco son significativos. Además, sería en este caso una correlación inversa que indica que cuando el valor de la variable presión aumenta la cantidad de radón detectada es menor. Aun así, pese a que físicamente este efecto tenga sentido, ya que, entre mayor es la presión en la superficie más complicaciones encuentra el gas del radón para salir debido a la compactación del terreno, se encuentra que los valores registrados son muy débiles por debajo del 15% de correlación indicando que prácticamente no hay correlación entre la concentración de radón y la presión atmosférica.

En el caso de la correlación cruzada entre el radón y la temperatura se observa un comportamiento bastante diferente al caso anterior. La segunda gráfica Fig. 21 muestra una clara correlación inversa en prácticamente todo el espectro de datos. De esta manera se sabe que entre mayor es el valor de la temperatura menos radón registra la instrumentación utilizada dentro del laboratorio. Como ya se anticipa antes hay varios factores que propician la aparición de este efecto. El control del entorno es muy relevante en estos casos puesto que una ventana o puerta abierta por el calor puede afectar a las medidas. También lo hace los contrastes entre la presión que se forman en el interior y el exterior del edificio. Además, hay que tener en cuenta que los valores de este máximo rondan el 40% de correlación suponiendo una fuerte significancia y por tanto una fuerte correlación entre la variable del radón y la variable de la temperatura. Por otro lado, también se puede observar cómo existe una componente cíclica diaria como la que se comentaba anteriormente en la descomposición y la autocorrelación. Al estar correlacionada con la temperatura, se sabe que hace referencia a la variación diaria de la misma y al comportamiento rutinario llevado a cabo dentro del laboratorio en cuanto a ventilación de este se refiere.

El último caso comparado es el de la humedad, representado en la tercera gráfica de la figura 21, este caso también difiere con los dos anteriores puesto que lo más representativo es el pico central. En este pico existen coeficientes de correlación con valores que alcanzan prácticamente el 20% de manera que son algo significativos. Cuando se observa con más detalle se ve que existe un comportamiento cíclico parecido al de la temperatura, pero más suave. Esta correlación positiva indica que a medida que aumenta la humedad en el entorno aumenta la emisión de radón y por tanto su detección. Hay que tener en cuenta que entre la humedad y la temperatura existe una importante correlación positiva como se muestra en la primera gráfica de la figura 25 dentro del anexo. De forma que, aunque la temperatura aumente y con ello lo haga la humedad el radón se ve afectado de maneras distinta por ambas variables. Cuando existe mucha humedad en el ambiente esta se filtra en los poros del terreno dificultando la expulsión del radón al exterior, efecto que se incrementa con la lluvia en el exterior de los

edificios. En estos casos el radón tiende a entrar donde el suelo se mantiene seco que es debajo de los edificios incrementando su concentración en el interior.

