

Revista Electrónica Nova Scientia

Influencia de las condiciones meteorológicas
sobre el nivel de radón a corto plazo en un
laboratorio subterráneo
Influence of meteorological conditions on short-
term radon level in an underground laboratory

J. García-Tobar¹

¹Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid

España

Javier García Tobar. E-mail: jgtobar@iies.es

Resumen

El objetivo de este artículo es investigar la influencia de la meteorología en el nivel de radón a corto plazo en un laboratorio subterráneo. La concentración de radón y los parámetros ambientales se midieron cada hora en la misma época del año entre 2011 y 2013. Simultáneamente, los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica más cercana. Se calcularon los coeficientes de Pearson entre el radón y el resto de variables. Los resultados muestran que hay una correlación lineal débil entre la concentración de radón y variables individuales como la presión, temperatura y humedad. Lo mismo ocurre con parámetros formados por las diferencias entre los valores del interior y al aire libre. Por estas razones, se utilizó un modelo de regresión lineal múltiple para explicar la variabilidad del radón en función de parámetros meteorológicos. Por otro lado, las series de datos fueron analizadas usando el método de Lomb-Scargle. Se han encontrado periodicidades en los datos de radón que también aparecen en las series meteorológicas.

Palabras Clave: radón, meteorología, cámara de ionización, periodicidad

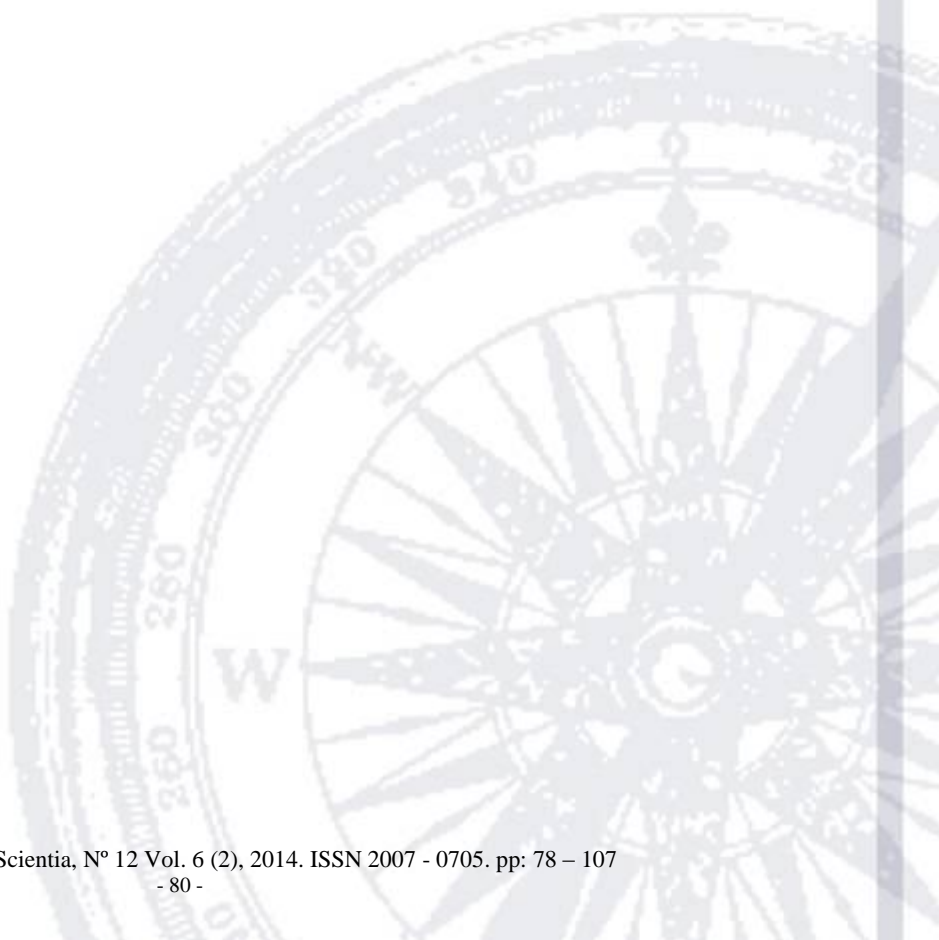
Recepción: 11-06-2013

Aceptación: 09-01-2014

Abstract

The aim of this paper is to investigate the influence of meteorology on short-term radon level of an underground laboratory. Radon concentration and ambient parameters were measured hourly at the same time between 2011 and 2013. Simultaneously, the meteorological data were obtained from the nearest weather station. Pearson's coefficients were determined among hourly radon and the rest of variables. The results show that there is a weak linear correlation among radon concentration and single variables like pressure, temperature and humidity. The same occurs with parameters formed by differences between indoor and outdoor values. For these reasons, a linear multiple regression model is used to explain variability in radon based on meteorological parameters. Otherwise, time-series data were analyzed using the Lomb-Scargle method. Periodicities were found in the radon data which also appear in meteorological series.

Keywords: radon, meteorology, ionization chamber, periodicity



1 Introducción

El radón (^{222}Rn) es un gas noble y radiactivo de origen natural que se forma a partir del ^{226}Ra dentro de la cadena de desintegración del ^{238}U (ver Figura 1) y tiene un periodo de semidesintegración igual a 3.8 días. El radón en el interior de un edificio procede principalmente del terreno y de los materiales de construcción. Al tratarse de un gas, el radón se puede mover de su lugar de origen y, una parte, liberarse a la atmósfera antes de que se desintegre en polonio (^{218}Po).

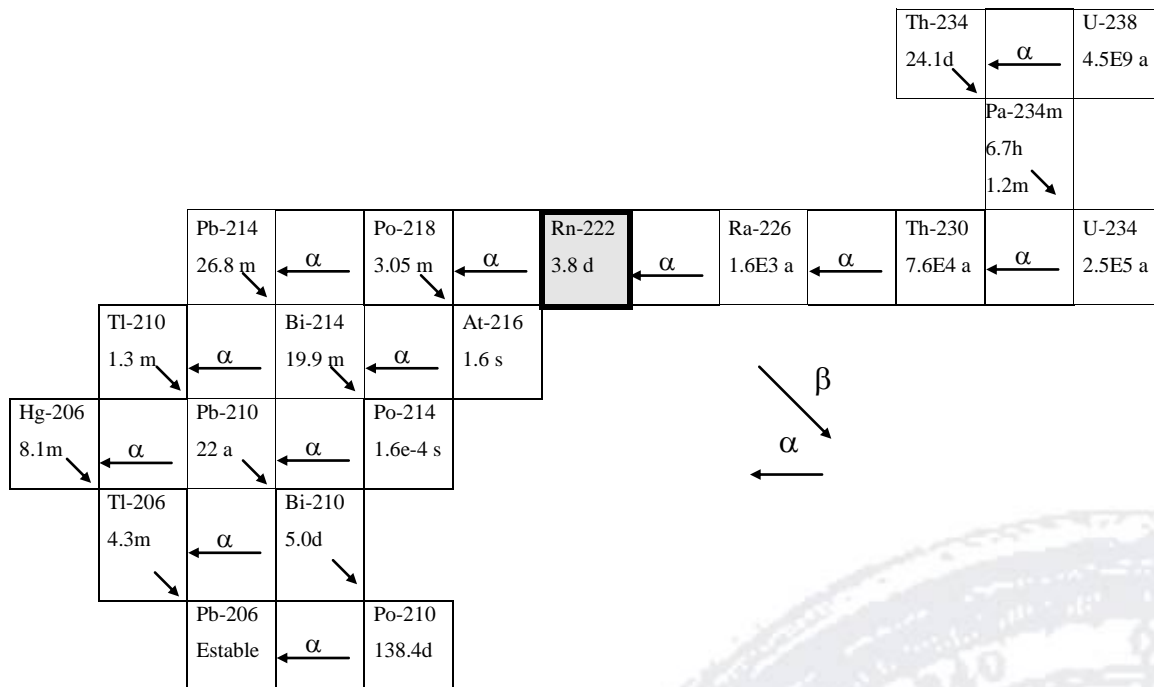


Figura 1. Serie natural del uranio-238 (el radón está destacado en negrita).

Hay dos mecanismos básicos de entrada de radón en el interior de un edificio: la difusión debido al gradiente de concentración de radón en el ambiente y la advección provocada por la diferencia de presiones entre la envolvente del edificio y el terreno. En Arvela y Winquist (1989) se compara el comportamiento del radón a lo largo del día y estacionalmente según el mecanismo predominante. La entrada de radón por efecto de la difusión está gobernada por la ley de Fick e incluye el radón exhalado por los materiales y/o por el suelo. En cambio, la advección sigue la ley de Darcy y se origina por la diferencia de presiones debido al viento, la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior por el efecto chimenea (Eaton y Scott, 1984) y el uso de

sistemas mecánicos de ventilación y climatización. En estos casos puede producirse una depresión en el interior del edificio de unos pocos pascales (Nero y Nazaroff, 1984).

