

# Análisis de los niveles de exposición a Radón y CO<sub>2</sub> en la isla de La Palma

## **Autores:**

Nahuel Alan Pezzutti Rodríguez

Guillermo Samuel Sangüesa Trujillo

## **Tutores:**

Pedro Ángel Salazar Carballo

*Departamento de Medicina Física y Farmacología*

María Candelaria Martín Luis

*Departamento de Biología Animal, Edafología y Geología*

2022/2023



# Agradecimientos

Queremos expresar nuestro agradecimiento a Laboratorio FIMERALL por proporcionar parte de los datos para este Trabajo de Fin de Grado. Su colaboración fue necesaria para el desarrollo de nuestra investigación.

También queremos agradecer a nuestros dos tutores, Pedro Ángel Salazar Carballo y María Candelaria Martín Luis, por su guía y apoyo a lo largo de todo el proceso. Sus comentarios y consejos fueron de gran ayuda para mejorar nuestro trabajo.

Además, agradecemos a Rubén Barrera Ramos (alumno del grado de Física) su contribución en áreas específicas de nuestra investigación.

El apoyo de todas las partes ha sido invaluable y estamos sinceramente agradecidos por su ayuda.

# Tabla de contenidos

<b>1. Resumen / Abstract .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Introducción.....</b>	<b>2</b>
<b>3. Marco teórico.....</b>	<b>4</b>
3.1 Radón.....	4
3.2 Dióxido de carbono .....	4
3.3 Efectos de estos gases para la salud.....	5
3.4 Gases en viviendas y exteriores .....	6
3.5 Legislación y normativa.....	7
<b>4. Objetivos .....</b>	<b>9</b>
<b>5. Material y métodos .....</b>	<b>9</b>
5.1 Detectores pasivos.....	9
5.2 Detectores para medidas en continuo .....	10
5.3 Análisis estadístico .....	11
<b>6. Resultados .....</b>	<b>14</b>
6.1 Detectores pasivos.....	14
6.2 Medición continua .....	16
6.3 Coeficiente de correlación de Pearson .....	17
6.4 Funciones de autocorrelación.....	18
6.5 Transformada continua de Wavelet .....	18
6.6 Análisis por tramos .....	19
<b>7. Discusión .....</b>	<b>27</b>
<b>8. Conclusiones.....</b>	<b>29</b>
<b>9. ¿Qué he aprendido con este TFG? .....</b>	<b>30</b>
<b>10. Bibliografía.....</b>	<b>32</b>
<b>11. Anexo.....</b>	<b>35</b>

# 1. Resumen

Se presenta un estudio sobre los niveles de exposición en interiores a radón y CO<sub>2</sub> en la isla de La Palma, concretamente en Puerto Naos y La Bombilla, tras la erupción volcánica de 2021. Estas medidas se llevaron a cabo utilizando detectores pasivos en ambas localidades, además de un detector para medidas en continuo en Puerto Naos, todo ello para comprender el comportamiento del radón y CO<sub>2</sub> en zonas interiores y su relación con determinadas variables atmosféricas. En este estudio se plantea, además de la interpretación de los resultados, predicciones a corto plazo para valorar si con determinados modelos matemáticos se podría predecir el comportamiento de estos gases.

**Palabras clave:** Radón, CO<sub>2</sub>, erupción de 2021, La Palma, Puerto Naos, La Bombilla.

## Abstract

A study is presented on indoor exposure levels to radon and CO<sub>2</sub> on the island of La Palma, specifically in Puerto Naos and La Bombilla, after the 2021 volcanic eruption. These measurements were carried out using passive detectors in both locations, in addition to a detector for continuous measurements in Puerto Naos, all this to understand the behavior of radon and CO<sub>2</sub> in interior areas and its relationship with certain atmospheric variables. In this study, in addition to the interpretation of the results, short-term predictions are proposed to assess whether certain mathematical models could predict the behavior of these gases.

**Keywords:** Radon, CO<sub>2</sub>, 2021 eruption, La Palma, Puerto Naos, La Bombilla.

## 2. Introducción

La Palma pertenece a la Comunidad Autónoma de Canarias (España), y, junto a Tenerife, La Gomera y El Hierro, conforma la provincia de Santa Cruz de Tenerife.

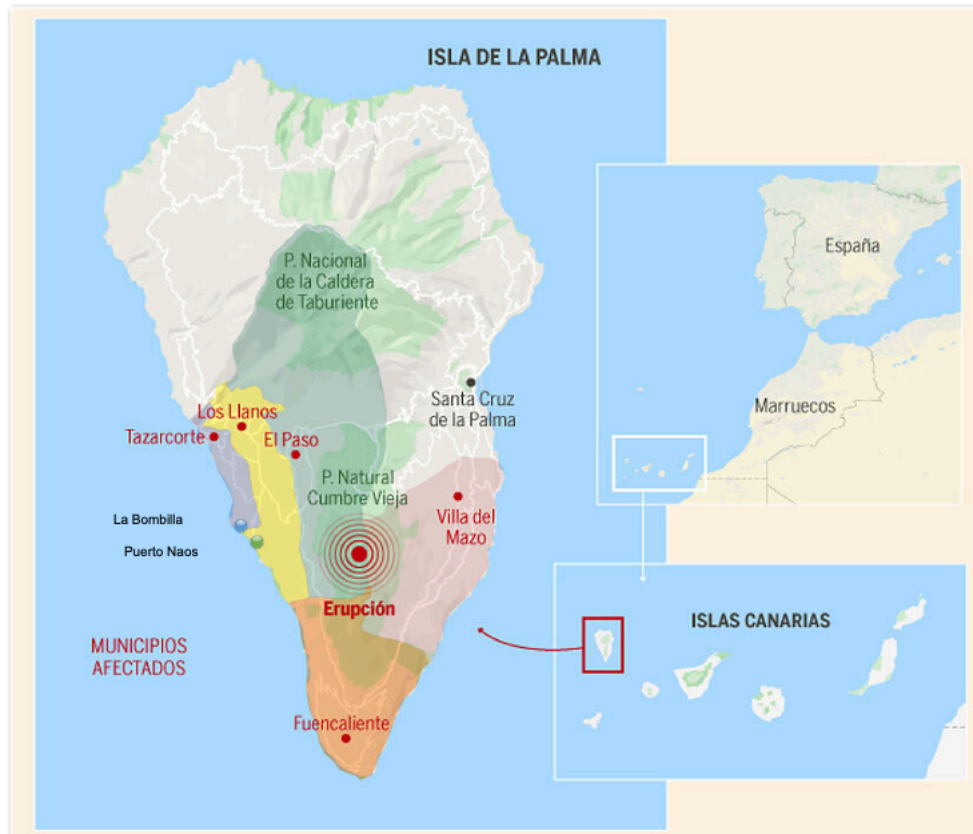
El 19 de septiembre de 2021, en la isla de La Palma, en el paraje de Cabeza de Vaca, cercano a la localidad de El Paraíso, en el municipio de El Paso, dio comienzo una erupción volcánica, que duraría un total de 85 días (finalizando el 13 de diciembre de 2021), siendo la erupción histórica más larga registrada en la isla.

La erupción tenía inicialmente dos fisuras separadas por 200 metros, y ocho bocas. En prevención de que la lava cortase las carreteras de acceso a los núcleos costeros, se evacuó Puerto Naos, La Bombilla, El Remo y Charco Verde, además del cierre de otras carreteras secundarias.

Durante 85 días, los diferentes cráteres expulsaron coladas de lava que ocuparon 1.219 hectáreas de suelo. Las coladas acabaron con casi 3.000 edificaciones, según las estimaciones del sistema de satélites europeos Copernicus. Asimismo, el manto de lava arrasó 370 hectáreas de cultivo y, en total, quedaron afectados 73,8 kilómetros de carreteras [1]. Afectó principalmente a los municipios de Los Llanos de Aridane, El Paso y Tazacorte. En esta isla residen un total de 83.439 habitantes, siendo Los Llanos de Aridane el municipio con mayor población (20.551 en 2022) [2]. En el transcurso de la erupción se vieron afectadas cerca de 7.000 personas.

Actualmente, alrededor de 200 personas, todavía no pueden acceder a sus viviendas en La Bombilla y Puerto Naos, debido a que en estas localidades encontramos valores de CO<sub>2</sub> muy por encima del valor promedio de la concentración de este gas en aire (414,71 ppm). Concretamente en Puerto Naos, se han registrado, en el interior de viviendas desde la erupción volcánica, niveles máximos de 200.000 ppm, con días en los que la media se ha situado sobre 50.000 ppm, lo cual hace estos hogares inhabitables. [3]

Por ello, en este TFG se plantea hacer un estudio sobre los niveles de exposición a este gas, así como a los niveles de radón existentes en estas dos localidades, situadas al oeste de la isla de La Palma, en el municipio de Los Llanos de Aridane (Figura 1).



**Fig 1.** Mapa de La Palma. [16321278095035.jpg]

## 3. Marco teórico

### 3.1 Radón

El radón ( $Rn-222$ ) es un gas radiactivo natural, inodoro, incoloro e insípido, que pertenece al grupo 18 (gases nobles) de la tabla periódica. Se produce naturalmente a partir de la cadena de desintegración del Uranio ( $U-238$ ), que se encuentra en las rocas de la corteza, y tiene un período de semidesintegración de 3,8 días, convirtiéndose en  $Po-218 \rightarrow Pb-214 \rightarrow Bi-214 \rightarrow Po-214 \rightarrow Pb-210 \rightarrow Bi-210 \rightarrow Po-210 \rightarrow Pb-206$  (estable).

En los suelos más porosos, como los arenosos, se produce una mayor emanación de radón que en suelos compactos, ya que los gases tienen mayor facilidad para escapar. Aun así, como norma general, hay más radón en zonas graníticas que en zonas arcillosas, debido a un mayor contenido en uranio de estos tipos de suelos [4].

A pesar de las bajas concentraciones de radón atmosférico al aire libre en condiciones normales, con valores entre 5 y 15  $Bq/m^3$  [5], este gas es responsable del 50% de la dosis de radiación de fondo natural que reciben los seres humanos. El radón puede acumularse en viviendas o en zonas poco ventiladas (alcanzando concentraciones en el rango de los  $kBq/m^3$ ), pudiendo afectar, de este modo, a la realización de determinados trabajos, como la minería, en condiciones de seguridad. Por otro lado, debido a su mayor densidad con respecto al aire, y a su origen (el subsuelo), suele acumularse en las plantas bajas de los edificios. Se estima que entre un 3%-14% de los cánceres de pulmón se asocian a la exposición a concentraciones bajas-moderadas a radón. [6]

### 3.2 Dióxido de carbono

El dióxido de carbono ( $CO_2$ ) es un gas natural, inodoro e incoloro que, a concentraciones normales, no es tóxico (daño o envenenamiento por inhalación), ya que realmente es un gas que los seres vivos exhalan en su respiración. La concentración media en el aire de forma natural actualmente se estima en 414,71 ppm. [7]

Una concentración superior en interiores puede ser indicativo de una insuficiente ventilación en dicho espacio.