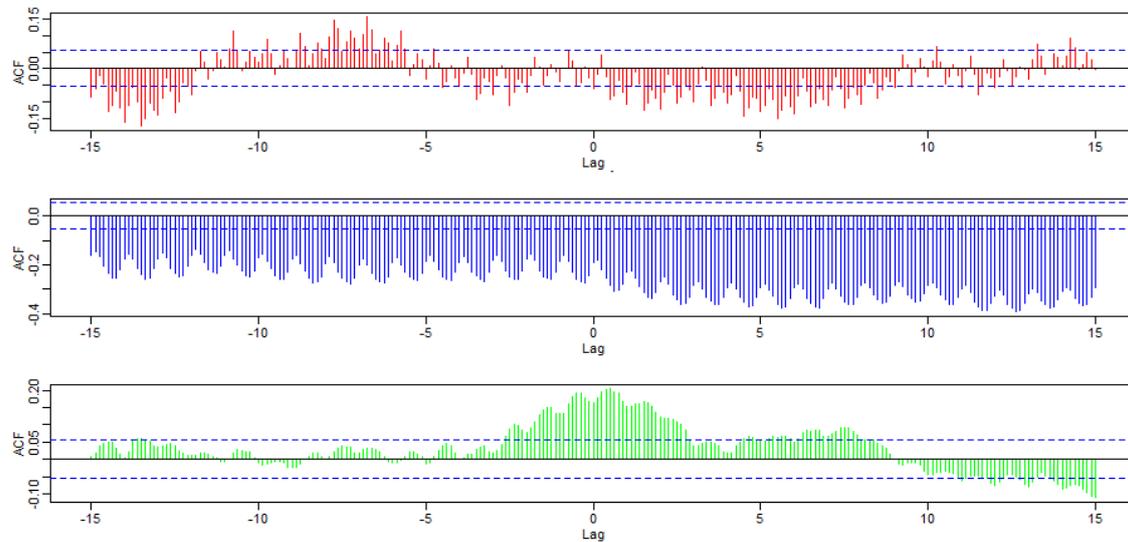


Fig. 21. Correlación cruzada radón con presión (Arriba). Correlación cruzada radón con temperatura (Medio). Correlación cruzada radón con humedad (Abajo).

Periodograma

En la descomposición de la serie de radón ya se observaba una estacionalidad en la serie de radón, aun así, se debe analizar la ciclicidad de la serie mediante el uso de periodogramas. Los periodogramas obtenidos están basados en el teorema de Wiener-Khinchine que establece la relación entre la función de autocovarianza y la función de densidad espectral mediante la transformada discreta de Fourier. Por lo que representando la función de densidad espectral para la serie temporal del radón se obtiene lo que se representa en la figura 22.

En la primera gráfica de la figura 21 se muestra un periodograma de barras donde sobre un fondo de ruido blanco se muestran dos picos intermedios y un conjunto de picos en torno a la frecuencia 0. Hay que tener en cuenta que partimos de la frecuencia de Nysquit en $f=1/2\Delta t=0.5$, esta frecuencia es la mínima que permite detectar un ciclo puesto que entre medidas consecutivas no se obtiene información. Por tanto, en este caso que se tomaban medidas cada 3 horas, la frecuencia de Nysquit corresponde a un periodo de 6 horas. De esta manera se visualiza fácilmente que la barra situada en la frecuencia $f=0.25$ indica una ciclicidad cada 12 horas y la que encontramos en $f=0.125$ coloca otra en 24 horas. Este segundo ciclo es el mismo que se encontraba en la gráfica de autocorrelación Fig. 20. En la segunda gráfica muestra la misma información con el fin de comprobarlo y exponerlo de otra forma empleando un código diferente de R-Studio. La gráfica en este caso es un periodograma continuo el cual ha sido suavizado para resaltar mejor los picos más relevantes.

Estos ciclos encontrados indican una cierta estacionalidad en la serie del radón, mostrando dos comportamientos repetitivos a lo largo del día. Este tipo de comportamientos es muy común en los procesos naturales como las variables atmosféricas, de manera que hay variables como la temperatura donde se aprecia fácilmente estas ciclicidades a lo largo del día. Relacionándose con la emisión del radón y la dependencia entre ambas variables.

En este caso dentro de ambas gráficas de la figura 22 encontramos una caída exponencial en las bajas frecuencias, en la primera se representa por barras cada vez más cortas

mientras que en la segunda por un continuo. Esto indica la no estacionariedad de la serie, se comprueba entonces que existe una cierta tendencia y que la serie tiene memoria a largo plazo como se aprecia en la descomposición Fig 19b.

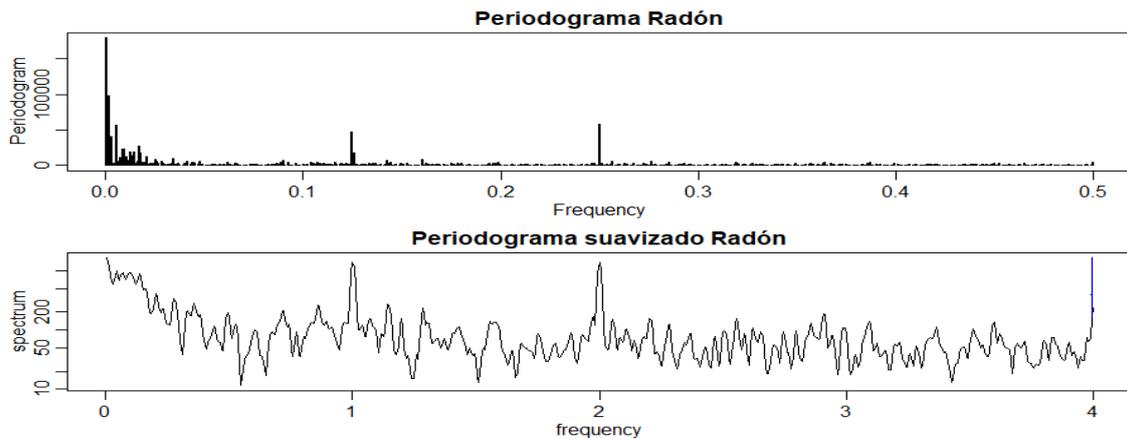


Fig. 22. Periodogramas del radón.