Hay factores externos e internos que influyen en el nivel de radón en espacios interiores. Dentro de los factores externos intervienen parámetros meteorológicos como la presión atmosférica, la temperatura, la humedad relativa, la precipitación, la velocidad y dirección del viento (Barreira, 1961; Virk *et al.*, 2000; Sakashita *et al.*, 2004). En esta categoría también se incluye la inestabilidad atmosférica (Dueñas *et al.*, 1996; Podstawczyńska *et al.*, 2010) o los movimientos sísmicos (Ulomov y Mavashev, 1967; Wakita *et al.*, 1980; Virk *et al.*, 2000; Weinlich *et al.*, 2006) que provocan un aumento inusual del nivel de radón. Los factores internos comprenden las características del edificio y de su ubicación como, por ejemplo: las condiciones ambientales en su interior, el tipo de materiales de construcción y de recubrimiento de los suelos y paredes, el sistema de climatización y ventilación que influye en la tasa de renovación del aire y la geología de la zona definida por el tipo de rocas y distribución de las estructuras geológicas (Ball *et al.*, 1991).

Se ha propuesto que las variaciones periódicas del radón ocurren por las condiciones meteorológicas, particularmente la presión atmosférica y la temperatura (Shapiro *et al.*, 1985; Ball *et al.*, 1991; Yu *et al.*, 1996; Pinault y Baubron, 1997; Finkelstein *et al.*, 2006). Galmarini (2006) señala que la fluctuación diaria del radón está relacionada con la evolución de la capa límite de la atmósfera a lo largo del día y de la emanación constante de radón desde la superficie. Sin embargo, otros estudios señalan que no es posible identificar una influencia meteorológica consistente para explicar la variabilidad temporal del radón, mostrándose a favor de mareas gravitacionales como factor principal (Aumento, 2002; Crockett *et al.*, 2006; Groves-Kirby *et al.*, 2006; Weinlich *et al.*, 2006).

A pesar de la variabilidad que tiene la concentración de radón a lo largo del tiempo, ya sea en espacios interiores o en la capa baja de la atmósfera, presenta en la mayoría de los casos dos aspectos en común. A corto plazo, el radón tiene niveles máximos a primera hora de la mañana mientras que los mínimos se alcanzan por la tarde (Kolarž *et al.*, 2009). A largo plazo, la concentración de radón suele ser mayor en invierno que en verano (Miles y Algar, 1988).

El radón es la fuente natural más importante de exposición a la radiación ionizante. La inhalación de radón (y sus descendientes) es la segunda causa de cáncer de pulmón. En relación con esta problemática, la Comisión Europea en su Recomendación 90/143 Euratom y en la Directiva 96/29/Euratom se refiere a las fuentes naturales de radiación. Este aspecto está regulado en España en el Título VII del Reglamento sobre Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (publicado en el BOE 26/07/2001). La Recomendación sobre radón en el interior de edificios establece el nivel de referencia en 400 Bq/m^3 para el examen de las acciones correctoras en edificios existentes y el nivel de diseño en 200 Bq/m^3 para futuras construcciones. La Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) recomienda en la Publicación 65 (*Protection against Radon-222 at Home and at Work*) de 1993 niveles de acción en viviendas entre 200 y 600 Bq/m^3 y en lugares de trabajo entre 500 y 1500 Bq/m^3 . La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) establece en un límite máximo permitido de radón en aire de 148 Bq/m^3 (equivalente a 4 pCi/l). Este límite se toma como referencia en otros países de América como México, en donde no existe actualmente una norma específica al respecto.

El radón tiene diversas aplicaciones en campos tan dispares como la prospección de uranio e hidrocarburos, la selección de sistemas hidrogeológicos, la detección de fallas y fracturas, la predicción de terremotos y tormentas, la estimación de la contaminación por compuestos orgánicos, el uso como trazador natural en el almacenamiento de CO_2 y en procesos atmosféricos. En particular, el radón es un útil trazador en la atmósfera (Butterweck *et al.*, 1994; Jacob *et al.*, 1997) porque su periodo de semidesintegración es similar al tiempo de permanencia en la atmósfera del agua, aerosoles y de algunos contaminantes (NO_x , SO_2 , CO y O_3) y, además, está dentro del orden de magnitud de la mayoría de los procesos dinámicos que ocurren en este medio.

El objetivo de este artículo es investigar la influencia de la meteorología en el nivel de radón a corto plazo del laboratorio de radiactividad ambiental del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (en adelante, CEDEX). Esta investigación ha sido suscitada porque el radón contribuye al fondo radiactivo de los detectores de espectrometría gamma, lo cual puede afectar a las medidas (Bossew, 2005). En esta situación se requiere tener controlado y reducir el nivel de radón. Se ha decidido estudiar el nivel de radón a corto plazo porque en el laboratorio no suelen realizarse medidas con un tiempo de exposición superior a una semana.

Para relacionar el nivel de radón con las condiciones meteorológicas se realiza un modelo de regresión lineal múltiple en función de varios parámetros meteorológicos. En este estudio también se analiza espectralmente las series de datos de radón y de algunos parámetros ambientales y meteorológicos.

2 Materiales y métodos

2.1 Descripción del laboratorio

El laboratorio de medida de radiactividad ambiental del CEDEX está situado en el tercer sótano del edificio CETA (Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas), aproximadamente a diez metros de profundidad. Los materiales de construcción del laboratorio son típicos (hormigón, cemento, ladrillos, etc.). El nivel de radón se reduce por la ventilación del laboratorio. En este aspecto, no se han aplicado más actuaciones como, por ejemplo; aislar las paredes y el suelo con un revestimiento especial que sirva como barrera al paso del radón.

En la Figura 2 se muestra un plano esquemático del laboratorio en donde se señala la ubicación de diversos elementos: aparatos de aire acondicionado, detectores, puertas de entrada y salida,... y también se indica la superficie (y volumen) del laboratorio así como de las salas que lo componen. En concreto, el detector “AlphaGUARD” para medir la concentración de radón del laboratorio se coloca en la sala nº 2 encima de una mesa próxima a los detectores de espectrometría gamma.

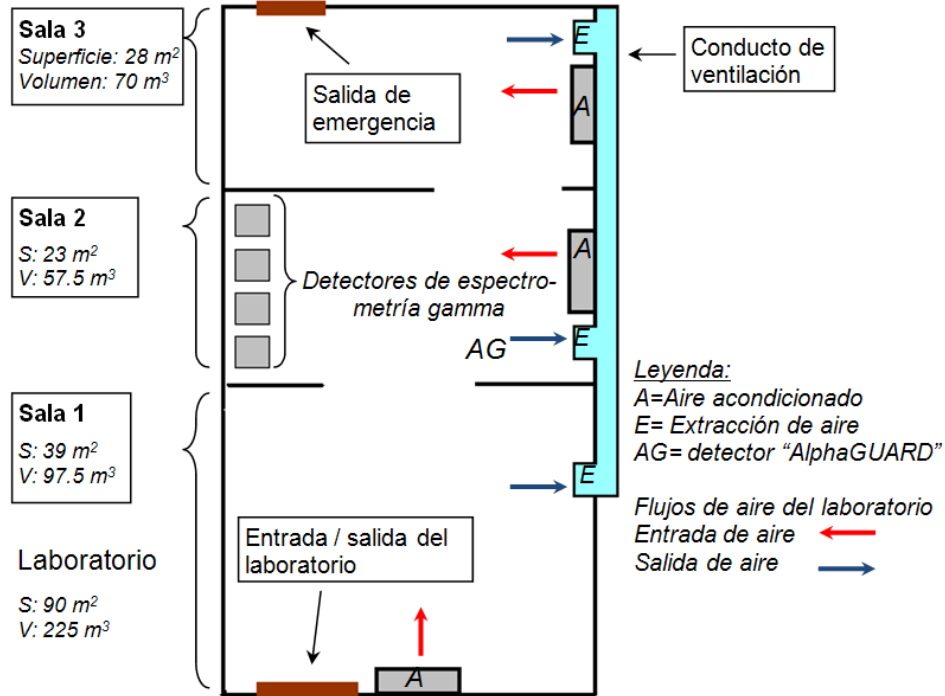


Figura 2. Plano esquemático en planta del laboratorio de vigilancia radiológica del CEDEX.