El CO<sub>2</sub> también proviene de procesos de combustión, generándose en grandes cantidades en la quema de combustibles fósiles, transportes, procesos industriales, pero también en la respiración de los seres vivos, siendo éste el factor más influyente en los valores de CO<sub>2</sub> en zonas interiores no ventiladas. Pero en nuestro caso, el que más nos interesa es el CO<sub>2</sub> liberado en las erupciones volcánicas, donde es el segundo gas más abundante después del vapor de agua. Al tratarse de un gas cuyo aumento repentino es indetectable por el ser humano, se convierte en uno de los grandes peligros de las erupciones. A raíz de su mayor densidad con respecto al aire, se crean corrientes descendentes que harán que este gas se acumule en gran cantidad en las zonas topográficamente más bajas, pudiendo alcanzar concentraciones incompatibles con la vida.

### 3.3 Efectos de estos gases para la salud

El radón-222 es un gas químicamente inerte que, por sí mismo, no conlleva un daño radiológicamente significativo, debido a su bajo nivel de retención en el organismo humano. No obstante, el efecto de este gas radica en que una fracción elevada de sus descendientes de vida corta (Po-218, Pb-214, Bi-214 y Po-214) se depositan en las diferentes regiones de las vías respiratorias y, debido a sus cortas vidas medias, se desintegran en los tejidos pulmonares antes de que puedan absorberse en la sangre o transportarse al tracto gastrointestinal, siendo estos los responsables del daño radiológico, especialmente por la energía depositada de las desintegraciones alfa del Po-218 y el Po-214. [8]

Por ello, este gas fue declarado cancerígeno humano tipo I por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) en 1988. Hoy en día, solo se ha relacionado con el cáncer de pulmón, siendo la primera causa de cáncer de pulmón en no fumadores, y la segunda causa después del tabaco en los fumadores. Además, en este último grupo, la asociación de tabaco y exposición a altos niveles de radón se asocia a un mayor riesgo de padecer cáncer.

En Europa, se estima que el radón es el causante de un 9% de las muertes por cáncer de pulmón, mientras que en España se estima que es el causante del 6,9% de estas muertes, lo que equivale a unas 1533 muertes al año. [9]



Con respecto al CO<sub>2</sub>, de forma aguda su principal efecto deletéreo es la asfixia por desplazamiento del oxígeno, debido a que, a elevadas concentraciones, es capaz de desplazar el oxígeno, dando lugar a altos niveles de carboxihemoglobina, reduciendo la concentración de los niveles de oxígeno por debajo del 20%. En concentraciones altas, superiores al 7,5%, puede causar dolores de cabeza, falta de concentración, sudoración, somnolencia, mareos, problemas respiratorios, depresión respiratoria, etc. Cuando se alcanza una concentración superior al 11% se produce la pérdida de conciencia en un minuto o incluso menos. En concentraciones cercanas al 25% se producen convulsiones. [10] Estos síntomas pueden verse agravados en los pacientes con patología respiratoria, como ASMA o EPOC, apareciendo dichos efectos a concentraciones menores de las mencionadas.

### 3.4 Gases en viviendas y exteriores

La población en general se ve expuesta a niveles variables de radón en viviendas, lugares de trabajo, escuelas y cualquier otro edificio en donde se pase tiempo de forma habitual. Los valores de radón en los edificios dependen principalmente de las características de la roca y el suelo sobre el que están edificados, teniendo una gran importancia la ventilación del lugar. Además, la exposición al radón también puede provenir de los materiales empleados en la construcción, ya que pueden ser fabricados con componentes que contengan uranio o radio. El gas que es emitido desde el subsuelo y de los materiales de construcción penetra al interior de los edificios a través de grietas en el piso o las paredes o pilares.

En espacios correctamente ventilados, el gas se dispersa, siendo la concentración normal en aire de unos 5-15 Bq/m<sup>3</sup>. Sin embargo, en zonas interiores mal ventiladas, su concentración puede llegar a niveles superiores a 10.000 Bq/m<sup>3</sup>. [11] Las concentraciones más elevadas de radón estarán en los pisos bajos de cualquier edificio, principalmente en sótanos y plantas inferiores al nivel del suelo. Aun así, también se encuentra en las plantas superiores debido a que el radón las alcanza mediante procesos de convección, además de poder ser emitido por los propios materiales de construcción, pero por lo general siempre estará en una concentración menor.

Por otra parte, los niveles de radón en el interior de las viviendas se ven influenciados por variables atmosféricas, como la temperatura, la humedad y la presión, además del tipo de suelo sobre el que se edifica y de la permeabilidad del material utilizado para la construcción.

Con respecto al CO<sub>2</sub>, en lugares cerrados, como en el interior de viviendas u oficinas, la concentración de CO<sub>2</sub>, al igual que la de radón, puede verse modulada por variables atmosféricas.

### 3.5 Legislación y normativa

Como hemos comentado anteriormente, tanto el radón como el dióxido de carbono en altas concentraciones suponen un riesgo para la salud de las personas, por lo que las diferentes organizaciones, tanto nacionales como internacionales, han confeccionado una serie de leyes preventivas para así minimizar el problema que supone para la salud la exposición a estos gases.

Con respecto al radón, en 1990, se acordaron una serie de medidas en la Unión Europea para proteger a la población de los riesgos del radón (Recomendación 90/143 EURATOM). Si bien esas recomendaciones no tenían carácter obligatorio, se recomendaba por parte de la Comunidad Europea que las viviendas de nueva construcción no superasen niveles de radón de 200 Bq/m<sup>3</sup>, pudiendo doblar dicho límite (400 Bq/m<sup>3</sup>) las edificaciones construidas previas a la norma.

Asimismo, el 5 de diciembre de 2013, se aprobó la Directiva Europea (2013/59 EURATOM). En ella, la concentración de referencia se situaba en 300 Bq/m<sup>3</sup> para hogares y centros de trabajo.

El 20 de diciembre de 2019, dicha norma se traspuso parcialmente en el Código Técnico de Edificación (TCE), en el que se recogen medidas correctoras para limitar la penetración de radón en los edificios en función del riesgo de radón del municipio en que se ubiquen, estableciendo como valor de referencia los 300 Bq/m<sup>3</sup> indicados anteriormente.

Actualmente, en el Real Decreto 1029/2022, de 20 de diciembre de 2022, por el que se aprueba el Reglamento sobre protección de la salud contra los riesgos derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes, se establece la creación del Comité del Plan

Nacional contra el radón, adscrito al Ministerio de Sanidad, que será responsable de elaborar el Plan Nacional contra el radón, el cual será revisado cada cinco años, y en el que se establecen medidas reglamentarias adicionales a las expuestas en el CTE, manteniendo el nivel de referencia de radón en 300 Bq/m<sup>3</sup>. [12]

Con respecto al CO<sub>2</sub>, en España existe el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE), recogido en el Real Decreto 1027/2007, que establece distintas categorías IDA (Calidad de Aire Interior requerida) exigibles a los edificios en función del uso que se haga de ellos y valores límite de concentración de CO<sub>2</sub> para cada una de ellas. [13]

De este modo, encontramos las siguientes categorías:

IDA 1: Edificios de uso muy sensibles (hospitales, clínicas, laboratorios y guarderías). El valor límite que se establece para la concentración de CO<sub>2</sub> es de 350 ppm.

IDA 2: Salas comunes de hoteles y similares, residencias de mayores y estudiantes, salas de lectura, bibliotecas, museos, colegios y piscinas cubiertas. Límite de 500 ppm.

IDA 3: Edificios comerciales, cines, teatros, salones de actos y representaciones, habitaciones de hoteles, hostales y pensiones, restaurantes, bares, salas de fiestas, gimnasios y establecimientos deportivos. Valor límite de 800 ppm.

IDA 4: Resto de edificios. 1200 ppm.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (INSST) establece en la NTP 549 [14] que el valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) para exposiciones diarias de 8 horas es de 5000 ppm, con un valor límite para exposiciones cortas de 15 minutos de hasta 15000 ppm.

Además, la Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) ha desarrollado estándares que son una referencia a nivel internacional para mantener una calidad adecuada de aire en los edificios. Entre estos estándares se encuentran el Estándar 62.1-2019 ASHRAE para edificios comerciales e institucionales, y el Estándar 62.2-2019 ASHRAE para edificios residenciales. Así, la ASHRAE recomienda que el nivel máximo de CO<sub>2</sub> en interiores sea de 700 ppm. Una vez superada esa concentración, recomiendan llevar a cabo acciones de ventilación y renovación del aire para garantizar una calidad del aire saludable. [15]

## 4. Objetivos

Con este Trabajo de Fin de Grado se pretende:

- Estudiar los niveles de radón a los que estaría expuesta la población de Puerto Naos y La Bombilla en el caso de que se retornara a la ocupación habitual de las viviendas.
- Analizar la influencia de la emisión de CO<sub>2</sub> en los niveles de radón en la zona.
- Analizar la influencia de las variables atmosféricas en la concentración de dichos gases en el interior las viviendas.
- Elaborar un modelo estadístico que permita realizar predicciones a corto plazo.

## 5. Material y métodos

### 5.1 Detectores pasivos

Los detectores pasivos permiten determinar la concentración de radón durante un periodo de tiempo determinado, en nuestro caso durante un periodo de tres meses (de octubre de 2022 a enero de 2023). Los detectores pasivos que se emplearon fueron detectores de trazas tipo CR-39.

Este tipo de detector pasivo es un sólido orgánico, de poliglicol bicarbonato, que se utiliza como detector de trazas para partículas alfa, ya que es muy sensible a esta radiación, y muy poco sensible a la humedad, temperatura, radiación beta y gamma. Se denomina detector de trazas porque la radiación alfa crea patrones finos de daño intenso a escala atómica. Estos daños forman huellas estables que quedarán registradas en el detector y que se pueden observar tras un revelado químico. Una vez la muestra es preparada y revelada con un dispositivo de revelado químico llamado Radobath, se introduce en un sistema analizador de imágenes llamado Radiometer.

A partir del número de trazas detectadas en el detector pasivo y el tiempo de exposición, se puede obtener la concentración de radón con la siguiente ecuación:

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

Se instalaron 17 detectores en el interior de viviendas de ambas zonas (siempre en plantas bajas y semisótanos). Transcurrido el tiempo de exposición, los detectores fueron recogidos y enviados a un laboratorio acreditado para este ensayo (Laboratorio de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Cantabria, LaRUC, acreditado por ENAC con N° 1204/LE2219 y LABS & TECHNOLOGICAL SERVICES AGQ, S.L., acreditación N° 305/LE1322,) donde fueron analizados.