Modelo ARIMA

La última parte de este apartado de resultados trata de resolver un modelo predictivo, en este caso se emplea el modelo ARIMA (p,d,q) $(P,D,Q)_s$ (*AutoRegresive Integrated Moving Average*), este modelo desarrollado por Box y Jenkins utiliza un punto de vista estocástico y necesita series temporales largas con al menos 50 datos y que cumplan un comportamiento predecible.

Lo primero es identificar las características de la serie temporal estudiada para poder aplicar el modelo. En los apartados anteriores se ha realizado este trabajo obteniendo tanto la tendencia como las gráficas de autocorrelación y correlación parcial. Esto permite pasar a la suposición de los mejores coeficientes para un modelo que estime estadísticamente la evolución de la serie en un corto periodo. La metodología empleada se basa en las recomendaciones de Box-Jenkins, donde es necesario comprobar que la serie es estacionaria (tendencia y varianza) durante el periodo de muestreo, y que dicha varianza tiene una estructura interna constante durante todo el estudio (ACF, PACF).

En este caso se comprobó anteriormente que la serie temporal del radón posee una tendencia. Por esto, lo ideal es diferenciar la serie con el fin de eliminar la tendencia, este paso se puede hacer previo a un análisis ARMA o incluir el coeficiente “d” para pasar al método ARIMA el cual tiene en cuenta la tendencia de la serie según el grado del coeficiente.

Una vez eliminada la tendencia se trata de obtener los demás coeficientes de forma aproximada, para ello una manera es observando las gráficas de la figura 20 donde la autocorrelación y la correlación parcial ayudan a obtener un valor estimado. El gráfico de autocorrelación ayuda a estimar el coeficiente “q” relacionado con la media móvil MA (q) mientras que la función de autocorrelación parcial permite deducir un valor “p” para los procesos autorregresivos AR(p).

Los coeficientes $(P,D,Q)_s$ son necesarios para tener en cuenta las ciclicidades de la serie, añadiendo estos coeficientes el método pasa a conocerse como método SARIMA multiplicativo de Box-Jenkins. Este modelo contiene una componente ARIMA que modela la dependencia estacional de serie asociada a observaciones separadas por (s) periodos. Como en este caso ya

se sabe que la serie posee ciertas componentes cíclicas es necesario añadir este término al modelo empleado. [28]

Como todos los cálculos de este TFG se han realizado mediante R studio, inicialmente se ha empleado una función (auto.arima) que determina unos coeficientes aproximados que aportan un funcionamiento aceptable del modelo SARIMA. Empleando esta función de ajuste se obtienen los coeficientes (1,1,1) (0,0,2) [8], respetando la aparición de coeficientes en los términos que se habían predicho. En la gráfica de la figura 23 se aprecia como el modelo ha estimado los 20 valores que hipotéticamente seguirán en la serie. Sin embargo, los nuevos valores destacan bastante con el desarrollo anterior de la serie, esto se debe a que los modelos predictivos proponen siempre los valores cercanos a la media y por tanto no suelen tener grandes fluctuaciones.

A todo el proceso, le acompaña un paso importante en la realización de los modelos ARIMA que es la comprobación matemática de los resultados. Para ello se ha obtenido una serie de gráficas que permiten comprobar que los coeficientes obtenidos dentro del modelo están produciendo un resultado que corresponde con lo esperado. Entre estas gráficas Fig. 26 que encontramos en el anexo hay QQ plot, Autocorrelaciones y tests de normalidad de los residuos obtenidos en la resolución del modelo. Otro método más directo, es realizar un test de ruido blanco a los residuos, el test elegido ha sido el Ljung-Box, el cual no debe rechazar la hipótesis nula, que es que los residuos se distribuyen como un ruido blanco.