El laboratorio dispone de climatización, que introduce aire limpio del exterior, y un sistema independiente de extracción de aire que cuenta con una rejilla de ventilación en cada sala (ver distribución en la Figura 2). Hay una leve sobrepresión en el interior del laboratorio porque el caudal de aire que entra en el laboratorio por la climatización es ligeramente superior al caudal extraído. El sistema de climatización mantiene la temperatura del laboratorio en torno a 21 °C. Por otra parte, la humedad en el interior del laboratorio varía conforme a las variaciones de humedad en el exterior (ver Figura 3). Esta circunstancia es comprensible porque los equipos de climatización utilizan aire procedente del exterior.

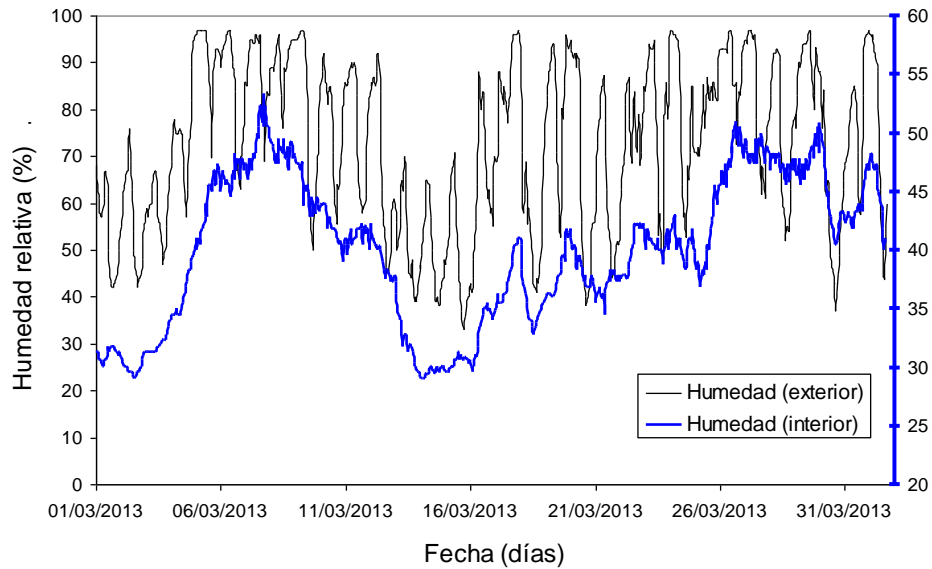


Figura 3. Evolución de la humedad en el interior del laboratorio y en el exterior del mismo (estación meteorológica) durante el mes de marzo de 2013.

Se ha comprobado que la ventilación es una medida eficaz para reducir el nivel de radón en laboratorios subterráneos (Liu *et al.*, 2007; Udovičić *et al.*, 2009). De hecho, la concentración de radón puede llegar a 300 Bq/m^3 en un almacén sin ventilación que está situado junto al laboratorio del CEDEX.

2.2 Equipo para medir radón

Para medir radón se ha utilizado una cámara de ionización portátil modelo “AlphaGUARD” (ver Figura 4). Con este equipo se han medido concentraciones ambientales de radón en continuo, obteniéndose una medida integrada cada hora. El equipo también dispone de sensores para medir la presión, temperatura y humedad relativa.



Figura 4. Detector para medir gas radón en continuo modelo “AlphaGUARD”.

En la Tabla 1 se resumen las especificaciones técnicas del equipo (Genitron Instruments, 2013). El procedimiento de medida se basa en la espectrometría alfa de los descendientes del radón depositados en el interior del detector.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del detector AlphaGUARD.

Fabricante	Genitron Instruments (Alemania)
Modelo del detector	Modelo “AlphaGUARD” PQ2000 PRO
Tipo de detector	Cámara de ionización
Volumen activo del detector	0.56 l.
Modo de operación	Modo difusión (radón en aire): cada 10 min durante un ciclo de 60 min Nivel de radón: $2 \dots 2 \cdot 10^6$ Bq/m ³
Rango de operación	Presión atmosférica: 700...1100 hPa Humedad relativa: 0...99 %

El radón se ha medido con el detector en modo difusión. El tiempo de muestreo se ha elegido igual a una hora en vez de 10 minutos (otra opción disponible en el detector) para apreciar mejor la variación diaria de radón y también para reducir los errores de tipo estadístico. La concentración de radón se expresa en Bq/m³.

El detector se situó a 1 m sobre el nivel del suelo y a más de 50 cm de la pared más cercana, cumpliendo con la recomendación dada por el Consejo de Seguridad Nuclear (2010) para la colocación de detectores de radón. Durante las medidas se procuró que las entradas del personal al interior del laboratorio fuesen mínimas para evitar cualquier tipo de influencia en el nivel de radón.

2.3 Datos

En este estudio se han utilizado las medidas de concentración de radón en el interior del laboratorio que se realizaron en la misma época del año entre 2011 y 2013. Se tratan de medidas realizadas cada hora de forma ininterrumpida. En la Tabla 2 se indican las fechas, número de días y datos que corresponden a cada intervalo de medidas. Por comodidad se identifica cada intervalo con un número romano (I, II y III).

Tabla 2. Características del intervalo de medidas de radón.

Intervalos	Fechas y horas (inicio/fin)	Nº días	Nº datos
I	15/03/2011 (16:00) – 23/03/2011 (00:00)	≈ 7	177
II	28/03/2012 (11:00) – 09/04/2012 (10:00)	12	288
III	20/03/2013 (00:00) – 31/03/2013 (23:00)	12	288

Simultáneamente, se obtuvo los i) parámetros ambientales del interior del laboratorio y ii) parámetros meteorológicos.

i) Parámetros ambientales en el interior del laboratorio: concentración de radón (Bq/m^3), presión atmosférica (hPa), temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (%). Estos valores se han obtenido cada hora con el detector “AlphaGUARD”.

ii) Parámetros meteorológicos: presión atmosférica y su tendencia (hPa), temperatura ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%) y la velocidad del viento (m/s). Se entiende por tendencia barométrica a los cambios registrados en la presión barométrica durante las tres últimas horas. La unidad internacional estándar para la presión barométrica es el hectopascal que es equivalente al milibar.

La información meteorológica se obtuvo cada hora de la estación de la Agencia Estatal de Meteorología (en adelante, AEMet) situada en la parte más alta del “Parque del Retiro” a escasos 700 metros del laboratorio del CEDEX. Esta estación se identifica con el nº 3195 dentro de la red de estaciones automáticas de superficie del AEMet. En la Tabla 3 se muestra información sobre la estación.

Tabla 3. Información de la estación meteorológica del “Parque del Retiro”.

Número de la estación	3195
Situación	“Parque del Retiro” junto al Paseo de Uruguay (Madrid)
Latitud / Longitud	40° 24' 43" N / 3° 40' 41" O
Altitud (con respecto al nivel del mar)	667 m
VARIABLES METEOROLÓGICAS	Temperatura (°C)
Datos disponibles en la Página Web de AEMet: http://www.aemet.es	Velocidad del viento (km/h) y dirección del viento Racha (km/h) y dirección de la racha Presión (hPa) y tendencia (hPa) Humedad (%) y precipitación (mm)

2.4 Modelo de regresión lineal múltiple

Con este método se desea relacionar la concentración de radón en el interior del laboratorio, que es la variable dependiente o variable respuesta, con parámetros ambientales del interior del laboratorio y meteorológicos que son las variables explicativas o independientes. Para resolver este problema se utiliza un modelo de regresión lineal múltiple (en adelante, MRLM), en donde se incluyen n variables explicativas para determinar el valor estimado \hat{y} de la variable dependiente y . El valor estimado se obtiene como una combinación lineal de las variables explicativas, como se muestra en la siguiente expresión.

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_n \cdot x_n \quad (1)$$

en donde β_0 es la constante de regresión y $\beta_1 \dots \beta_n$ son los coeficientes de regresión.

El parámetro β_0 representa el valor medio de la respuesta si todas las variables explicativas valen cero. Los coeficientes de regresión representa el incremento de la respuesta media cuando la

variable explicativa aumenta en una unidad y el resto de variables no cambian. Estos coeficientes se han calculado por el método de mínimos cuadrados.