## 5.2 Detectores para medidas en continuo

En este estudio, se ha empleado el medidor “RTM 2200 Soil Gas” de la compañía SARAD. Este medidor se ubicó en la planta baja de un edificio en Puerto Naos, desde el 03 de agosto de 2022 hasta el 17 de enero de 2023.

Este detector puede tomar medidas cada 1, 5, 15, 30 o 60 minutos. En este trabajo de investigación se ha programado una frecuencia de muestreo de 60 minutos.

El RTM 2200 registra además humedad relativa; presión barométrica; temperatura, concentración de CO<sub>2</sub> y de O<sub>2</sub>; radón rápido; radón lento; y torón.

La diferencia entre radón rápido y radón lento es que en el primero solo se mide el producto de desintegración directa (Po-218) para determinar la concentración de radón. En este caso, el tiempo de respuesta es de solo 12 minutos. Sin embargo, la fluctuación estadística es mayor en comparación con "Radón lento" debido al menor número de desintegraciones incluidas en el cálculo.

Por otra parte, en el caso del radón lento, se utilizan el Po-218 y el Po-214, ambos productos secundarios de radón de vida corta, para determinar la concentración de actividad del radón. Por lo tanto, las fluctuaciones estadísticas son menores debido a que el tiempo de integración es mayor.

## 5.3 Análisis estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos, se ha empleado el programa RStudio, un entorno desarrollado con un código de programación en R, que se emplea en la computación estadística y de gráficos. Con este programa se han obtenido los resultados, aplicando las siguientes técnicas y modelos estadísticos:

### Modelo ARIMA

El sistema ARIMA es un modelo estadístico, dentro de las técnicas de análisis lineal, que se utiliza para comprender la estructura temporal de los datos y predecir valores futuros en una serie temporal.

Este modelo consta de tres componentes: el modelo autorregresivo (AR), el modelo de media móvil (MA) y la diferenciación integrada (I). El modelo AR se refiere a la utilización de valores pasados de la serie temporal para predecir valores futuros, el modelo MA se refiere a la utilización de errores de predicción pasados para mejorar la precisión de las predicciones futuras, y la diferenciación integrada (I) se utiliza para estabilizar la media de la serie temporal y reducir la tendencia en la serie. De esta forma, el valor presente de la serie,  $x(t)$ , se expresan a partir de valores pasados de la serie de la siguiente forma:

$$X_t = \alpha + \overset{AR}{\rho_1 X_{t-1} + \dots + \rho_p X_{t-p}} + \varepsilon_t + \overset{MA}{\phi_1 \varepsilon_{t-1} + \dots + \phi_p \varepsilon_{t-q}}$$

En donde:

$\alpha$ : intercepto

$\rho_i$ : coeficientes autorregresivos del modelo AR

$X$ : valor de la serie en un determinado momento

$\Phi_i$ : coeficientes del modelo MA

$\varepsilon_t$ : error en la estimación para un  $t$  determinado

Adicionalmente, se puede incluir una componente estacional para series que presentan componente periódico, denominado Modelo SARIMA. De forma breve, un modelo SARIMA  $(p,d,q)(P,D,Q)_S$  viene definido por un conjunto de parámetros relacionados con:

- p: Orden del componente AR (Autorregresivo).
- d: Orden del componente de diferenciación.
- q: Orden del componente MA (Media móvil).
- P: Orden del componente AR estacional (Autorregresivo estacional).
- D: Orden del componente de diferenciación estacional.
- Q: Orden del componente MA estacional (Media móvil estacional).

Estos parámetros se utilizan para especificar la estructura del modelo SARIMA y determinar cómo se modelan las dependencias y las estacionalidades en los datos de la serie temporal.

## Coeficiente de correlación de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson es una medida de la fuerza y dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Esta medida se simboliza con la letra  $r$  y su valor puede variar entre -1 y 1. Un valor de  $r$  igual a 1 indica una correlación positiva perfecta entre las dos variables, lo que significa que cuando una variable aumenta, la otra también lo hace de manera proporcional. Por otro lado, un valor de  $r$  igual a -1 indica una correlación negativa perfecta, lo que significa que cuando una variable aumenta, la otra disminuye de manera proporcional.

En nuestro estudio de series temporales es importante conocer la correlación de los datos, que indica si las observaciones pasadas influyen en las actuales. Para ello, usaremos las gráficas de autocorrelación (ACF) y autocorrelación parcial (PACF).

En el caso de la ACF, los valores de los coeficientes la correlación directa entre un valor y su valor pasado sin eliminar la contribución de estados. Para la PACF, se estudia la correlación directa entre  $y_t$  e  $y_{t-2}$ , una vez eliminada las contribuciones intermedias con  $y_{t-1}$ .

## Transformada Continua de Wavelet

La Transformada de Wavelet es una técnica matemática cuya idea básica es descomponer una señal en diferentes escalas y analizar cada una de ellas por separado, detectando de este modo tendencias o patrones estacionales a largo plazo, así como fluctuaciones en los datos a corto plazo, y poder ver así si determinados valores presentan un patrón cíclico.

## Residuos de una serie temporal

Los residuos son la diferencia entre los valores reales de la serie y los valores predichos por el modelo utilizado.

Permiten evaluar la calidad del ajuste del modelo a la serie temporal. Nos interesa que los residuos sean pequeños, gaussianos, con media cero, y que no muestren dependencia temporal entre ellos y/o patrones cíclicos o estacionales, ya que de esta forma nos indica que tenemos una adecuada representación de los datos. Por otro lado, si los residuos son grandes o muestran patrones sistemáticos, entonces el modelo puede necesitar ajustes o mejoras adicionales.

Para comprobar si estos residuos presentan todavía correlaciones temporales o estacionales, usaremos la función de autocorrelación (ACF) con los valores de los residuos de la serie temporal. Además, usaremos la prueba de Box-Pierce o Test de chi cuadrado de Box-Pierce. Esta prueba es igual a la suma de los cuadrados de los valores del ACF de los residuos del modelo para varios retrasos (lags). El resultado se compara con un valor crítico de la distribución chi-cuadrado que tiene los grados de libertad igual al número de lags incluidos en el cálculo del ACF. Si la estadística de prueba es menor que el valor correspondiente en la distribución chi-cuadrado, entonces se acepta la hipótesis nula de que los residuos son ruido blanco y el modelo ARMA es adecuado hasta un número adecuado de retrasos.



## 6. Resultados

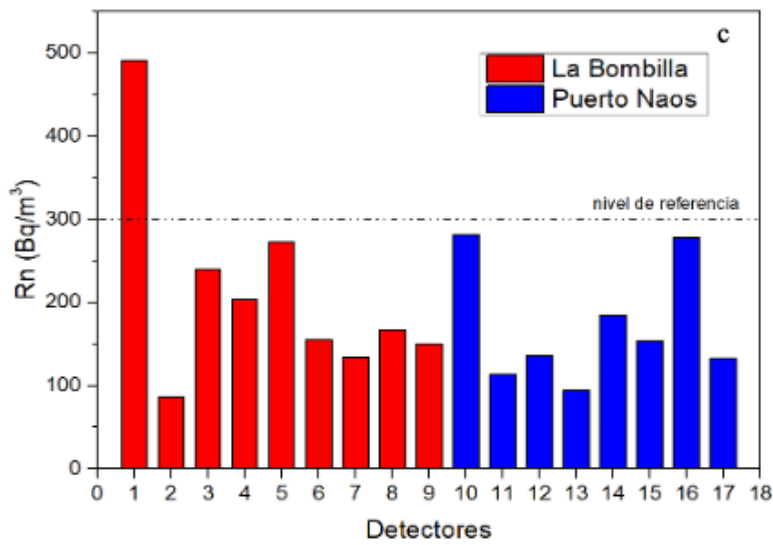
### 6.1 Detectores pasivos

En nuestro estudio se colocaron 17 detectores trazas, 9 en La Bombilla, y 8 en Puerto Naos (**ANEXO Tabla 1**). Estos detectores estuvieron colocados desde el 28 de octubre de 2022 hasta el 17 de enero de 2023, un total de 81 días, en el interior de viviendas.

El mapa de la Figura 2, (realizado con Web Earth Point), muestra la ubicación de los detectores trazas, en rojo los detectores ubicados en La Bombilla (Fig 2.a), y en azul, los de Puerto Naos (Fig 2.b). El número que tiene asociado cada detector es el valor de la concentración de radón en Bq/m<sup>3</sup> obtenida tras su análisis.

Como se observa en el gráfico de la Figura 2.c, la mayor parte de las concentraciones de radón registradas están por debajo del valor de referencia de 300 Bq/m<sup>3</sup> (RD 1029/2022), y sólo uno de los valores (491 Bq/m<sup>3</sup>) superó dicho nivel.

Sin embargo, cabe destacar que estos valores han sido registrados en una zona actualmente deshabitada, en la que los hogares han permanecido cerrados y, por lo tanto, no ha habido prácticamente ningún tipo de ventilación.



**Figura 2.** Mapa de La Bombilla (a) y Puerto Naos (b). Valores registrados por localidad (c).

## 6.2 Medición continua

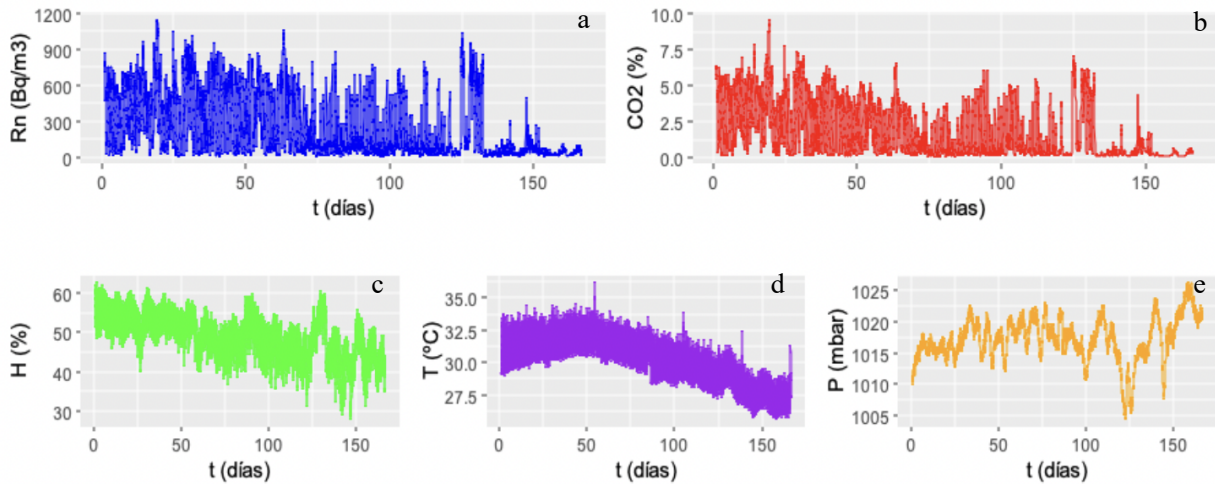
En este estudio, el detector en continuo ha registrado un total de 3974 muestras (una medición cada hora), lo que corresponde a un total de 165 días y 14 horas de datos. En la Tabla 1 se sintetizan los principales parámetros estadísticos.