Modelo	p-value
(1,1,1) (0,0,2) [8]	0.9783

Como se muestra el p-value está muy por encima de 0.05 por lo que se acepta la hipótesis nula. Indicando por tanto que el modelo es correcto y no omiten información relevante a la hora de realizar los cálculos. Los residuos tienen una estructura normal sin correlaciones temporales, lo que indica que han sido bien modelados.

Por último, hay que tener en cuenta que los modelos ARIMA son modelos que mejoran con el tamaño de la muestra, ya que entre más grande es la serie temporal más fácil es registrar las características de esta y por tanto más exactos pueden llegar a ser los coeficientes. En este caso la serie es considerablemente mayor del mínimo necesario, pero aun así no alcanza el año. En muchas series temporales sobre datos climáticos es recomendable tener valores de varios años para predecir de forma correcta como se desarrolla. Para el radón también es recomendable ver como varía durante todo el año y compararlo con diferentes años para obtener un comportamiento más exacto.

También es importante comprobar los resultados de los modelos ARIMA con los datos que se miden a posteriori, esto quiere decir que sería ideal haber realizado más medidas y en igual condiciones para saber si los nuevos datos registrados se ajustan a lo predicho por el modelo informático empleado.

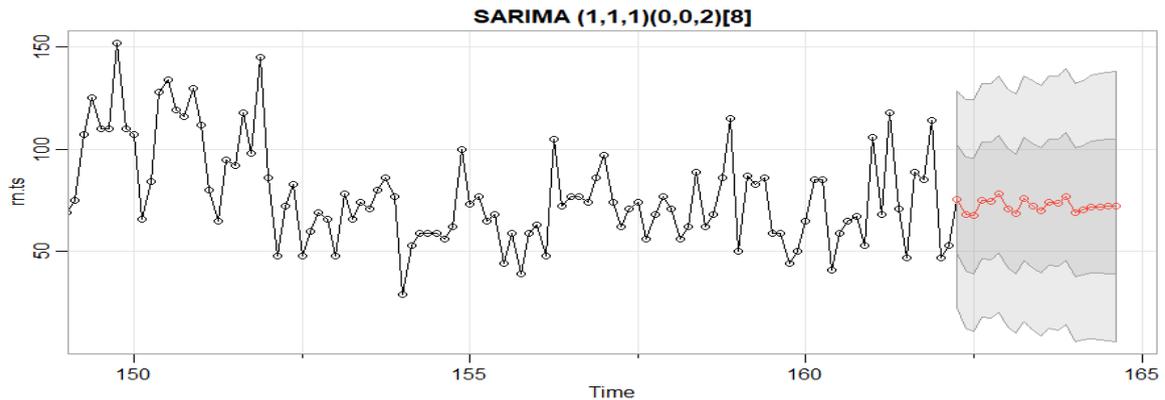


Fig. 23. Gráfica del modelo SARIMA (1,1,1) (0,0,2) [8], los puntos rojos son obtenidos, en negro los últimos de la serie de radón.

9. Conclusiones

Summary

The conclusions highlight on the one hand the importance of ventilation in schools and that the values recorded in schools are below the legal limit. It also mentions the cyclicity obtained in the time series and the correlation with temperature. Controlling radon emissions is important to reduce health problems derived from them.

Durante este trabajo se ha obtenido una serie de resultados que han sido explicados en el apartado anterior. Se ha procurado obtener toda la información posible de los datos iniciales los cuales han sido obtenidos con la rigurosidad necesaria para luego poder extraer conclusiones que confirmen o desmientan las hipótesis iniciales planteadas por la información teoría encontrada.

Los datos medidos en los diferentes centros han aportado resultados de gran interés mostrados anteriormente, ya que permiten saber cuál es el estado actual de los alumnos frente a la exposición al radón, siendo este un importante tema de salud. Los resultados obtenidos muestran que todos los institutos están en un rango de valores medios de concentración entre 12 y 202 Bq/m³, considerando que la mayoría de los centros poseen un bajo riesgo de exposición teniendo en cuenta lo establecido en la legislación europea y española. Solo los centros Sabino Berthelot y Magallanes poseen niveles de concentración ligeramente más altos, aunque están dentro de los valores legales. Cuando se compara la concentración media geométrica de todos los institutos con la detectada en otros países se ha obtenido que el valor registrado en la isla de Tenerife de 40 Bq/m³ es mucho menor que en la mayoría de los países europeos. Cuando se analizan las dosis recibidas por los alumnos se ha obtenido un resultado que coincide con los valores medios de radiación anual que recibe una persona salvo en cuatro de los casos en los que los resultados obtenidos son superiores. Se concluye también que el efecto de la pandemia COVID-19 ha producido un posible descenso de radón en las aulas gracias a la ventilación que se ha llevado a cabo con el fin de mejorar el entorno sanitario, este efecto ha dado como resultados valores considerablemente bajos en la mayoría de los centros.