En la práctica, el MRLM y las técnicas de análisis complementarias se han calculado con el programa informático Minitab. A continuación, se definen los estadísticos que se han empleado.

i) R^2 : El coeficiente de determinación se define como la proporción en la variación de la variable respuesta que se explica por factor/es independiente/s. Puede variar entre 0 y 1, siendo 1 el valor correspondiente a un ajuste perfecto. Este coeficiente tiene el inconveniente que siempre aumenta al haber más variables, aunque no sirvan para explicar la respuesta.

ii) R^2 -corregido: El coeficiente de determinación corregido, a diferencia del anterior, tiene en cuenta el tamaño de la muestra (n) y los grados de libertad de los factores independientes (k) según la fórmula (2). Así se asegura que el coeficiente de determinación no esté sobreestimado porque se penaliza, por ejemplo, que haya un exceso de variables en el modelo.

$$R^2 - \text{corregido} = 1 - \left| \left(1 - R^2\right) \cdot \frac{n-1}{n-1-k} \right| \quad (2)$$

iii) VIF (“Variance Inflation Factor”): El factor de inflación de la varianza sirve para detectar multicolinealidad en el modelo, que consiste en que al menos dos variables explicativas tienen una correlación alta entre sí. El factor para una determinada variable x_i se calcula a partir del coeficiente de determinación.

$$VIF_i = \left(1 - R_i^2\right)^{-1} \quad (3)$$

Si alguno de los factores VIF de las variables supera 10 entonces se supone que hay multicolinealidad en nuestro modelo. No se debe confundir con el problema de colinealidad que ocurre al haber una relación lineal entre dos o más variables explicativas. En este caso, el coeficiente de correlación de Pearson es próximo a la unidad.

iv) F-test: El test basado en la distribución de Fischer se utiliza para medir la relevancia del conjunto de coeficientes del modelo. Con esta prueba se evalúa si se cumple la hipótesis nula (todos los coeficientes son nulos) o la hipótesis alternativa que consiste en que alguno de los coeficientes de regresión es distinto de cero.

$$\begin{aligned} \text{Hipótesis nula } H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_n = 0 \\ \text{Hipótesis alternativa } H_1 : \text{uno o más } \beta_i \neq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

El estadístico F es igual a la media cuadrática de la regresión (MSR, “Mean Square Regression”) dividido por la media cuadrática del error (MSE, “Mean Square Error”).

$$F = \frac{MSR}{MSE} \quad F(k, n-k-1) \quad (5)$$

El numerador tiene k grados de libertad, mientras que en el denominador hay $n-k-1$. Si no se cumple la hipótesis nula, entonces el cociente es mayor que cuando la hipótesis nula es verdad. Por esta razón, si F es demasiado grande, se rechaza H_0 y se concluye que el modelo de regresión es significativo. Los p-valores, que se definirán posteriormente, permiten estimar la relevancia del F-Test.

v) t-Test: La prueba t-Student se aplica individualmente a cada coeficiente de regresión. Esta prueba indica si el coeficiente en cuestión es igual o distinto de cero con un nivel de confianza. El valor del t-Test se obtiene según la siguiente expresión.

$$t = \frac{\hat{\beta}_i - \beta_i}{SE(\hat{\beta}_i)} \quad t(n-k-1) \quad (6)$$

en donde $\hat{\beta}_i$ es el valor estimado del coeficiente β_i (considerando la hipótesis nula se cumple que $\beta_i = 0$) y $SE(\hat{\beta}_i)$ es el error estándar asociado al coeficiente estimado. Tiene $n-k-1$ grados de libertad. Como en el test anterior, los p-valores determinan la relevancia de la prueba t-Student.

vi) P-valor (“p-value”): El p-valor mide el nivel de relevancia que tiene aceptar o rechazar la hipótesis nula en contraposición con la hipótesis alternativa. Se calcula utilizando la distribución de t-Student para los coeficientes de regresión y la distribución de Fischer en el F-test para todo el modelo. El p-valor se compara con el nivel de confianza que normalmente se toma $\alpha = 0.05$. Si el p-valor es menor que 0.05, entonces nos encontramos en la zona de rechazo y puede concluirse que la variable (o modelo) en cuestión es relevante y, por tanto, se rechaza la hipótesis nula.

2.5 Análisis espectral

El análisis espectral se ha realizado mediante el método de Lomb-Scargle que transforma series temporales formadas por datos, ya sean distribuidos uniformemente o no en el tiempo, en un espectro de potencia cuya representación gráfica se denomina periodograma. Este método fue propuesto inicialmente por Lomb (1976) y mejorado por Scargle (1982). Consiste básicamente en descomponer la serie temporal de datos en funciones de senos y cosenos. Se trata de un método similar a los métodos estadísticos de mínimos cuadrados porque minimiza las diferencias entre los datos observados y estimados.

El método de Lomb-Scargle es una variación de la Transformada Discreta de Fourier, que se define en la expresión (7) para una serie de datos dada $X(t_j)$ para $i = 1, 2, \dots, N_0$. La frecuencia angular se expresa como ω y es igual a $2\pi f$.

$$FT(\omega) = \sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cdot e^{-i \omega t_j} \quad (7)$$

La densidad espectral de potencia o P_X (también conocida por las siglas PSD o “Power Spectral Density” se obtiene con la expresión (8) que se define como periodograma clásico y puede evaluarse para cualquier frecuencia.

$$\begin{aligned} P_X(\omega) &= \frac{1}{N_0} \cdot [FT_X(\omega)]^2 = \frac{1}{N_0} \cdot \left[\sum_{j=1}^{N_0} X(t_j) \cdot e^{-i \omega t_j} \right]^2 = \\ &= \frac{1}{N_0} \cdot \left[\left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot \cos(\omega \cdot t_j) \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot \text{sen}(\omega \cdot t_j) \right)^2 \right]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

El periodograma clásico fue modificado por Lomb y Scargle obteniendo la siguiente expresión.

$$P_X(\omega) = \frac{1}{2} \cdot \left[\frac{\left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot \cos(\omega \cdot (t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos^2(\omega \cdot (t_j - \tau))} + \frac{\left(\sum_{j=1}^{N_0} X_j \cdot \text{sen}(\omega \cdot (t_j - \tau)) \right)^2}{\sum_{j=1}^{N_0} \text{sen}^2(\omega \cdot (t_j - \tau))} \right]^2 \quad (9)$$

, donde el término τ se define a continuación:

$$\text{tg}(2 \cdot \omega \cdot \tau) = \frac{\sum_{j=1}^{N_0} \text{sen}(2 \cdot \omega \cdot t_j)}{\sum_{j=1}^{N_0} \cos(2 \cdot \omega \cdot t_j)} \quad (10)$$

Los periodogramas representan la densidad espectral de potencia en el eje de ordenadas y en el eje de abscisas el periodo o la frecuencia. Un pico, o la componente periódica que representa, es más relevante cuanto mayor sea su amplitud o PSD. En la práctica, se ha utilizado el método de análisis espectral de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982; Press *et al.*, 1992) que está implementado dentro del programa informático “Peranso” (Vanmunster, 2007).

Para encontrar características comunes en dos o más espectros, es conveniente utilizar el método JPS (“Joint Power Statistic”) porque proporciona una medida de la correlación dada por una función formada por el producto de espectros (Javorsek *et al.*, 2010). Esta herramienta matemática tiene la propiedad que si los espectros iniciales siguen una distribución exponencial, entonces el espectro resultante tras aplicar el método JPS también tiene esta misma distribución. En el caso de aplicar este método a cuatro variables (por ej.: presión, temperatura, humedad y velocidad del viento), el valor de JPS se determina así:

$$JPS = \frac{3.881 \cdot X^2}{1.269 + X} \quad (11)$$

siendo X igual a la media geométrica de las densidades espectrales de potencia de cada variable.

$$X = \left(PSD_{\text{presión}} \cdot PSD_{\text{temperatura}} \cdot PSD_{\text{humedad}} \cdot PSD_{\text{velocidad viento}} \right)^{1/4} \quad (12)$$

3 Resultados y discusión

3.1 Características de las series de datos

En la Figura 5 se representan las series temporales formadas por las medidas horarias de radón en el interior del laboratorio y los parámetros meteorológicos de observación en el exterior (presión, temperatura, humedad y velocidad del viento).