**Tabla 1. Gases y variables atmosféricas con sus principales parámetros estadísticos.**

	N total	Media	D estándar	Mínimo	1º Cuartil	Mediana	3er Cuartil	Máximo
Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	3974	239,85	255,13	0	40,39	105	436,58	1147
CO <sub>2</sub> (%)	3974	1,72	1,88	0,05	0,27	0,68	3,12	9,59
H (%)	3974	48,71	6,05	27,72	44,48	48,95	53,19	62,86
P (mmHG)	3974	1017,16	3,50	1004,25	1015,16	1017,13	1019,62	1026,40
T (°C)	3974	30,21	1,92	27,57	28,82	30,36	31,59	36,23

De los valores mostrados en la Tabla 1, los datos de Rn (Bq/m<sup>3</sup>) reflejan una media de 239,85 Bq/m<sup>3</sup>, lo cual está por debajo del valor de referencia establecido actualmente en España (300 Bq/m<sup>3</sup>). No obstante, el valor máximo obtenido es 1147,52 Bq/m<sup>3</sup>.

Además, analizando los valores de forma individual, existen 1275 muestras en las que se obtiene una concentración de Rn superior a 300 Bq/m<sup>3</sup>, lo que equivale a que durante un 32% del tiempo de medición, los valores de radón son superiores al valor de referencia. Con respecto al CO<sub>2</sub>, el valor medio durante el periodo de observación fue de 1,72% y el máximo 9,59%. En este caso, 3764 valores de CO<sub>2</sub> se encuentran por encima del 0,1% (1000 ppm) de concentración, lo que corresponde a un 94,71% del tiempo total de exposición. Este punto de corte es el que el INSST establece como valor máximo recomendado en viviendas, a partir del cual se debe ventilar para conseguir valores por debajo del 0,8% (800 ppm).



**Figura 3.** Series temporales de los valores obtenidos.

La Figura 3 muestra las series temporales de los valores registrados con el detector RTM 2200 Soil Gas para el radón (a), CO<sub>2</sub> (b), humedad relativa (c), temperatura (d) y presión barométrica (e).

### 6.3 Coeficiente de correlación de Pearson

En la Tabla 2 están representados los coeficientes de correlación de Pearson, donde se observa el tipo de relación existente entre CO<sub>2</sub>, radón y las variables atmosféricas.

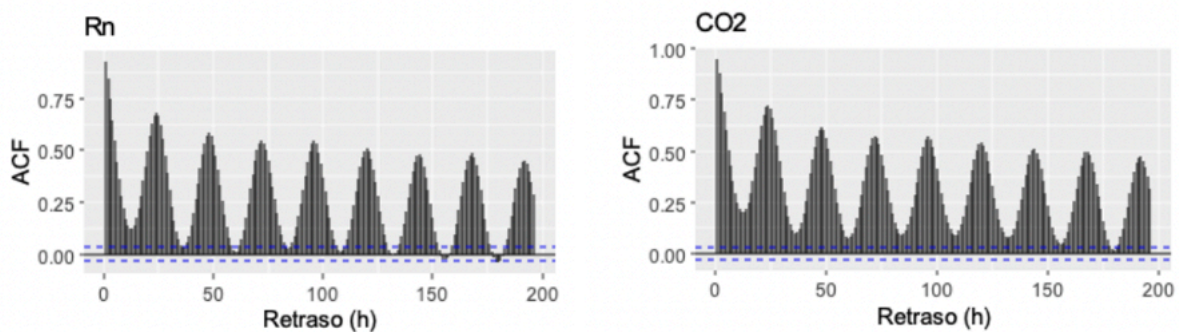
Se aprecia una fuerte correlación entre los niveles de CO<sub>2</sub> y de radón (0,97). Por otra parte, la humedad presenta una relación directa significativa con los valores de radón (0,51) y CO<sub>2</sub> (0,54). Además, la temperatura también tiene una relación directa con radón (0,42) y CO<sub>2</sub> (0,41). Con respecto a la relación entre la presión con el radón y CO<sub>2</sub>, se observa una correlación más débil e inversa con dichos gases (-0,15 y -0,19, respectivamente).

**Tabla 2.** Coeficiente de correlación de Pearson.

	T	H	Rn	CO <sub>2</sub>
P	-0.09	-0.15	-0.15	-0.19
T		0.21	0.42	0.41
H			0.51	0.54
Rn				0.97

## 6.4 Funciones de autocorrelación

En la figura 4 se representa la gráfica de autocorrelación para la serie temporal de radón y CO<sub>2</sub>. Los datos se ven sustancialmente condicionados por las medidas previas, lo que sugiere que la serie no es aleatoria. Se producen ciclos de autocorrelación de 24 horas (los picos de máxima autocorrelación se dan cada 24 horas), lo que implica que existe un ciclo circadiano (con máximos diarios a primera hora de la mañana) tanto para los valores de radón, como para los de CO<sub>2</sub>. Además, esta autocorrelación circadiana se mantiene en el tiempo de forma constante durante los primeros 60 días. Sin embargo, aparecen periodos de intermitencia y finalmente dicha ciclicidad se pierde al final de la serie al disminuir las emanaciones de los gases (ver apartado siguiente).

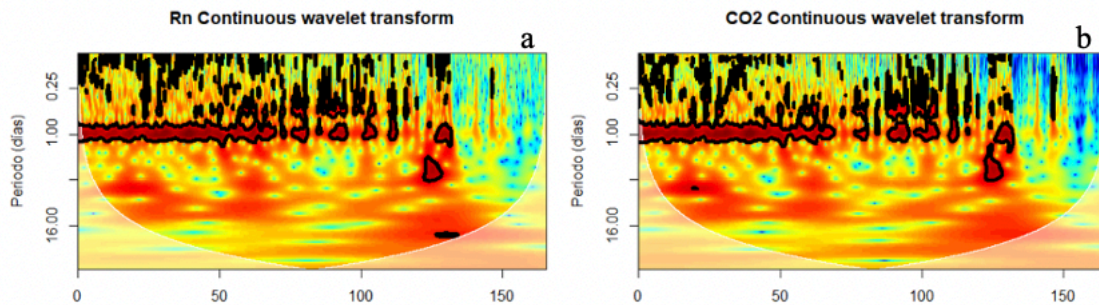


**Fig 4.** Funciones de autocorrelación (ACF) de Rn y CO<sub>2</sub>.

## 6.5 Transformada continua de Wavelet

En la Figura 5 se observa la Transformada Continua de Wavelet para radón (Fig 5.a) y para CO<sub>2</sub> (Fig. 5.b). En ambos casos, se observa que, coincidiendo con lo indicado en el apartado anterior 6.5, las fluctuaciones de los datos son diarias, ya que la mayor parte de estas se agrupan en el periodo 1.00, lo que equivale a un día. Dicha ciclicidad no es continuada en todas las series temporales, presentando fenómenos de intermitencia e incluso desapareciendo dicha ciclicidad al final de las series, probablemente asociada a la disminución de los valores de concentración y que pudiera estar asociado a una disminución de las emanaciones o a un proceso estacional de largo período. A partir de estos resultados podemos comprobar como la transformada de Wavelet proporciona información más valiosa para el entendimiento de la serie con respecto a la ACF, e incluso a otras técnicas de análisis de frecuencia como la transformada de Fourier.





**Fig 5.** Transformada Continua de Wavelet para Rn y CO<sub>2</sub>.

Finalmente, a partir de este estudio se han separado las series temporales en diferentes tramos en donde presentan un comportamiento homogéneo. Esta selección ha sido hecha con el fin de hacer un estudio ARIMA por tramos autoconsistentes, con patrones temporales bien definidos y estables.

## 6.6 Análisis por tramos

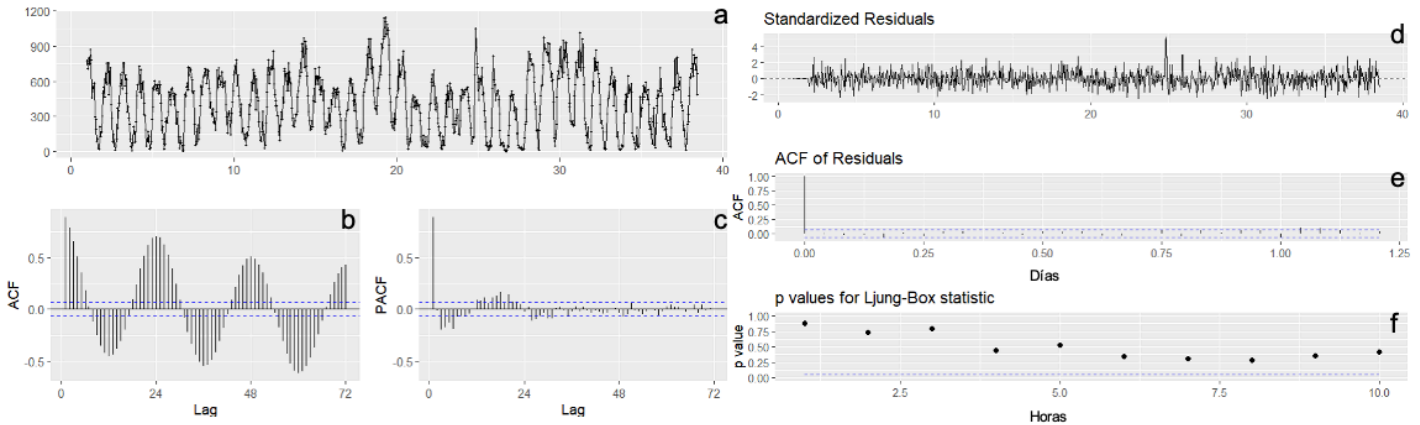
Para el análisis de los datos, se escogieron dos tramos donde la covarianza fuera homogénea, de modo que se cumplieran las premisas necesarias para aplicar la metodología Box-Jenkins (modelos ARIMA).

### Primer tramo

En este primer tramo, se incluyen los valores recogidos desde el día 0 (inicio) hasta el día 38 (Fig 6.a). En la función de autocorrelación (Fig 6.b), se observa que existe una ciclicidad diaria, ya que los picos máximos se producen cada 24h constantemente, al igual que los mínimos, demostrando que existe un ciclo circadiano. Para poder analizar estos datos, hay que comprobar si se trata de una serie estacionaria, es decir, con media, varianza y covarianza estables en el tiempo. Para ello, se empleó la prueba de Dickey-Fuller. Con los datos de este tramo, se obtuvo un p-valor=0,01 (<0,05), por lo que se acepta la hipótesis alternativa, o lo que es lo mismo, se puede asumir que la serie temporal es estacionaria.