Es necesario obtener más datos y seguir realizando campañas de detección de radón en los lugares donde las personas y en concreto los jóvenes pasan gran parte de su tiempo. Es importante tener en cuenta que cualquier exposición al radón supone un aumento en la causa de cáncer de pulmón, realizar medidas pasivas es un sistema sencillo que se debe implementar como método de protección y control frente a las exposiciones al radón, proporcionando así datos suficientes para entender mejor la situación y el impacto que este gas tiene en la vida de

las personas. Con el conocimiento sobre el radón adquirido se pueden plantear métodos de prevención mediante los recursos que se especifica en el apartado HS6 del código técnico de edificación.

La medición continua también es una herramienta de gran utilidad a la hora de enfrentarse al problema del radón. Gracias a esta, es posible establecer relaciones entre las diferentes variables y comprender el comportamiento de las emisiones de este gas. En este trabajo la serie temporal de concentración de radón ha resultado no ser un conjunto normal, el cual tiene tendencia y estacionalidad. Se ha apreciado una dependencia con diferentes variables atmosféricas pese al corto periodo de medición. También se concluye que las emisiones presentan cierta componente cíclica intradía que influyen en la dinámica del radón con picos en las horas más tempranas del día y supone un pequeño motivo a tener presente a la hora de disminuir las concentraciones en el interior de los edificios. Se ha apreciado como la temperatura juega un papel fundamental a la hora de controlar las emisiones de radón con una correlación cercana al 40% debido tanto a la ventilación como a la compactación del terreno. El entendimiento del comportamiento del gas radón ha permitido emplear métodos autorregresivos con los que anticipar las subidas en las emisiones, de manera que el método óptimo encontrado ha sido el ARIMA (1,1,1) (0,0,2) [8].

En definitiva, hay que tener en cuenta la importancia de obtener medidas no solo en unos puntos concretos sino también establecer un registro que cubra la mayor parte del territorio posible. De esta forma se observa con mayor facilidad cuáles son las zonas cuyos suelos emiten mayor cantidad de radón y, por tanto, donde se deben aplicar medidas de contención más intensas. Teniendo en cuenta que el radón es la segunda causa de cáncer de pulmón los esfuerzos en prevenir la exposición son de las mejores armas que se dispone para contrarrestarlo. La creación de mapas geográficos a partir de la acumulación de muchas medidas tanto pasivas como continuas ofrecen una gran utilidad a la hora de analizar el problema de salud.

10. Anexo

 **Gobierno de Canarias**

Consejería de Educación y Universidades
I.E.S. TEGUESTE

Don Cristian Arteaga Suárez, Secretario del centro I.E.S. TEGUESTE (Tegueste).

Hace constar que:

D. Néstor de la Nuez Hernández, con DNI n.º 78533701V ha impartido el taller en este centro "Determinación del gas Radón en las aulas de Tenerife", en colaboración con la Facultad de Física, Departamento de Medicina física y Farmacología, con una duración total de 3 horas, el 23 de marzo de 2021.

Lo que se hace constar para los efectos oportunos en Tegueste, a 4 de mayo de 2021.

Vº Bº La Directora:

Fdo: María Isabel Hernández Suárez





Fig. 24. Certificado de asistencia a la charla del IES Tegueste.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