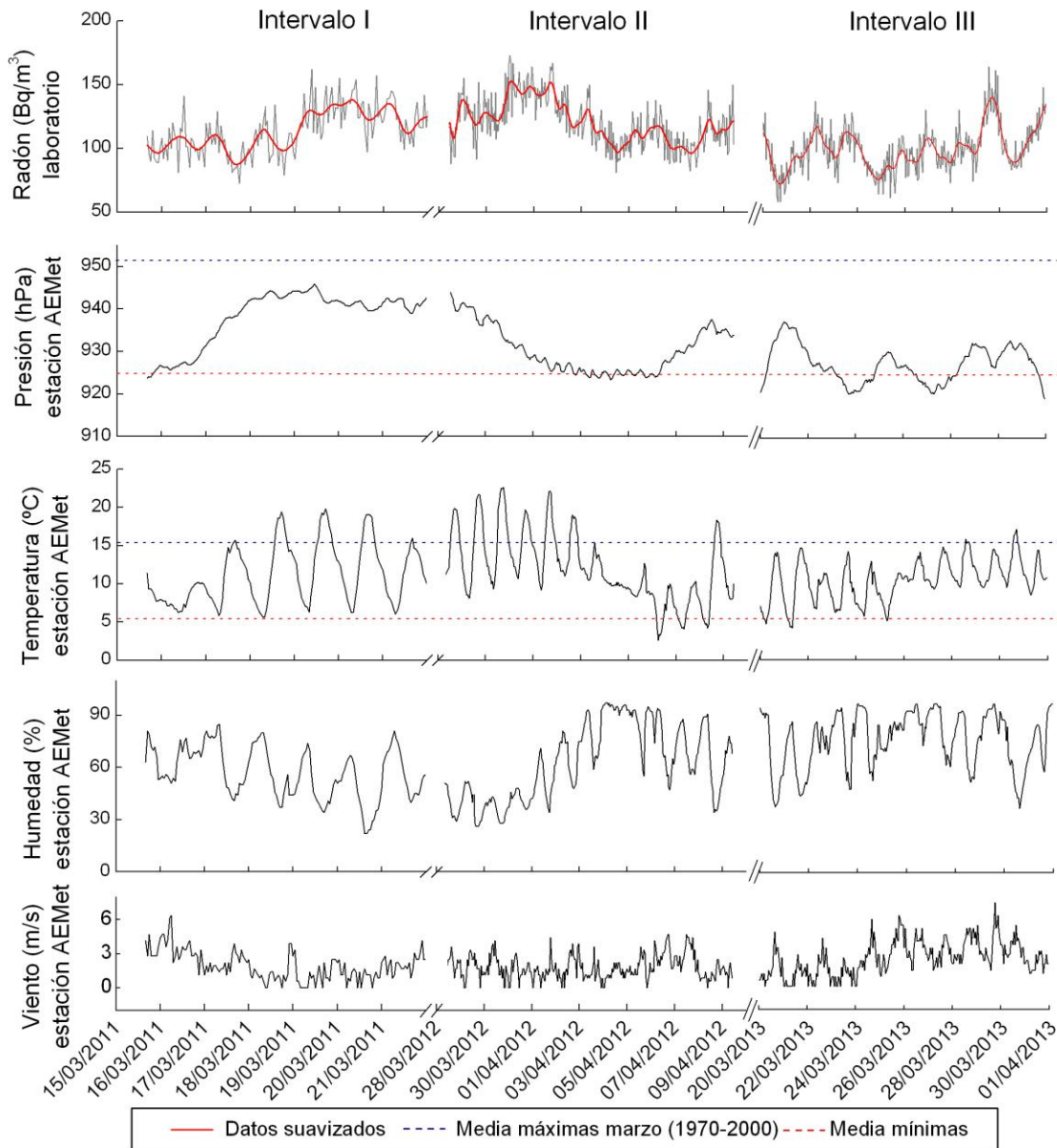


Figura 5. Series temporales de radón, presión, temperatura, humedad y velocidad del viento para los intervalos I, II y III.

El radón muestra importantes variaciones de concentración a lo largo del día. Para facilitar su interpretación, estos datos se han suavizado (ver línea roja en la Figura 5). En la gráfica se

indican los límites establecidos por la media de las máximas y mínimas de presiones y temperaturas que se han registrado en el mes de marzo durante el periodo de referencia 1970-2000.

En la Tabla 4 se resumen las características más significativas de las series de datos (temperatura, desviación típica, mínimos, máximos, etc.) y los coeficientes de correlación de Pearson entre el radón y las variables meteorológicas. Las condiciones ambientales del laboratorio son similares en los tres intervalos. En cambio, la meteorología presenta algunas diferencias según el intervalo, por ejemplo: el intervalo I tiene una presión media mayor que el resto de intervalos y el intervalo III es el más húmedo.

Tabla 4. Características de las series temporales de radón y parámetros ambientales del laboratorio y meteorológicos de la estación del AEMet.

	Parámetro	Media	Desv. Típica	Mínimo	Máximo	Max - Mín	Pearson	
INTERVALO I	Laboratorio	Radón (Bq/m ³)	115	18	73	162	89	-
		Presión (hPa)	946	6	931	953	22	0.37
		Temperat. (°C)	21.4	0.4	20.6	22.0	1.4	0.53
		Humedad (%)	35	3	29	43	14	-0.55
	Estación Meteorológica	Presión (hPa)	939	6	924	946	22	0.36
		Temperat. (°C)	11	4	6	20	14	-0.09
		Humedad (%)	57	14	22	85	63	-0.01
	Viento (m/s)	2	1	0	6	6	-0.22	
INTERVALO II	Laboratorio	Radón (Bq/m ³)	122	19	81	173	92	-
		Presión (hPa)	944	2	933	952	19	-0.61
		Temperat. (°C)	20.4	0.5	19	21.1	2.1	0.05
		Humedad (%)	34	3	28	45	17	-0.27
	Estación Meteorológica	Presión (hPa)	931	6	923	944	21	0.08
		Temperat. (°C)	12	5	3	23	20	0.37
		Humedad (%)	63	22	26	97	71	-0.39
	Viento (m/s)	2	1	0	5	5	-0.26	
INTERVALO III	Laboratorio	Radón (Bq/m ³)	99	16	58	164	106	-
		Presión (hPa)	933	5	924	943	18	-0.24
		Temperat. (°C)	20.7	0.2	20.1	21	0.9	0.16
		Humedad (%)	43	4	35	51	17	0.32
	Estación Meteorológica	Presión (hPa)	927	4	919	937	18	-0.23
		Temperat. (°C)	11	3	4	12	8	0.05
		Humedad (%)	76	16	37	97	60	0.35
	Viento (m/s)	2	1	0	7	7	-0.01	

La velocidad del viento tiene un coeficiente de Pearson negativo en los intervalos I y II, al igual que en otros estudios (Virk *et al.*, 2000; Podstawczyńska *et al.*, 2010). Tras el análisis de la rosa de los vientos de cada uno de los intervalos (ver Figura 6) se comprueba que en los intervalos I y II hubo vientos en cuadrantes opuestos y en el intervalo III predominaron los vientos del tercer cuadrante. En este último intervalo no hay cambios significativos en la dirección del viento, por lo que hubo cierta estabilidad.

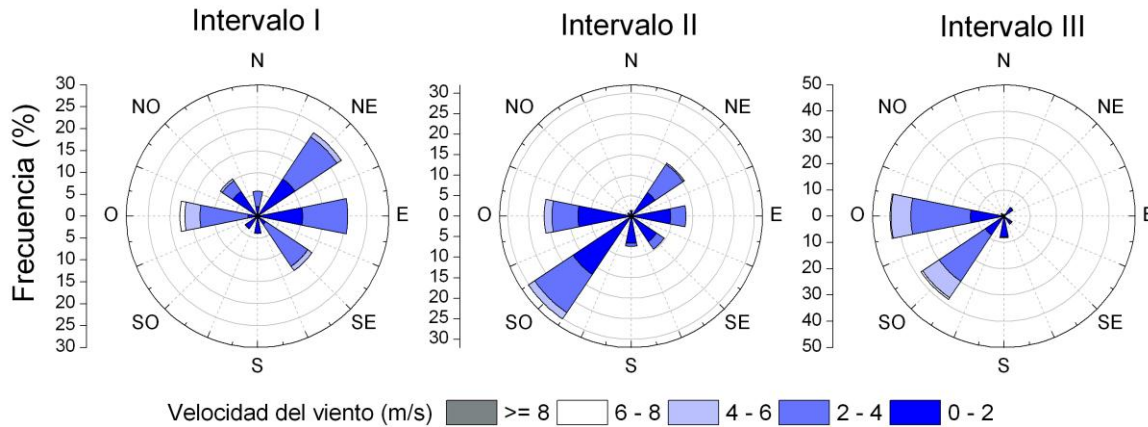


Figura 6. Rosas de los vientos de los intervalos I, II y III.

Por lo general, se observa que los coeficientes de Pearson entre el radón y los parámetros meteorológicos son bajos y que el signo de la correlación suele variar según el intervalo de medida. Por esta razón, se estudia la influencia que tiene un conjunto de variables en el nivel de radón, aplicando un método de análisis multivariante (apartado 3.2).

3.2 Modelo de regresión lineal múltiple

Para seleccionar las variables del MRLM se procede a descartar aquellas que tengan colinealidad y multicolinealidad. Cada variable se le ha asignado un código (ver Tabla 5).

Tabla 5. Lugar de medida, código y significado de las variables.