Una vez asumimos que la serie es estacionaria, se emplea un modelo ARIMA para poder establecer una predicción a futuro de los resultados a partir de los valores ya conocidos. El programa analiza (función auto.arima del paquete forecast) los posibles modelos ARIMA (en base a la ACF y PACF) para este tramo y las transformaciones necesarias para cumplir el

requisito de estacionariedad. Finalmente, selecciona el más adecuado (de entre multitud de variantes) de forma automática (siguiendo el criterio de parsimonia (Akaike) y disminuyendo la raíz del error cuadrático medio (RMSE)).



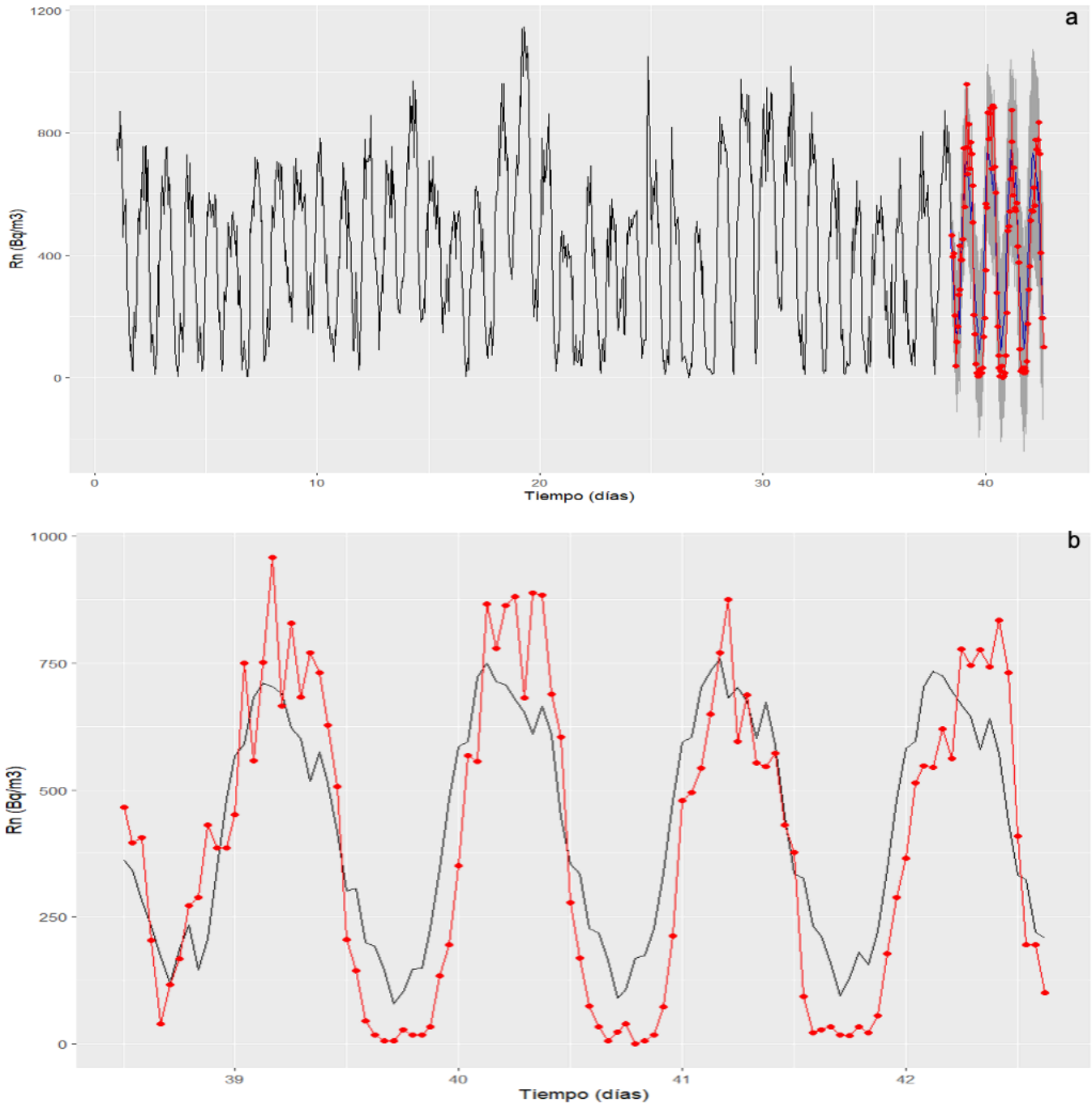
**Fig 6.** Análisis del primer tramo de Radón.

En este tramo el algoritmo proporcionó (**ANEXO Tabla 2**) un modelo SARIMA (2,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>, pues al modelo ARIMA se le añade una componente estacional (S) con un ciclo de 24 horas (24). Como se puede observar, la componente estacional posee 2 parámetros para la parte autorregresiva y ha sido necesario realizar una diferenciación en el ciclo de 24 horas para alcanzar la estacionariedad. Por otro lado, la parte no estacional está constituida por 2 parámetros AR únicamente.

Para comprobar que el modelo es correcto y que, por lo tanto, se puede utilizar para predecir valores a futuro, se debe comprobar que los residuos de la serie temporal sean estacionarios, tengan media cero y una distribución gaussiana sin outliers, y además no tengan estructura temporal (ya que el modelo debe haber retenido toda esta información). En la Figura 6.d se observa la gráfica con los residuos correspondientes de la serie temporal. Además, en la Figura 6.e se aprecia también que no existe autocorrelación entre los valores del residuo durante una duración de 10 medidas, viendo como el p-valor es <0,05 en la escala ACF de residuos y en el test de Ljung-Box (Fig 6.f) el p-valor es >0,05, lo que significa que los residuos no tienen componente cíclica.

En la Figura 7.a se observa la serie temporal de los primeros 38 días, y una predicción a corto plazo realizada con el modelo SARIMA mencionado anteriormente. En la Figura 7.b se observa con mayor detalle la predicción. De este modo, la línea representada de color rojo

en esta figura se corresponde al valor real (conocidos, ya que existe registro de los datos de estos días), y la línea negra corresponde a la predicción hecha por el algoritmo. Como se puede apreciar, el modelo ha podido establecer con gran similitud los valores de radón a 3-4 días vista.

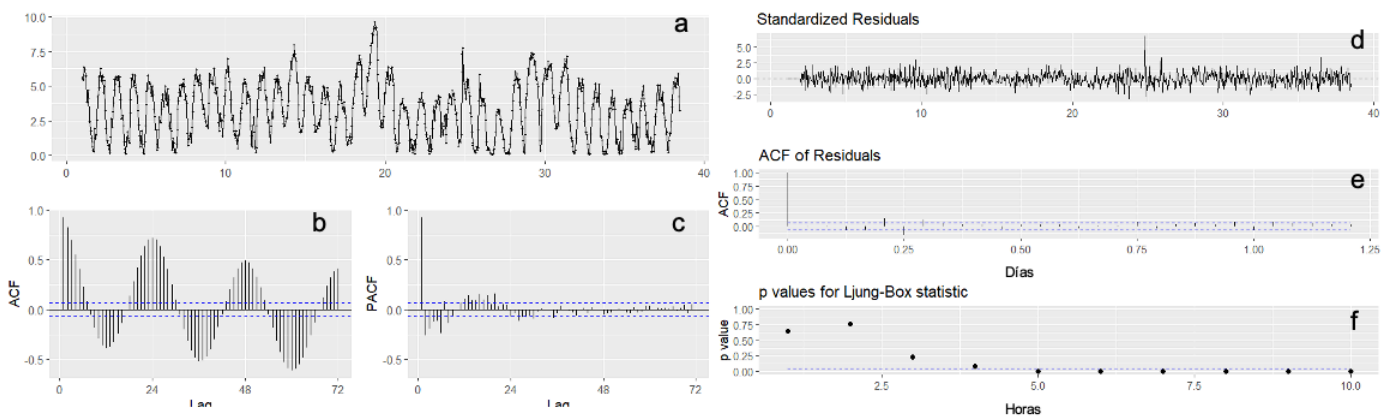


**Fig 7.** Predicción del primer tramo de Radón. En b Rojo corresponde a los valores reales. Negro corresponde a la predicción del modelo SARIMA.



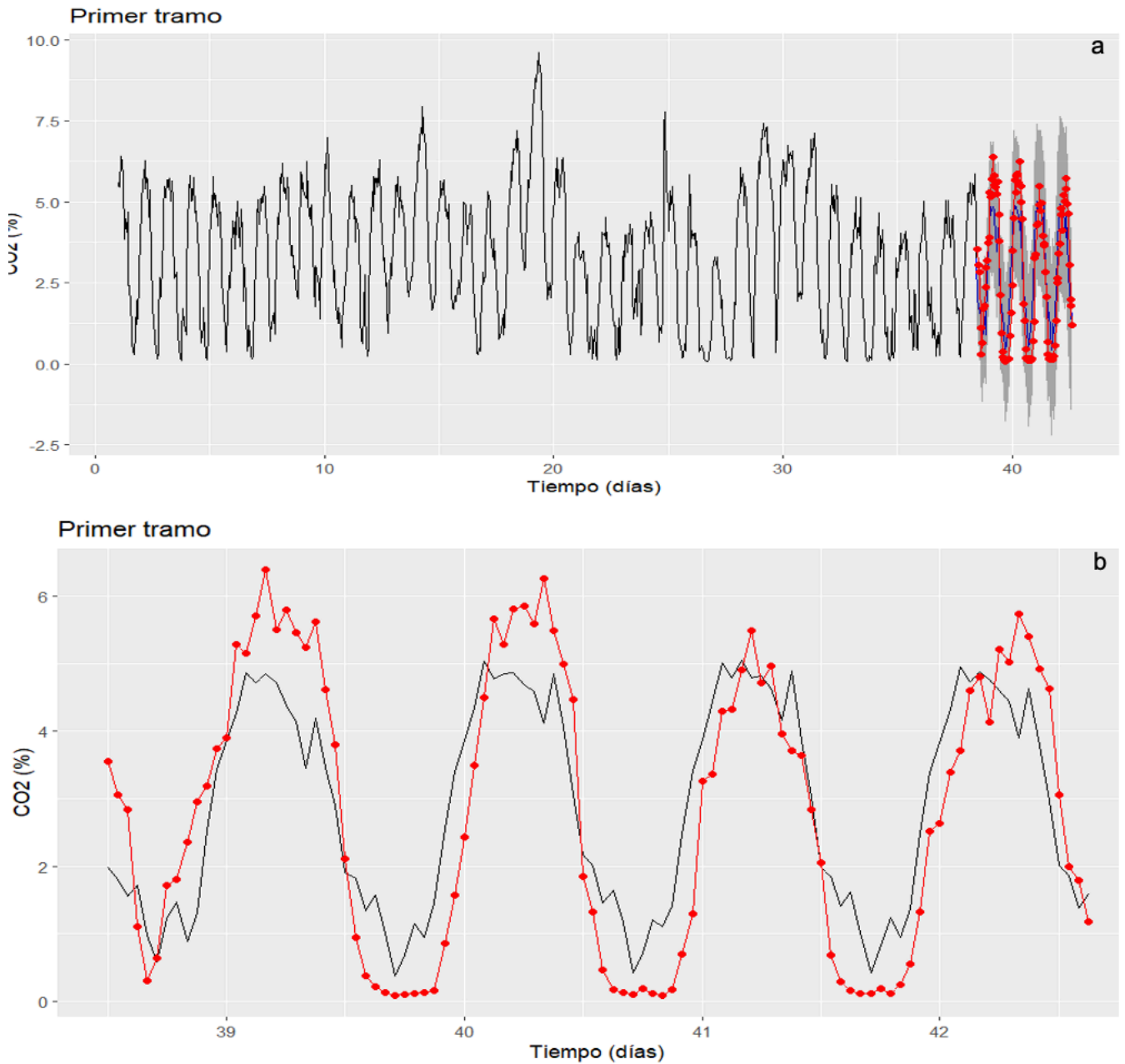
Con respecto al análisis de CO<sub>2</sub> de este primer tramo, se observa en la Figura 8.a la serie temporal de estos valores. En la función de autocorrelación (Fig 8.b) se aprecia, al igual que en el análisis del radón, la ciclicidad diaria, con los máximos y mínimos en ciclos de 24 horas. La prueba de Dickey-Fuller también tiene un p-valor de 0,01, por lo que se asume que la serie temporal es estacionaria en este tramo.