Instituto (IES)	Fechas	Coordenadas	x	y
Adeje	30/11/2020 - 04/03/2021	28.12165 , -16.73382	329704	3111893
Los Cristianos (Adeje)	01/12/2020 - 04/03/2021	28.05732 , -16.71706	331249	3104741
Manuel Gonzales (La Orotaba)	19/11/2020 - 25/02/2021	28.38024 , -16.53465	349632	3140282
El Medáno (Granadilla de Abona)	16/11/2020 - 02/03/2021	28.05212 , -16.53549	349089	3103927
Sabino Berthelot (El sauzal)	19/11/2020 - 19/02/2021	28.45964 , -16.42069	360903	3148942
San Matías (Santa Cruz de Tenerife)	18/11/2020 - 09/03/2021	28.43683 , -16.29784	372905	3146280
Luis Diego Cuscoy (Arona)	20/11/2020 - 04/03/2021	28.07808 , -16.67382	335531	3106982
Magallanes (Granadilla de Abona)	24/11/2020 - 10/03/2021	28.07402 , -16.55221	347476	3106374
Los Gladiolos (Santa Cruz de Tenerife)	26/11/2020 - 24/03/2021	28.46218 , -16.27040	375622	3149059
La Laboral (San Cristóbal de La Laguna)	01/12/2020 - 22/03/2021	28.47882 , -16.31360	371412	3150948
Tamaimo (Santiago del Teide)	03/12/2020 - 18/03/2021	28.26403 , -16.81944	321529	3127793
San Andrés (Santa Cruz de Tenerife)	02/12/2020 - 05/04/2021	28.50895 , -16.19566	382992	3154166
Las Veredillas (Santa Cruz de Tenerife)	10/12/2020 - 22/03/2021	28.44274 , -16.30789	371928	3146944
Valle guerra	15/12/2020 - 19/03/2021	28.52152 , -16.39022	363966	3155764
Tegueste	17/12/2020 - 17/03/2021	28.51941 , -16.33121	369738	3155464
Granadilla	21/12/2020 - 18/03/2021	28.11227 , -16.58510	344299	3110654
Punta larga	11/12/2020 - 23/03/2021	28.36619 , -16.36728	366015	3138527
San Nicolas	26/01/2021 - 14/05/2021	28.47585 , -16.43355	359665	3150753

Tabla 8. Fechas de colocación y recogida de los detectores y coordenadas por cada centro.

Determinación y dinámica de los niveles de exposición al radón en Tenerife

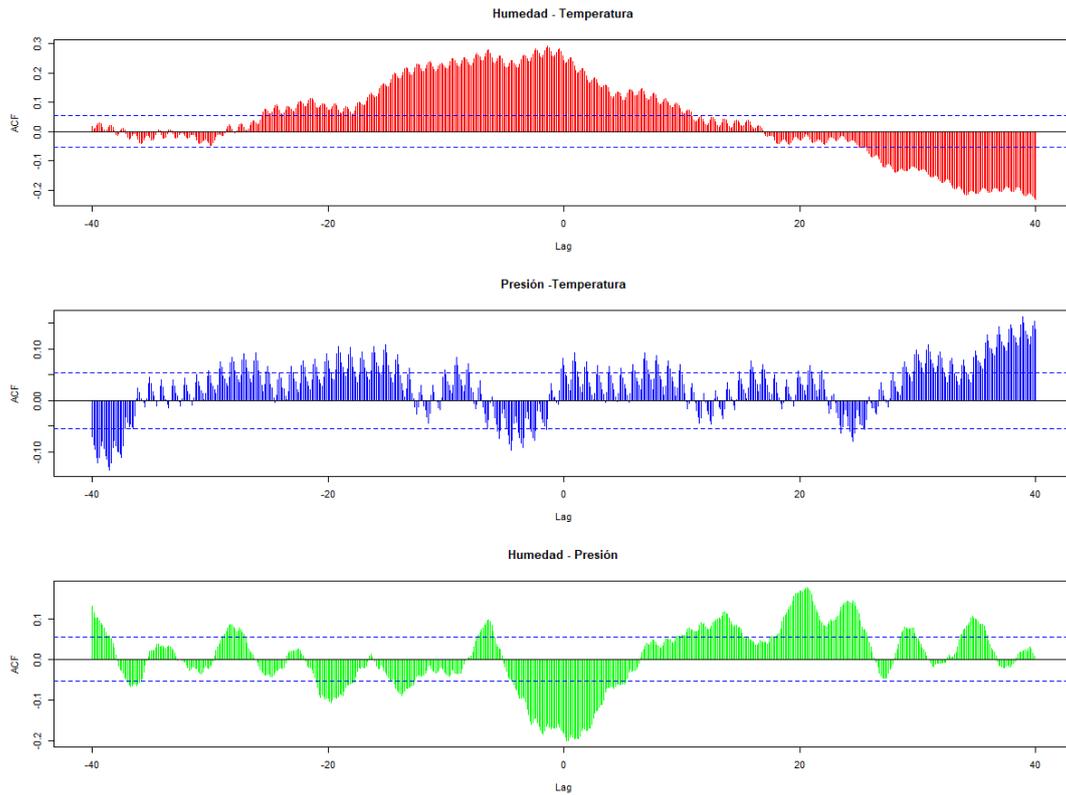


Fig. 25. Correlaciones cruzadas entre las variables atmosféricas durante la medición en continuo.