Lugar de medida	Código	Significado
Laboratorio CEDEX	R	Radón
	P	Presión atmosférica
	T	Temperatura
	H	Humedad relativa

Estación meteorológica AEMet	p x t h v	Presión atmosférica Tendencia barométrica Temperatura Humedad relativa Velocidad del viento
Otras variables	O $p^* = P - p$ $t^* = T - t$ $h^* = H - h$	Hora de la medida Diferencia de presión entre el exterior y el interior Diferencia de temperatura exterior-interior Diferencia de humedad exterior-interior

La matriz de correlaciones que se muestra en la Tabla 6 corresponde al intervalo I, en donde se han destacado en negrita aquellas correlaciones más altas ($R > 0.6$). Evidentemente, hay colinealidad entre la presión interior y exterior del laboratorio (P y p) porque tienen una correlación muy alta. Esto también ocurre con las variables de temperatura y humedad. Se obtienen resultados similares en el resto de intervalos de medidas.

Tabla 6. Matriz de correlaciones entre las variables para el intervalo I de medidas.

Vars.	R	O	P	H	T	x	p	h	t	v	p*	h*	t*
R	1												
O	-0.1	1											
P	0.4	-0.1	1										
H	-0.6	0.1	-0.6	1									
T	0.5	0	0.6	-0.7	1								
x	-0.1	0	-0.2	0.3	-0.3	1							
p	0.4	-0.1	1.0	-0.6	0.6	-0.2	1						
h	0	-0.4	-0.3	0.4	-0.3	0.4	-0.3	1					
t	-0.1	0.5	0.3	-0.2	0.3	-0.4	0.3	-0.9	1				
v	-0.2	0	-0.5	0.2	-0.4	0.1	-0.5	0.1	-0.2	1			
p*	0.1	-0.2	0	-0.1	0	0.2	-0.1	0.4	-0.6	0.1	1		
h*	-0.1	-0.4	-0.3	0.5	-0.4	0.4	-0.3	1.0	-0.9	0.1	0.4	1	
t*	-0.3	-0.3	-0.5	0.7	-0.6	0.4	-0.5	0.9	-0.9	0.3	0.4	0.9	1

En base a las correlaciones de la Tabla 6 y después de calcular los p-valores y VIF de las variables en diversos modelos, se ha seleccionado un MRLM formado por las variables *O-p-h-t-v*. En varios estudios se ha encontrado relación entre la variabilidad del radón y la diferencia de presión, temperatura y humedad entre la atmósfera exterior e interior del edificio (Jelle, 2012; Vasilyev y Zhukovsky, 2013). Sin embargo, en este estudio no se ha observado dicha relación con las variables p^* , h^* y t^* . La correlación entre el radón y las variables de presión, temperatura y humedad es por lo general menor cuando se tiene en cuenta la diferencia entre el exterior y el interior (Ver Tabla 6).

En la Tabla 7 se muestran los resultados estadísticos obtenidos para el intervalo II de medidas.

Tabla 7. Estadística de la regresión múltiple aplicado a un modelo de 5 variables en el Intervalo II.

Variable	Coefficiente	Desviación típica	t-Student	p-valor	VIF
Constante	1585.10	202.90	7.81	0	-
O	-0.26	0.15	-1.78	0.08	1.37
p	-1.47	0.21	-6.95	0	1.83
v	-1.30	0.24	-5.46	0	1.09
h	-2.57	0.25	-10.42	0	2.19
t	0.86	0.24	3.58	0	1.61

En la Figura 7 se representa las series temporales de radón y su estimación en los intervalos I, II y III. Los valores de concentración real de radón se han suavizado para mejorar su representación. Se observa que el radón estimado por el modelo se ajusta relativamente bien a las variaciones del radón del laboratorio.

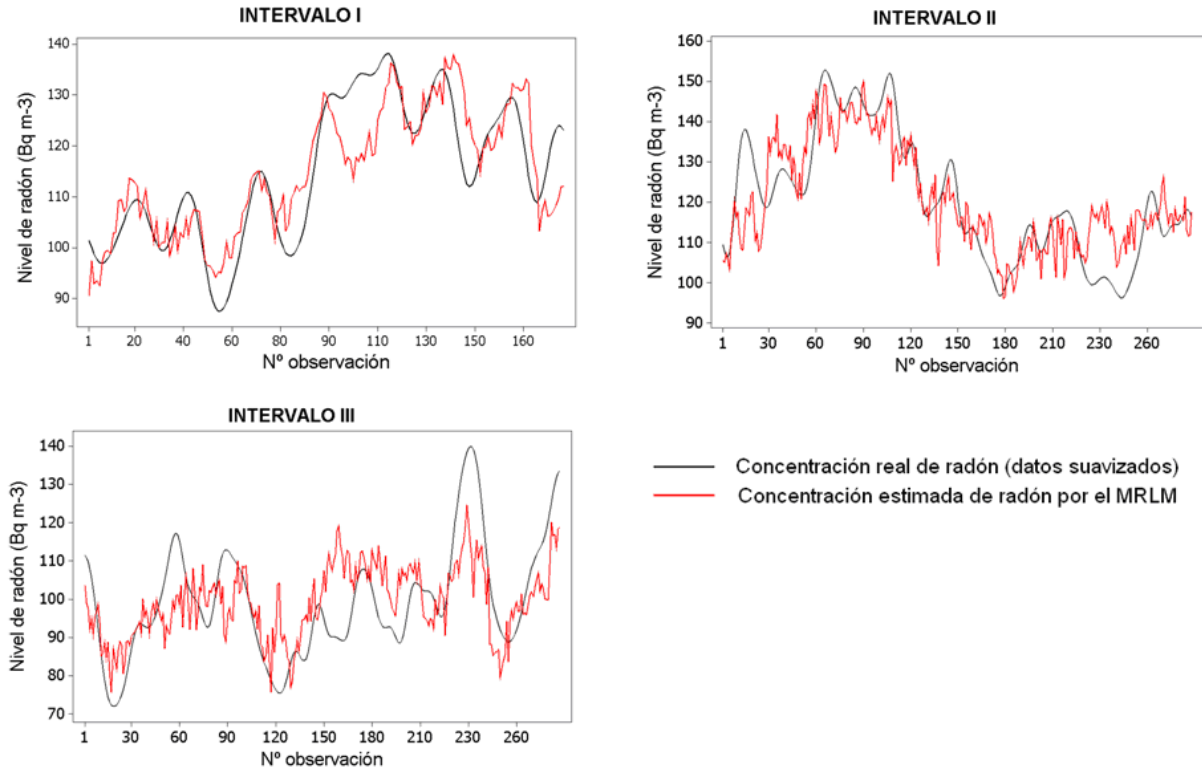


Figura 7. Series temporales de radón y su valor estimado por MRLM en los intervalos de medidas I, II y III.

A continuación, se muestran las expresiones utilizadas para estimar la concentración de radón en cada intervalo de medidas. También se indica el coeficiente de determinación ajustado que se ha obtenido en cada caso.

$$\text{Intervalo I: } R = -668 + 0.896 \cdot p - 0.674 \cdot v - 0.468 \cdot h - 2.20 \cdot t - 0.209 \cdot O \quad R^2_{\text{corregido}} = 0.41 \quad (13)$$

$$\text{Intervalo II: } R = 1585 - 1.47 \cdot p - 1.30 \cdot v - 2.57 \cdot h + 0.859 \cdot t - 0.260 \cdot O \quad R^2_{\text{corregido}} = 0.43 \quad (14)$$

$$\text{Intervalo III: } R = -239 + 0.262 \cdot p - 1.14 \cdot v + 0.782 \cdot h + 4.15 \cdot t + 0.197 \cdot O \quad R^2_{\text{corregido}} = 0.36 \quad (15)$$

En relación con el MRLM, se hacen los siguientes comentarios:

- 1) El MRLM está formado por cinco variables, que son $p-v-h-t-O$. Estas variables no tienen problemas de linealidad ni multicolinealidad, salvo en el caso de la variable O (hora del día). Se ha incluido esta variable porque podría explicar posibles efectos antropogénicos en el nivel de radón (entrada y salida de personal en el laboratorio).

- 2) El coeficiente de determinación de ajuste, expresado como un porcentaje, está comprendido entre 36 y 43 %. Este ajuste podría mejorarse al añadir más variables al modelo, pero habría una elevada linealidad y/o multicolinealidad que no es recomendable. En Dubčáková y Praks (2010) se desarrolló un MRLM para explicar el comportamiento del radón en el interior de una vivienda y con él se obtuvo un ajuste igual al 34 % (zona de la vivienda habitada) y del 60 % (sin habitar). En cambio, en medidas de radón realizadas al aire libre se obtuvo un ajuste mayor, como ocurre en Simion *et al.* (2013) que llega a ser del 81 %.

3.3 Análisis espectral

Con el método de Lomb-Scargle se han calculado las periodicidades de todas las series temporales. En la Figura 8 se muestran los periodogramas obtenidos para cada serie temporal de datos (radón, presión atmosférica, temperatura, humedad y velocidad del viento). En el eje de ordenadas se indica la amplitud expresada en u.a. (unidades arbitrarias) y en el eje de abscisas el periodo en horas.