El mejor modelo ARIMA estimado en este caso (ANEXO Tabla 3) es un SARIMA(1,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>. De este modo, se puede observar una estructura similar a la obtenida con la serie de radón descrita anteriormente. Con respecto a los residuos, en la Figura 8.e se observa en la gráfica de ACF que la mayoría del tiempo el p-valor es <0,05, y en el test de Ljung-box (Fig 8.f) las primeras cuatro medidas tienen un p-valor >0,05, por lo que la predicción que nos arroja este modelo es aceptable, ya que los residuos han perdido la gran mayoría de su componente cíclico, aunque la ventana de tiempo para las predicciones es ligeramente menor (4 horas) que en el caso anterior. De todas formas, debido a que los valores de la función de autocorrelación de los residuos son muy pequeños (ver Fig. 8.e), la predicción a corto plazo es aceptable (ver siguiente párrafo).



**Fig 8.** Análisis del primer tramo de CO<sub>2</sub>.

En la figura 9.a se observa la serie temporal del CO<sub>2</sub> con la predicción realizada para este tramo. En la Figura 9.b, se aprecia que existe una tendencia similar entre el valor real (rojo) y la predicción (negro), por lo que podemos aceptar la predicción realizada por nuestro modelo ya que se asemeja a los valores reales ya conocidos. En este caso, aunque hayamos obtenido dependencia temporal en los residuos más allá de 4 horas, el modelo se comporta bastante bien, ya que los residuos, pese a tener esta dependencia, son bastante más pequeños que la señal estudiada, y por ende no se ve afectada la ventana de predicción.

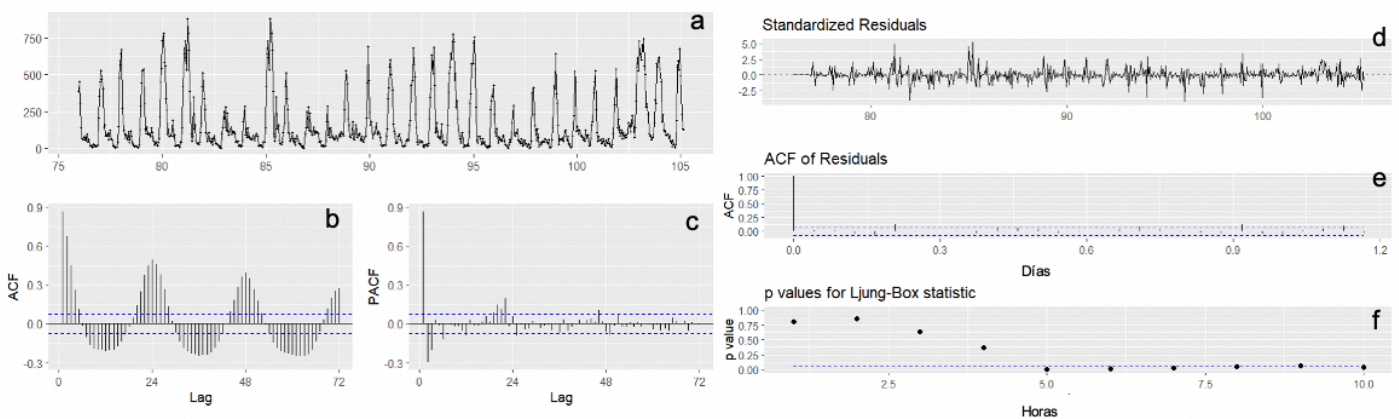


**Fig 9.** Predicción del primer tramo de CO<sub>2</sub>. En b Rojo corresponde a los valores reales. Negro corresponde a la predicción del modelo SARIMA.

## Segundo tramo

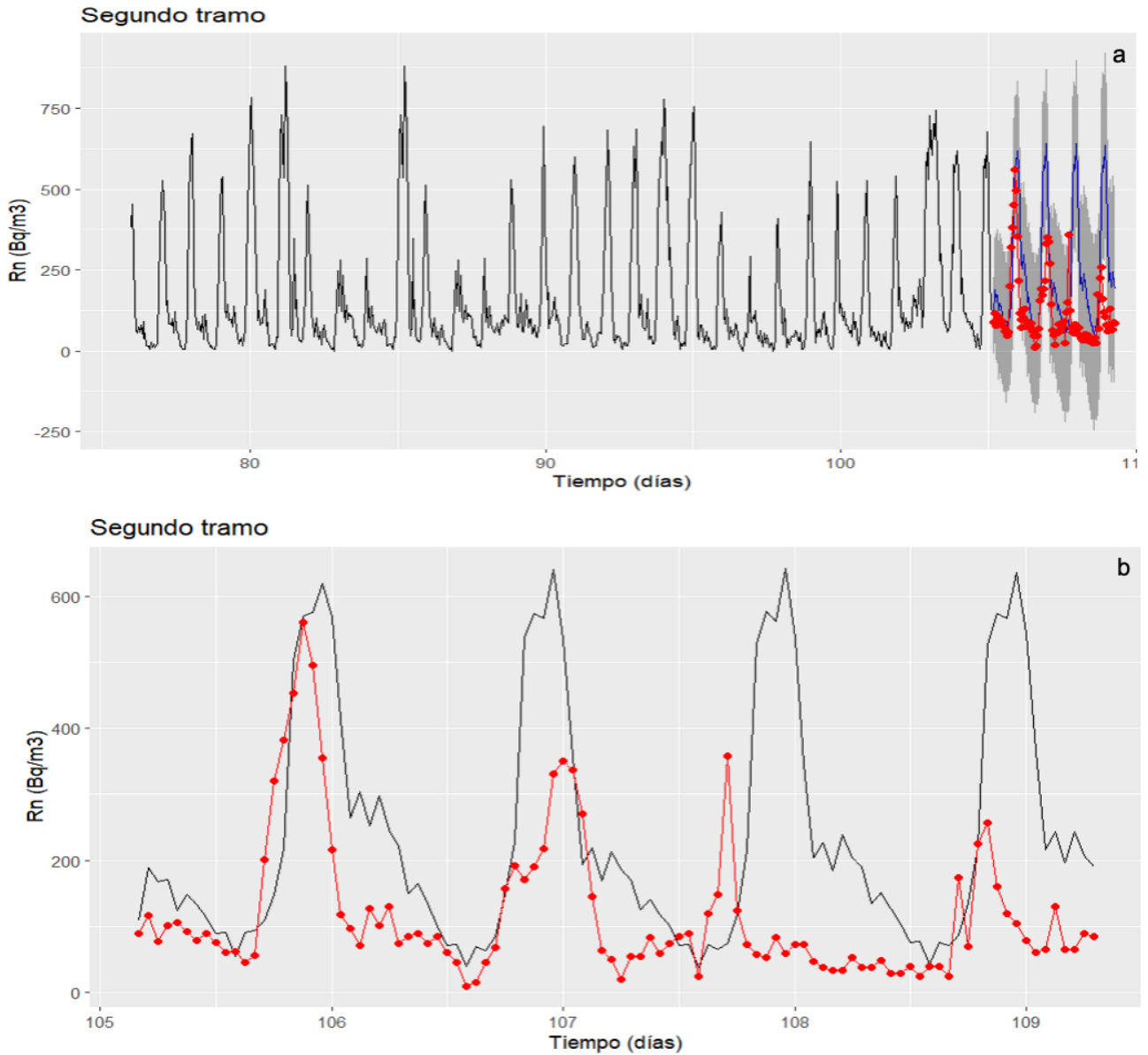
Para el segundo tramo, se seleccionó el periodo comprendido entre el día 70 y el día 105, ya que es un tramo donde la varianza también es homogénea, lo que permite realizar una predicción a corto plazo significativa.

En el caso del radón, al igual que en el primer tramo, se producen picos cada 24 horas (Fig 10.b), por lo que el ciclo es circadiano. En la prueba de Dickey-Fuller se obtuvo un p-valor de 0,01, por lo que la serie también se asume estacionaria. El modelo obtenido para este (ANEXO Tabla 3) es un SARIMA(3,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>. En el análisis de los residuos se observa que para las primeras horas el residuo no tiene componente cíclico (fig. 10.e), por lo que el modelo SARIMA seleccionado es aceptable. Por otro lado, el p-valor para el test Ljung-Box muestra ausencia de correlación en los residuos hasta el cuarto orden, muy similar al descrito anteriormente.