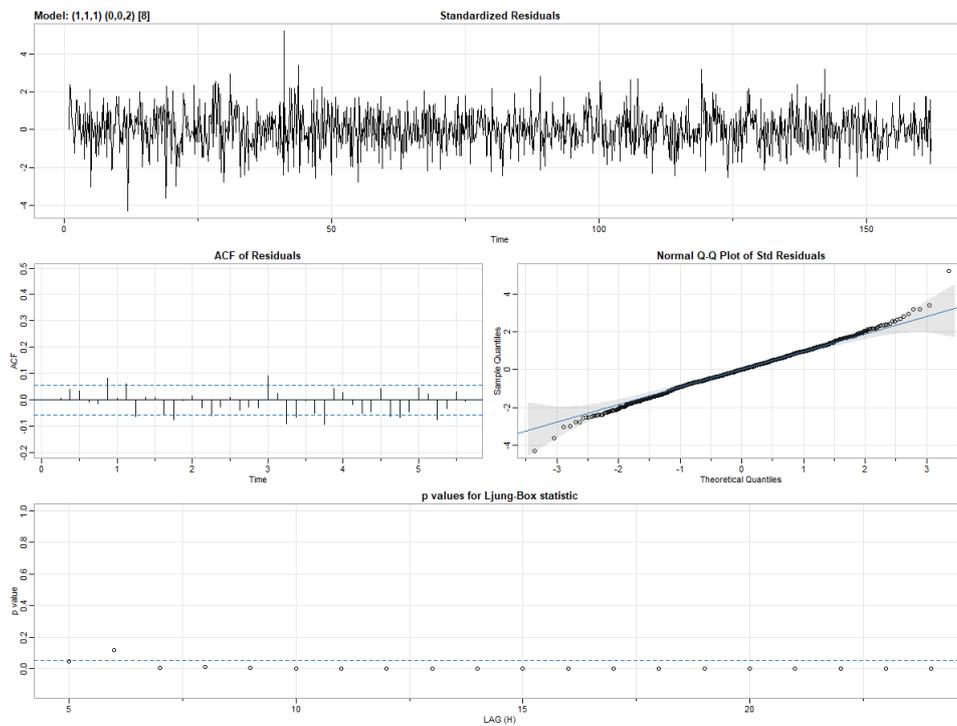


Fig. 26. Graficas de los residuos obtenidos durante el método ARIMA.