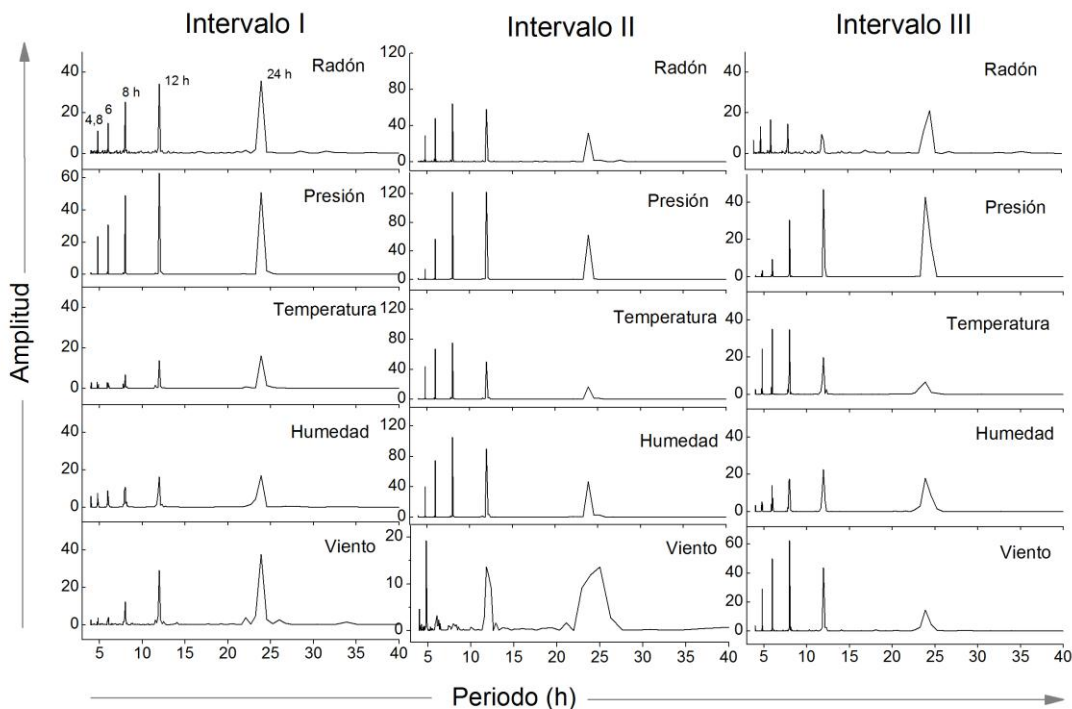


Figura 8. Periodogramas de Lomb-Scargle del radón y las variables meteorológicas para los intervalos I, II y III.

Como se observa en la Figura 8, todas las series temporales tienen componentes periódicas cada 24, 12, 8, 6 y 4.8 horas. Galmarini (2006) ha identificado con una técnica similar de análisis espectral estas componentes periódicas en medidas de radón realizadas al aire libre y en las variables de temperatura, humedad y velocidad del viento. Los periodos correspondientes al ciclo diurno y semidiurno, 24 y 12 h., se han reportado en otros estudios (Richon *et al.*, 2009; Perrier y Richon, 2010). El periodo del radón igual a 24 h. también se ha encontrado en los periodogramas obtenidos en Udovičić *et al.* (2009/2011).

También se han calculado los periodogramas correspondientes a los parámetros ambientales del laboratorio que están representados por la temperatura y humedad (ver Figura 9). No se ha incluido la presión atmosférica porque tiene las mismas variaciones que en el exterior del laboratorio. Se identifican las mismas componentes periódicas en la temperatura y humedad en el interior del laboratorio. Sin embargo, no siempre coinciden las periodicidades dominantes en las variables del exterior con las del interior.

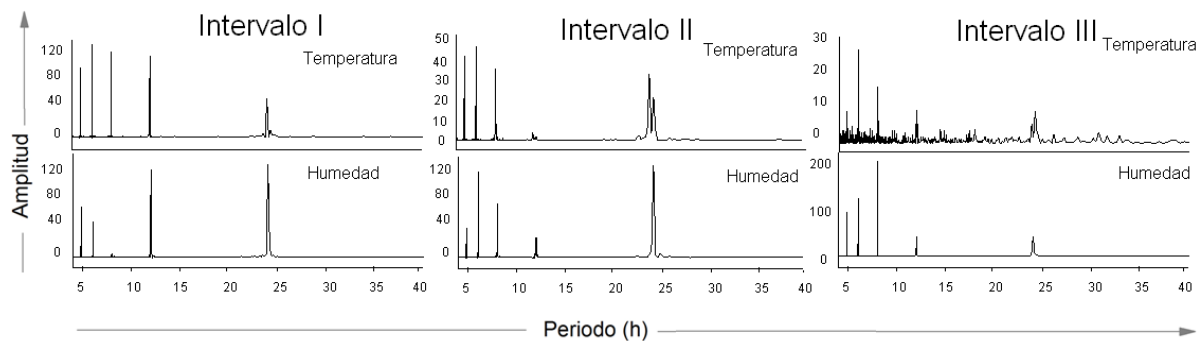


Figura 9. Periodogramas de Lomb-Scargle de los parámetros ambientales (temperatura y humedad) del laboratorio para los intervalos I, II y III.

Con el método JPS se han agrupado todos los periodogramas de las variables meteorológicas (presión, temperatura, humedad y velocidad del viento) en uno solo, para así identificar en global aquellas componentes periódicas más relevantes (ver Figura 10).

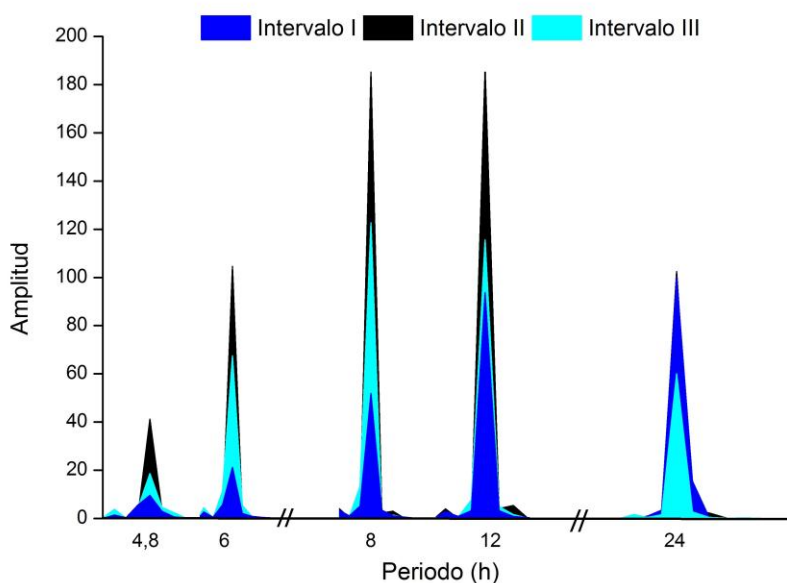


Figura 10. Periodogramas de Lomb-Scargle modificados por el método JPS para el conjunto de variables meteorológicas en los intervalos I, II y III.

Se observa que los intervalos II y III presentan importantes picos en 8 y 12 horas debido a la meteorología, mientras que las periodicidades dominantes del intervalo I se sitúan en 12 y 24 h. Podría haber correspondencia entre las periodicidades más importantes de los parámetros meteorológicos y aquellas presentes en la serie temporal del radón.

4 Conclusiones

El análisis de los resultados experimentales permite obtener las siguientes conclusiones:

- 1) El MRLM estima el nivel de radón en el interior del laboratorio a partir de un conjunto de variables meteorológicas. En este sentido, se considera que no son relevantes las condiciones ambientales en el interior del laboratorio (temperatura y humedad). Por esta razón, no se han incluido estas variables en el modelo.
- 2) El MRLM explica en torno al 40 % de la variabilidad de concentración de radón en el interior del laboratorio. Esto es debido a que el modelo en cuestión se basa sólo en la meteorología y hay más factores que afectan a la concentración de radón en el interior de un edificio (por ejemplo, la tasa de exhalación de radón de los materiales de construcción).

- 3) El análisis espectral basado en el método de Lomb-Scargle ha proporcionado resultados coherentes con estudios previos. Se ha comprobado que el radón fluctúa en un mismo día con periodicidades cortas muy significativas. Las componentes periódicas presentes en las series de medidas de radón también se han identificado en las series formadas por las variables meteorológicas y ambientales del laboratorio. Este resultado confirma la relación existente entre la meteorología y las fluctuaciones del nivel de radón. En concreto, los periodos de 24 y 12 h. indican una influencia de tipo astronómico, por lo que no se descarta que también afecten las mareas gravitacionales al nivel de radón.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del Proyecto I+D del CEDEX con código 27/04/10. Los datos horarios de presión, temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento se han obtenido de AEMet. Agradezco las observaciones realizadas por los evaluadores de la revista *Nova Scientia*.