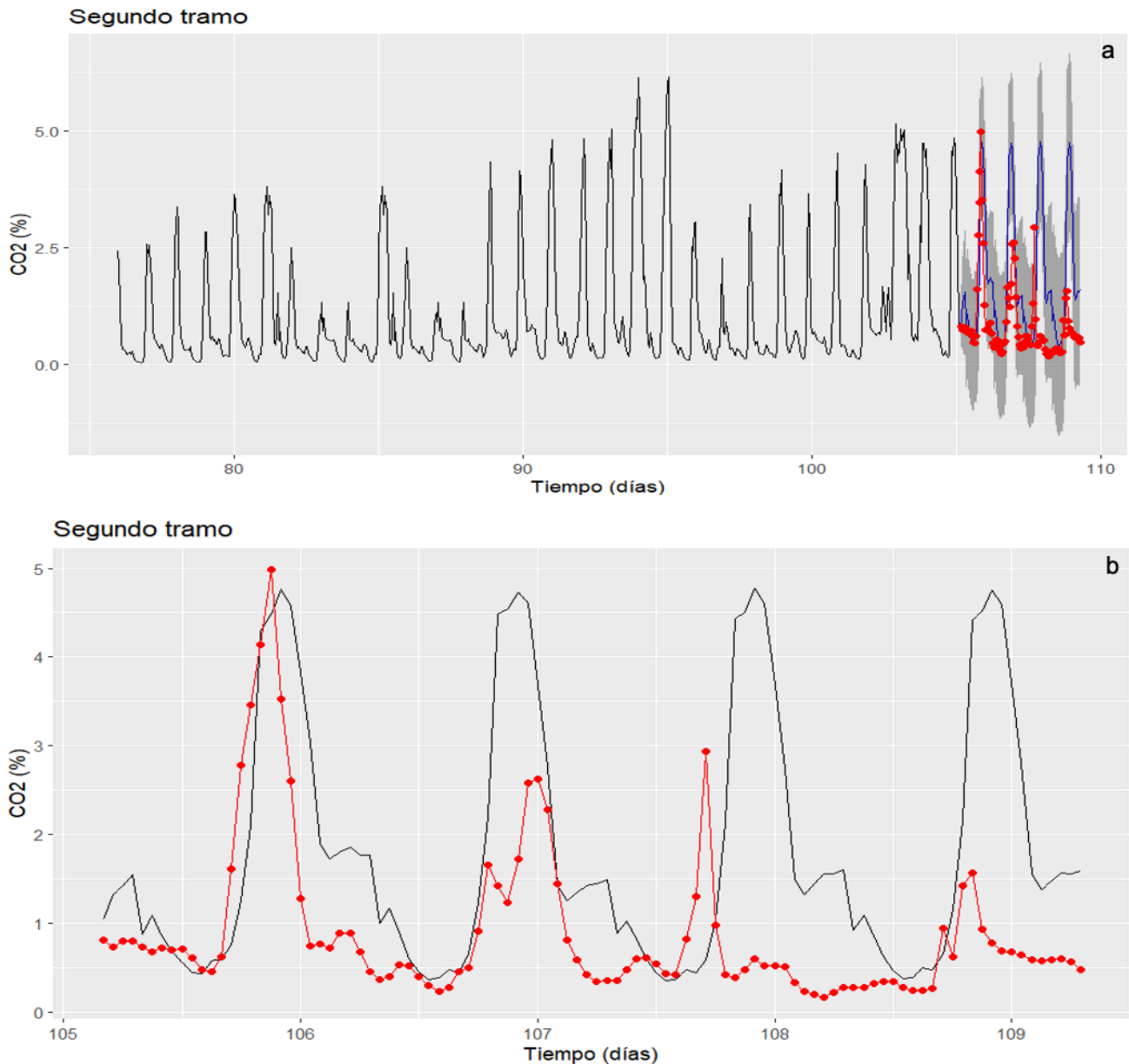
**Fig 10.** Análisis del segundo tramo de Radón.

En cuanto a la predicción realizada para este tramo de radón (Fig 11), para el primer día se consigue una tendencia muy similar a la real. No obstante, a partir del primer día se produce una disminución de la concentración máxima de radón (valores reales) por lo que la predicción pierde valor, lo cual se podría explicar porque a partir de ese día se produjo un cambio en las variables atmosféricas y/o hubo un cambio brusco en el comportamiento del sistema que dista del comportamiento descrito en los anteriores días y, por lo tanto, nuestro modelo SARIMA no fue capaz de predecirlo, ya que se nutre de la evolución temporal pasada.



**Fig 11.** Predicción del segundo tramo de Radón. En b Rojo corresponde a los valores reales. Negro corresponde a la predicción del modelo SARIMA.

Con respecto al CO<sub>2</sub> en este segundo tramo, ocurre como con el radón, se asume que la serie es estacionaria ya que la prueba de Dickey-Fuller tiene un p-valor <0,05. El modelo seleccionado (**ANEXO Tabla 5**) es SARIMA(5,0,1)(2,1,0)<sub>24</sub>. Al analizar los residuos, se observa que no presentan componente cíclico, y el p-valor en el test Ljung-box es >0,05 durante diez horas. En la predicción (Fig. 12), se observa un comportamiento similar a lo sucedido con el radón, pues el primer día el valor real y el predicho se asemejan, pero a partir del segundo día se pierde esa similitud.



**Fig 12.** Predicción del segundo tramo de CO<sub>2</sub>. En **Rojo** corresponde a los valores reales. Negro corresponde a la predicción del modelo ARIMA.

## 7. Discusión

Con respecto a los detectores pasivos, únicamente se observa un detector que haya superado el valor de referencia establecido de  $300 \text{ Bq/m}^3$ . Sin embargo, el detector continuo revela que el 32% de las medidas de concentración de radón son superiores a  $300 \text{ Bq/m}^3$ , lo cual quiere decir que, si esa zona estuviera habitada, prácticamente un tercio del tiempo la población estaría expuesta a una dosis superior a la recomendada, incluso alcanzando en determinados momentos valores superiores a los  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Por lo tanto, es necesario realizar un estudio con detectores pasivos más amplio en número y en tiempo, así como distribuirlos a diferentes alturas en viviendas (ya que estos detectores han sido colocados en su mayoría en plantas bajas, donde la concentración de radón es mayor), para poder así tener un registro más fiable de los valores de radón medidos por este método. Además, si recordamos el principio *ALARA*, todas las exposiciones a radiación deben mantenerse a niveles tan bajos como sea posible, no conformándose por tanto con que la concentración de radón esté por debajo del límite de  $300 \text{ Bq/m}^3$ , ya que para que haya riesgo cero, la concentración en este caso de radón debería ser cero.

El registro obtenido a partir del detector en continuo mostró valores muy elevados al principio de la serie y revela concentraciones superiores a los  $300 \text{ Bq/m}^3$  durante un tercio del tiempo de muestreo. Sin embargo, en base a los datos actuales del registro (no han sido incluidos en el presente estudio) se muestra una disminución considerable, alcanzando valores muchos más bajos y sostenidos en el tiempo. En este caso, también sería recomendable estudiar la evolución del radón un periodo largo, al menos un año, para poder identificar correctamente estos cambios y si son asociados a un ciclo anual natural o a una disminución de los fenómenos de emanación gaseosa.

Por otra parte, las concentraciones de  $\text{CO}_2$  alcanzan picos de 9,59% y, como se explicó en el apartado 3.3, este gas a altas concentraciones es extremadamente tóxico, incluso en cortos periodos de exposición, de ahí el riesgo de que la población vuelva a habitar estas localidades, ya que se alcanzan picos de concentración en ambos gases perjudiciales para la salud, y que además no se pueden predecir a

medio y largo plazo. Por otra parte, a pesar de que los datos de nuestro estudio se han basado en medidas en interiores, registros realizados por varias instituciones (Instituto Geográfico Nacional, Gobierno de Canarias, Instituto Volcanológico de Canarias) en los exteriores muestran que la concentración de CO<sub>2</sub> sigue siendo bastante elevada, alcanzando máximos de más del 5% [3], lo cual es extremadamente tóxico.

Por otro lado, hay que tener en cuenta que este estudio ha sido realizado en condiciones de no habitabilidad y sin la ventilación normal de las viviendas (tal como hacemos habitualmente en nuestras viviendas). Además, se ha limitado a mediciones en plantas bajas (zonas de mayor exposición), lo que corresponde a un pequeño porcentaje de las viviendas (la mayoría de las viviendas en Puerto Naos son edificios de varios pisos de altura).

Además, con este estudio, se puede apreciar la relación directa existente entre radón y CO<sub>2</sub>, además de la influencia que tienen en ellos las variables atmosféricas, según el coeficiente de correlación de Pearson. En el presente estudio se encuentra una alta correlación (0,97) entre ambos gases estudiados (radón y CO<sub>2</sub>). Esta alta correlación se puede explicar porque el CO<sub>2</sub> (en mayor proporción) actúa de “carrier” para el radón, y por tanto su evolución temporal es muy parecida, fenómeno que ha sido reconocido en la literatura científica. [16][17]

Asimismo, se observa una relación directa significativa entre los niveles de radón (0,51) y de CO<sub>2</sub> (0,54) con la humedad. Como ya sabemos, el territorio estudiado está afectado por procesos post-eruptivos de desgasificación de origen volcánico-hidrotermal a consecuencia de la erupción volcánica de 2021. El gas más abundante liberado por los volcanes es el vapor de agua, seguido del CO<sub>2</sub>, además de liberar también radón [10]. Por este motivo, es lógico encontrar esta relación directa entre la humedad y las concentraciones de CO<sub>2</sub> y radón. Además, esta correlación directa significativa coincide también con resultados encontrados en otros estudios (Vivek Walia, 2005) [18], donde el Coeficiente de Correlación de Pearson entre radón y Humedad era 0,31. En nuestro estudio, esta correlación es aún mayor (0,51).

En cuanto a la temperatura, la relación directa de esta variable con radón y CO<sub>2</sub> se explica debido al gradiente de temperatura existente entre la superficie y el subsuelo. De

este modo, al existir una mayor temperatura en el aire (y con una componente claramente circadiana, se produce el denominado “*Chimney Effect*” [19]. Este mecanismo genera un gradiente de presión en el suelo debido a la diferencia entre la temperatura de la atmósfera y del subsuelo, por lo que se produce un aumento en la emanación de radón y CO<sub>2</sub> (correlación positiva).

Con respecto a la presión, en nuestro caso, se asocia la baja presión atmosférica a un efecto descrito en la literatura como *Stack Effect* [20], el cual implica que, al haber una bajada de presión en el interior de la habitación, se produce un efecto similar a un efecto vacío, facilitando que el radón y el CO<sub>2</sub> que se encuentran en el subsuelo a una presión superior asciendan (relación inversa).

Finalmente, cabe destacar que, pese a trabajar con un modelo ARIMA adecuado, capaz de generar predicciones a corto plazo sobre los valores estudiados, y en base a su comportamiento anterior, se presenta un inconveniente, el cambio brusco (momentáneo o persistente) de las variables atmosféricas que influyen en los gases y/o en las componentes endógenas no observadas (presión del sistema hidrotermal, cambios en los mecanismos de estrés del subsuelo, etc.). Como es de esperar, estos cambios en las variables no se pueden predecir, ni tampoco controlar, de modo que solo si las variables endógenas/exógenas no sufren un cambio brusco y repentino, sino que se mantienen similares a las condiciones previas, nuestro modelo ARIMA, es capaz de predecir con bastante exactitud las tendencias tanto de radón como de CO<sub>2</sub>.