11. Bibliografía

- [1] CSN. (2015). *Las radiaciones (Monografía)*. Recuperado de: <https://www.csn.es/documents/10182/bb15bfe3-dcbf-4bac-84d5-37dce5db6f1d> Fecha de última consulta: 29/06/2021.
- [2] CSN. (2006). *10 preguntas y respuestas sobre la radiactividad*. Recuperado de: <https://www.csn.es/documents/10182/914805/EI%20CSN%20vigila%20las%20radiaciones.%2010%20preguntas%20y%20respuestas%20sobre%20la%20radiactividad> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [3] ATSDR. (1999). *Resumen de salud pública-Radiación ionizante*. Recuperado de: https://www.atsdr.cdc.gov/es/phs/es_phs149.pdf Fecha de última consulta: 29/06/2021.
- [4] Gautreau, R. y Savin, W. (2001). *Física Moderna*. (pp. 225-228). Méjico: McGraw-Hill.
- [5] IAEA. Magnitudes y unidades de radiación. Recuperado de: https://rpop.iaea.org/RPOP/RPoP/Content-es/InformationFor/HealthProfessionals/1_Radiology/QuantitiesUnits.htm Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [6] OMS. (2016). Radiaciones ionizantes: efectos en la salud y medidas de protección. Recuperado de: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ionizing-radiation-health-effects-and-protective-measures> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [7] Public Health England. (2016). *Ionising Radiation Exposure of the UK Population:2010 Review*. Recuperado de: https://www.phe-protectionservices.org.uk/cms/assets/gfx/content/resource_3595csc0e8517b1f.pdf Fecha de última consulta: 29/06/2021.
- [8] ICRP, 2018, Summary of ICRP Recommendations on Radon. Recuperado de: <http://www.icrpaedia.org/images/f/fd/ICRPRadonSummary.pdf> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [9] OMS. 2015. MANUAL DE LA OMS SOBRE EL RADÓN EN INTERIORES UNA PERSPECTIVA DE SALUD PÚBLICA. Recuperado de: https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/161913/9789243547671_spa.pdf?sequence=1 Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [10] Ramsay, W.; Gray, R. W. (1910). La densité de l'émanation du radium. *Comptes rendus hebdomadaires des seances de l'Academie des sciences* 151: 126-8.
- [11] Espasa, B.; Antonio; Gómez, B; De la Torre, P.; Gallardo, J. et al. (2020). Guía para la protección de Gas Radón en Extremadura. Recuperado de: <https://ciudadano.gobex.es/documents/9274982/9276010/Gu%C3%ADa+para+la+protecci%C3%B3n+de+gas+Rad%C3%B3n+volumen+1+--+General.pdf/03958d27-e5c6-42cc-9655-18ddc4efa79d> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [12] Pérez-Ríos, M., Barros-Dios, J.M., Montes-Martínez, A. et al. Attributable mortality to radon exposure in Galicia, Spain. Is it necessary to act in the face of this health problem?. *BMC Public Health* **10**, 256 (2010). Recuperado de: <https://doi.org/10.1186/1471-2458-10-256>. Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [13] EPA. Health Risk of Radon. Recuperado de: <https://www.epa.gov/radon/health-risk-radon#main-content>
- [14] OMS. (2021). Radon and health. Recuperado de: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>. Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [15] American Cancer Society. Radón y cánc. Recuperado de: <https://www.cancer.org/es/cancer/causas-del-cancer/sol-y-otras-formas-de-radiacion/radon.html> Fecha de última consulta: 05/07/2021.

- [16] 90/143/Euratom: Recomendación de la Comisión, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios. Recuperado de: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX:31990H0143&from=EN> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [17] Directiva 2013/59/Euratom del Consejo, de 5 de diciembre de 2013 Recuperado de: <https://www.boe.es/doue/2014/013/L00001-00073.pdf> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [18] Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación. Recuperado de: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2019/12/20/732> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [19] John Villavicencio. Introducción a Series de Tiempo. Recuperado de: http://www.estadisticas.gobierno.pr/iepr/LinkClick.aspx?fileticket=4_BxecUaZmg%3D Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [20] Laboratorio LaRUC. Recuperado de: <http://elradon.com/> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [21] Laboratorio AGQLabs. Recuperado de: <https://agqlabs.es/> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [22] Marco Budinich; Massimo Vascotto. (2010). El 'estudio escolar del radón': mida la radioactividad de su hogar. Recuperado de: <https://www.scienceinschool.org/es/2010/issue14/radon> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [23] SARAD. (2017). User Manual RADON SCOUT. Recuperado de: https://www.sarad.de/cms/media/docs/handbuch/Manual_Radon-Scout_EN_24-03-17.pdf Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [24] UNSCEAR. What levels of radiation exposure do people receive? Recuperado de: <https://www.unscear.org/unscear/en/faq.html> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [25] Katja Kojo; Päivi Kurttio (2020) Indoor Radon Measurements in Finnish Daycare Centers and Schools-Enforcement of the Radiation Act. Recuperado de: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC7215769/> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [26] Francisco Parra. (2019). Estadística y Machine Learning con R. Recuperado de: <https://bookdown.org/content/2274/portada.html> Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [27] Joaquin Amart. (2016). Análisis de normalidad: gráficos y contrastes de hipótesis. Recuperado de: https://www.cienciadedatos.net/documentos/8_analisis_normalidad Fecha de última consulta: 05/07/2021.
- [28] Santiafo de la Fuente. SERIES TEMPORALES: MODELOS ARIMA. Recuperado de: <https://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/SERIES-TEMPORALES/modelo-arima.pdf> Fecha de última consulta: 05/07/2021.