Referencias

- Arvela H. y Winqvist K. (1989). A model for indoor radón variations. "Environment International", 15, 239–246.
- Aumento F. (2002). Radon tides on an active volcanic island: Terceira, Azores, "Geofísica Internacional", 41, 499–505.
- Ball T.K., Cameron D.G., Colma T.B. y Roberts P.D. (1991). Behavior of radon in the geological environment: a review. "The Quarterly Journal of Engineering Geology", 24, 169–182.
- Barreira F. (1961). Concentration of atmospheric radon and wind direction. "Nature", 190, 1092–1093.
- Bossew P. (2005). A very long-term HPGe-background gamma spectrum. "Applied Radiation and Isotopes", 62, 635–644.
- Butterweck G., Reineking A., Kesten J. y Porstendörfer J. (1994). The use of the natural radioactive noble gases radon and thoron as tracers for the study of turbulent exchange in the atmospheric boundary layer: Case study in and above a wheat field. "Atmospheric Environment", 28, 1963–1969.

- Consejo de Seguridad Nuclear (2010). Guía de Seguridad GSG-11.01: Directrices sobre la competencia de los laboratorios y servicios de medida de radón en aire. Editado por el Consejo de Seguridad Nuclear, 15–16.
- Crockett R.G.M., Gillmore G.K., Phillips P.S., Denman A.R. y Groves-Kirby C.J. (2006). Tidal synchronicity of built-environment radon levels in the UK. "Geophysical", Research Letters 33.
- Dubčáková R. y Praks P. (2010). Statistical modeling of indoor radon concentration using meteorological parameters. "Reliability: Theory & Applications", 16, 32–39.
- Dueñas C., Pérez M., Fernández M.C. y Carretero J. (1996). Radon concentrations in surface air and vertical atmospheric stability of the lower atmosphere. "Journal of Environmental Radioactivity", 31, 87–102.
- Eaton R.S. y Scott A.G. (1984). Understanding radon transport into houses. "Radiation Protection Dosimetry", 7, 251–253.
- Finkelstein M., Eppelbaum L.V. y Price C. (2006). Analysis of temperature influences on the amplitude frequency characteristics of radon gas concentration. "Journal of Environmental Radioactivity", 86, 251–270.
- Galmarini S. (2006). One year of ^{222}Rn concentration in the atmospheric surface layer. "Atmospheric Chemistry and Physics", 6, 2865–2886.
- Genitron Instruments (2013). Products: Radon Monitoring with AlphaGUARD (online). http://saphymo.de//download/ag_fb_gb_05_2011.pdf (1 de septiembre de 2013).
- Groves-Kirby C.J., Denman A.R., Crockett R.G., Phillips P.S. y Gillmore G.K. (2006). Identification of tidal and climatic influences within domestic radon time series from Northampton shire, UK. "Science of the Total Environment", 367, 191–202.
- Jacob D.J. y otros 30 autores (1997). Evaluation and intercomparison of global atmospheric transport models using ^{222}Rn and other short-lived tracers. "Journal of Geophysical Research", 102, 5953–5970.
- Javorsek D., Sturrock P.A., Lasenby R.N., Lasenby A.N., Buncher J.B., Fischbach E., Gruenwald J.T., Hoft A.W., Horan T.J., Jenkins J.H., Kerford J.L., Lee R.H., Longman A., Mattes J.J., Morreale B.L., Morris D.B., Mudry R.N. y Newport J.R (2010). Power spectrum analysis of nuclear decay rates. "Astroparticle Physics", 34, 173–178.

- Jelle B.P. (2012). Development of a model for radon concentration in indoor air. "Science of the Total Environment", 416, 343–350.
- Kolarž P.M., Filipović D.M. y Marinković B.P. (2009). Daily variations of indoor air-ion and radon concentrations. "Applied Radiation Isotopes", 67, 2062–2067.
- Liu C.L., Zhao Y.J., Li S.S., Teng H.J. y Wang Z.M. (2007). Influence of ventilation on the reduction of the radon concentration in an underground research facility. "Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry", 274, 507–510.
- Lomb N.R. (1976). Least-squares frequency analysis of unequally spaced data. "Astrophysics and Space Science", 39, 447–462.
- Miles J.C.H y Algar R.A. (1988). Variations in radon-222 concentrations. "Journal Radiological Protection", 8, 103–105.
- Nero A.V. y Nazaroff W.W. (1984). Characterising the source of Radon indoors. "Radiation Protection Dosimetry", 7, 23–39.
- Perrier F. y Richon P. (2010). Spatiotemporal variation of radon and carbon dioxide concentrations in an underground quarry: coupled processes of natural ventilation, barometric pumping and internal mixing. "Journal of Environmental Radioactivity", 101, 279–296.
- Pinault J.L. y Baubron J.C. (1997). Signal processing of diurnal and semidiurnal variations in Radon and atmospheric pressure: a new tool for accurate in situ measurement of soil gas velocity, pressure gradient, and tortuosity. "Journal of Geophysical Research", 102, 18101–18120.
- Podstawczyńska A., Kozak K., Pawlak W. y Mazur J. (2010). Seasonal and diurnal variation of outdoor radon (^{222}Rn) concentrations in urban and rural area with reference to meteorological conditions. "Nukleonika, International Journal of Nuclear Research", 55, 543–547.
- Press W.H., Teukolsky S.A. y Vetterling W.T. y Flannery B.P. (1992). Numerical recipes in C: The art of scientific computing, 2th ed., University Press, New York.
- Richon P., Perrier F., Pili E. y Sabroux J.-C. (2009). Detectability and significance of 12 h barometric tide in radon-222 concentration, flow rate and carbon dioxide concentration in an underground tunnel. "Geophysics Journal International", 176, 683–694.

- Sakashita T., Doi M., Nakamura Y. y Lida T. (2004). A case study of radon-222 transport from continental North-East Asia to the Japanese islands in winter by numerical analysis. "Journal of Environmental Radioactivity", 72, 245–257.
- Scargle J.D. (1982). Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. "Astrophysics Journal", 263, 835–853.
- Shapiro M.H., Rice A., Mendenhall M.H., Melvin J.D. y Tombrello T.A. (1985). Recognition of environmentally caused variations in Radon time series. "Pure and Applied Geophysics", 122, 311–326.
- Simion F., Cuculeanu V., Simion E. y Geicu A. (2013). Modeling the ^{222}Rn and ^{220}Rn progeny concentrations in atmosphere using multiple linear regression with meteorological variables as predictors. "Romanian Reports in Physics", 65, 524–544.
- Udovičić V., Grabež B., Dragić A., Banjanac R., Joković D., Panić B., Joksimović D., Puzović J. y Aničin I. (2009). Radon problem in an underground low-level laboratory. "Radiation Measurements", 44, 1009–1012.
- Udovičić V., Aničin I., Joković D., Dragić A., Banjanac R., Grabež B. y Veselinović N. (2011). Radon time-series analysis in the underground low-level laboratory in Belgrade, Serbia. "Radiation Protection Dosimetry", 145, 155–158.
- Ulomov V.I. y Mavashev B.Z. (1967). A Precursor of a strong tectonic earthquake. "Academy Science, U.S.S.R., Earth Science Section", 176, 9–11.
- Vanmunster T. (2007). Peranso Period Analysis Software, Peranso version 2.50, CBA Belgium Observatory. <http://www.peranso.com> (1 de junio de 2013).
- Vasilyev A.V. y Zhukovsky M.V. (2013). Determination of mechanisms and parameters which affect radon entry into a room. "Journal of Environmental Radioactivity", 124, 185–190.
- Virk H.S., Walia V., Sharma A.K., Kumar A. y Kumar R. (2000). Correlation of radon anomalies with microseismic events in Kangra and Chamba valleys of N-W Himalaya. "Geofísica Internacional", 39, 221–227.
- Wakita H., Nakamura Y., Notsu K., Noguchi M. y Asada T. (1980). Radon Anomaly: A Possible Precursor of the 1978 Izu-Oshima-kinkai Earthquake. "Science", 22, 882–883.
- Weinlich F.H., Faber E., Bouskova A., Horalek J., Teschner M. y Poggenburg J. (2006). Seismically induced variations in Marianske Lazne fault gas composition in the NW

Bohemian swarm quake region, Czech Republic – A continuous gas monitoring.
“Tectonophysics”, 421, 89–110.

Yu K.N., Young E.C.M. y Li K.C. (1996). A study of factors affecting indoor Radon properties.
“Health Physics”, 71, 179–184.