## 8. Conclusiones

El presente Trabajo de Fin de Grado se ha enfocado en el estudio de los niveles de radón y CO<sub>2</sub> a los que estaría expuesta la población de Puerto Naos y La Bombilla en el caso de que se retornara a la ocupación habitual de las viviendas. A través de este análisis y comparándolo con los datos al inicio del estudio, se observa que ha habido una considerable disminución en la concentración de ambos gases en la vivienda estudiada. No obstante, se trata de un estudio preliminar, el cual debería ir acompañado de un estudio más detallado, con una duración mayor, de modo que se pueda determinar si esta disminución se debe a fenómenos estacionales o endógenos.



Otro aspecto analizado ha sido la influencia de las variables atmosféricas en la concentración de estos gases en el interior de las viviendas. Como modelo se ha empleado el registro continuo en una vivienda afectada con altos niveles de gases al comienzo del estudio. Así, se ha demostrado que la temperatura, la humedad relativa y la presión atmosférica influyen en la concentración de estos gases, siendo la humedad relativa la variable más significativa. Estos hallazgos proporcionan información para comprender mejor los mecanismos de distribución y acumulación de radón y CO<sub>2</sub> en medios urbanos situados en zonas volcánicas activas. Adicionalmente, se ha observado que los mecanismos de emisión para ambos gases son muy similares, pues presentan un índice de correlación de 0,97.

Finalmente, se ha elaborado un modelo estadístico con el fin de realizar predicciones a corto plazo, que ha demostrado ser eficaz en la estimación de los niveles futuros de radón y CO<sub>2</sub> a corto plazo, siempre que las condiciones endógenas/exógenas permanezcan inalterables en la ventana de pronóstico con respecto a los días anteriores usados por el modelo.

## 9. ¿Qué he aprendido con este TFG?

En primer lugar, con este estudio hemos sido capaces de ampliar nuestros conocimientos sobre la exposición al radón y CO<sub>2</sub>, así como su comportamiento y su distribución, los efectos de estos gases para la salud, y la legislación que los regula.

Además, hemos aplicado técnicas de análisis de datos, lo que incluye la recopilación de los datos, el procesamiento y el análisis de estos, con el empleo de diversas técnicas como coeficiente de correlación de Pearson, funciones de autocorrelación, aplicación de modelos matemáticos ARIMA, y el uso de la plataforma de análisis estadístico RStudio.

Por otra parte, esta investigación nos ha ayudado a ser más conscientes del impacto de los desastres naturales en la salud pública, en este caso uno que nos afectó de cerca como fue la erupción volcánica de La Palma en 2021, ya que, más de un año y medio después, la población de esas localidades sigue sin poder volver a sus casas debido a las concentraciones de estos gases, principalmente de CO<sub>2</sub>.

Finalmente, otro punto de aprendizaje a destacar es el trabajo en equipo, tanto entre nosotros, como con nuestros tutores, con numerosas reuniones donde realizábamos una puesta en común de nuestras opiniones y conocimientos.

## 10. Bibliografía

- [1]: La erupción de La Palma se declara finalizada tras 85 días [Internet]. Gobiernodecanarias.org. Disponible en: <https://www3.gobiernodecanarias.org/noticias/la-erupcion-de-la-palma-se-declara-finalizada-tras-85-dias-y-8-horas-de-duracion-y-1-219-hectareas-de-coladas/>
- [2]: Instituto Nacional de Estadística. (Spanish Statistical Institute) [Internet]. www.ine.es. Disponible en: [https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaAvanzada&entidad\\_amb=no&codProv=38&codMuni=24&codEC=0&codES=0&codNUC=0&denominacion\\_op=like&denominacion\\_txt=](https://www.ine.es/nomen2/index.do?accion=busquedaAvanzada&entidad_amb=no&codProv=38&codMuni=24&codEC=0&codES=0&codNUC=0&denominacion_op=like&denominacion_txt=)
- [3]: Padilla GD, Barrancos J, Hernández PA, Díaz AJÁ, Pérez NM, Pérez AMG, et al. Air CO<sub>2</sub> monitoring network in the urban areas of Puerto Naos and La Bombilla, La Palma, Canary Islands. meetingorganizer.copernicus.org. 2023 Disponible en: <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU23/EGU23-4188.html>
- [4]: Rizo Maestre C, Echarri Iribarren V. The Radon Gas in Underground Buildings in Clay Soils. The Plaza Balmis Shelter as a Paradigm. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2018 May 17;15(5):1004. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/ijerph15051004>
- [5]: Ministerio, Sanidad. COLECCIÓN ESTUDIOS, INFORMES E INVESTIGACIÓN MINISTERIO DE SANIDAD [Internet]. Disponible en: [https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/medioAmbiente/docs/accion\\_Radon.pdf](https://www.sanidad.gob.es/ciudadanos/saludAmbLaboral/medioAmbiente/docs/accion_Radon.pdf)
- [6]: Čujić M, Janković Mandić L, Petrović J, Dragović R, Đorđević M, Đokić M, et al. Radon-222: environmental behavior and impact to (human and non-human) biota. Int J Biometeorol. 2021];65(1):69–83. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01860-w>
- [7]: Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones MW, Andrew RM, Gregor L, Hauck J, et al. Global Carbon Budget 2022. Earth System Science Data [Internet]. 2022 Nov 11;14(11):4811–900. Disponible en: <https://doi.org/10.5194/essd-14-4811-2022>
- [8]: Vargas A. Estimación de la dosis debida a la inhalación de radón. Radio protección 106 [Internet]. Abril 2023. p:20-26.
- [9]: Ruano-Ravina A, Varela Lema L, García Talavera M, García Gómez M, González Muñoz S, Santiago-Pérez MI, et al. Lung cancer mortality attributable to residential radon exposure in Spain and its regions. Environmental Research. 2021 Aug; 199:111372. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111372>

- [10]: Williams-Jones, Glyn & Rymer, Hazel. (2015). Hazards of Volcanic Gases. Chapter 57. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-385938-9.00057-2>
- [11]: World Health Organization: WHO. El radón y sus efectos en la salud [Internet]. Who.int. World Health Organization: WHO; 2016. Disponible en: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/radon-and-health>
- [12]: BOE.es - BOE-A-2019-18528 Real Decreto 732/2019, de 20 de diciembre, por el que se modifica el Código Técnico de la Edificación, aprobado por el Real Decreto 314/2006, de 17 de marzo. [Internet]. www.boe.es. Disponible en: [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2019-18528)
- [13]: BOE.es - BOE-A-2007-15820 Real Decreto 1027/2007, de 20 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios. [Internet]. Www.boe.es. 2012. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2007-15820>
- [14]: Berenguer Subils M, Bernal Domínguez F. NTP 549: El dióxido de carbono en la evaluación de la calidad del aire interior. INSST. Disponible en: [https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp\\_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074](https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_549.pdf/e9364a82-6f1b-4590-90e0-1d08b22e1074)
- [15]: ASHRAE Position Document on Indoor Carbon Dioxide [Internet]. Disponible en: [https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd\\_indoorcarbon\\_dioxide\\_2022.pdf](https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_indoorcarbon_dioxide_2022.pdf)
- [16]: Al-Hilal, Mohamed. Assessment of the Tectonic Effects on Soil Radon Activity Along the Margin of the Arabian Plate Boundary in Northwestern Syria. *Geofísica internacional*, 61(2), 100-112 (2022). Disponible en: <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2022.61.2.2197>
- [17]: Girault, F., Viveiros, F., Silva, C. et al. Radon signature of CO<sub>2</sub> flux constrains the depth of degassing: Furnas volcano (Azores, Portugal) versus Syabru-Bensi (Nepal Himalayas). *Sci Rep* 12, 10837 (2022). Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14653-5>
- [18]: Walia V, Singh Virk H, Frank Yang T, Mahajan S, Walia M and Singh Bajwa B, Earthquake Prediction Studies Using Radon as a Precursor in N-W Himalayas, India: A Case Study, TAO Vol. 16 N°4. 2005. Disponible en:
- [19]: Wang, Y., Luo, W., Zeng, G., Yang, H., Wang, M., Wang, M., et al. High <sup>222</sup>Rn concentrations and dynamics in Shawan Cave, southwest China. *Journal of Environmental Radioactivity*, 199–200, 16–24 (2019). Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2018.12.029>

[20]: Rey JF, Goyette S, Gandolla M, Palacios M, Barazza F, Goyette Pernot J. Long-Term Impacts of Weather Conditions on Indoor Radon Concentration Measurements in Switzerland. *Atmosphere* 2022;13:92. Disponible en: <http://tao.cgu.org.tw/index.php/articles/archive/geophysics/item/708>

## 11. Anexo

Tabla anexo 1. Coordenadas y valores obtenidos para los detectores pasivos situados en La Bombilla (**rojo**) y Puerto Naos (**azul**).

Latitud (°)	Longitud (°)	Rn (Bq/m <sup>3</sup> )	Código detector
28,5920571	-17,9176246	150	CJ3535
28,5922413	-17,9177036	167	CJ4535
28,5930218	-17,9182945	155	CJ4521
28,5928715	-17,9185361	272	DC3172
28,5924953	-17,9182963	134	CJ3387
28,5927614	-17,9187256	203	DC3676
28,5928282	-17,9189235	240	CJ3502
28,5928801	-17,9187996	491	CJ4403
28,5929034	-17,9190628	86	CJ4505
28,5875663	-17,9101777	136	DC5737
28,5863544	-17,9096025	185	CJ4534
28,5880938	-17,911782	282	DC3190
28,5884715	-17,9110149	113	CJ4507
28,5857062	-17,9097601	133	DC3178
28,5857436	-17,9097901	278	CJ3511
28,5860181	-17,9097342	154	CJ3391
28,5873176	-17,9099325	94	CJ3452

**Tabla anexo 2. PRIMER TRAMO RADÓN: SARIMA (2,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>**

	AR1	AR2	SAR1	SAR2
	0,6466	0,2092	-0,6954	-0,3068
<b>S.E.*</b>	0,0024	0,0031	0,0063	0,0072

**Tabla anexo 3. PRIMER TRAMO CO<sub>2</sub>: SARIMA (1,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>**

	AR1	AR2	SAR1	SAR2
	0,8913	-0,6864	-0,3091	-0,0006
<b>S.E.*</b>	0,0157	0,0335	0,0331	0,0047

**Tabla anexo 4. PRIMER TRAMO CO<sub>2</sub>: SARIMA (1,0,0)(2,1,0)<sub>24</sub>**

	AR1	AR2	SAR1	SAR2
	0,9372	-0,0202	-0,1502	-0,6130
<b>S.E.*</b>	0,0383	0,0577	0,0404	0,0412

**Tabla anexo 5. SEGUNDO TRAMO CO<sub>2</sub>: SARIMA (5,0,1)(2,1,0)<sub>24</sub>**

	AR1	AR2	AR3	AR4	AR5	MA1	SAR1	SAR2
	0,2789	0,7435	-0,2968	-0,1929	0,1329	0,8436	-0,5647	-0,2053
<b>S.E.*</b>	0,0653	0,0687	0,0485	0,0396	0,0400	0,0552	0,0387	0,0402

S.E. = error estándar