

INTERCOMPARACIÓN 2020 DE MEDIDAS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES. EQUIPOS DE MEDIDA EN CONTINUO Y DETECTORES INTEGRADOS

CSN



Colección
Informes Técnicos
55.2022

INTERCOMPARACIÓN 2020 DE MEDIDAS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES. EQUIPOS DE MEDIDA EN CONTINUO Y DETECTORES INTEGRADOS

Autores: Claudia Grossi
Arturo Vargas Drechsler
INTE, Universitat Politècnica de Catalunya

Beatriz Robles Atienza,
Marta García-Talavera San Miguel
Consejo de Seguridad Nuclear

Colección
Informes Técnicos
55.2022



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04.45

© Consejo de Seguridad Nuclear
Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
C/ Justo Dorado, 11
28040 Madrid. España
www.csn.es

Depósito legal: M-7469-2022

Impreso en papel



La exposición al radón en los lugares de trabajo está regulada desde hace años en España por el *Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes*, y por la Instrucción IS-33 del Consejo de Seguridad Nuclear (CSN).

Este marco regulador se ha visto reforzado por la directiva 2013/59/EURATOM, que comporta requisitos de control adicionales para la exposición de los trabajadores, así como la inclusión de medidas de protección contra el radón en el Código Técnico de la Edificación (de aplicación en los edificios de nueva planta y en las rehabilitaciones).

Todo ello conlleva un importante aumento de la demanda de servicios de medición de radón y de evaluación de las dosis asociadas, por lo que se hace imprescindible garantizar la calidad y fiabilidad de estas determinaciones. A este fin, tanto la acreditación de laboratorios según la ISO 17025, como la autorización de Unidades Técnicas de Protección Radiológica en el ámbito de la radiación natural, son herramientas fundamentales.

La norma UNE-EN ISO/IEC 17025 incluye la participación en programas de intercomparación como un requisito básico de aseguramiento de calidad, al igual que recoge también la Guía 11.1 del CSN de *Directrices sobre la competencia de los laboratorios y entidades de medida de radón en aire*. Las intercomparaciones redundan en la mejora de los servicios de medición, al obligar al laboratorio o entidad, ante resultados no satisfactorios, a poner a prueba su capacidad para detectar la posible fuente del error y corregirlo.

En el ámbito de la medida del radón, la respuesta de los detectores puede depender de las distintas condiciones ambientales, como la temperatura, la humedad relativa o las propias fluctuaciones de la concentración de radón, lo cual tiene especial incidencia en ambientes laborales, en los que pueden encontrarse condiciones ambientales extremas. Por ello los ejercicios de intercomparación deben cubrir, de manera controlada, un rango amplio de condiciones ambientales.

La organización periódica de campañas de intercomparación permite, además, al CSN establecer un diálogo técnico con los laboratorios y entidades, así como verificar la adecuada respuesta de los nuevos dispositivos de medida que van incorporándose al mercado.

A partir de 2020, y en el marco del Plan Nacional contra el Radón, el CSN organizará cada dos años

una campaña de intercomparación de medida de la concentración en aire, abierta a todos los laboratorios y entidades de servicio de España. Esta publicación recoge los resultados de la primera de esta serie de intercomparaciones, llevada a cabo en 2020 en la cámara de radón de la Universitat Politècnica de Catalunya, y que ha incluido un ejercicio para equipos de medida en continuo y otro para sistemas integradores.

Sumario

Preámbulo	3
1. Introducción	7
2. Cámara de radón del INTE-UPC	9
3. Campaña de intercomparación de sistemas de medida en continuo de la concentración de radón en aire bajo diferentes condiciones ambientales	11
4. Campaña de intercomparación de sistemas de medida integradores de la concentración de radón en aire.....	25
5. Conclusiones generales.....	33
6. Referencias.....	35



En 2001, el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), mediante un acuerdo con el Instituto de Técnicas Energéticas (INTE) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), impulsó el proyecto Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la Norma ISO 13466 y la organización de la primera campaña de intercomparación de medida de radón celebrada en España.

Los principales objetivos de este proyecto fueron el disponer en nuestro país de una cámara de referencia para los estudios de radón, mediante el acondicionamiento de las instalaciones ya existentes en el INTE, así como permitir a los distintos grupos metrológicos nacionales participar en una evaluación preliminar comparativa de sus sistemas de medida del radón.

Los resultados de esa primera campaña se publicaron en el documento de I+D del CSN “Calidad metrológica y dosimetría del radón. Primera campaña nacional de intercomparación” (DID-12.04).

Desde entonces ha habido grandes avances en este campo en España, impulsados por la aprobación, en 2012, de la Instrucción IS-33 del CSN (que incluye requisitos sobre el control de la exposición ocupacional al radón) y, en 2019, de la Sección HS 6 “Protección frente a la exposición al radón” del Documento Básico HS del Código Técnico de Edificación.

En la actualidad hay cinco laboratorios en España acreditados por ENAC según la ISO 17025 para la medida de la concentración de radón en aire, y el CSN ha puesto en marcha una autorización específica, en el ámbito de la radiación natural, para Unidades Técnicas de Protección Radiológica.

Con el fin de apoyar estos desarrollos y de contribuir a la calidad en las determinaciones de radón, el CSN dentro del Plan Nacional contra el Radón, que se aprobará próximamente, según requiere la directiva 2013/59/Euratom, ha adquirido el compromiso de organizar campañas de intercomparación de manera periódica.

Para ello, en 2019, se firmó un convenio entre el CSN y la UPC, publicado en el BOE núm. 280, de 21 de noviembre de 2019 (páginas 128601 a 128610). Este convenio tuvo como objetivo principal el llevar a cabo un ejercicio de intercomparación de sistemas de medida integradores y otro de equipos de medida en continuo de la concentración de radón en el aire, incluyendo en este último caso un estudio de la respuesta bajo diferentes condiciones ambientales.

La campaña de exposiciones, en condiciones ambientales prefijadas, ha permitido a los grupos nacionales participantes comprobar la correcta respuesta de sus sistemas de medida, o bien, en caso necesario, aplicar mejoras o correcciones.

Por otro lado, los resultados obtenidos en las intercomparaciones permitirán al CSN disponer de información de base para revisar o validar sus directrices y recomendaciones sobre la medición del radón en el aire.

Los dos ejercicios de intercomparación se han llevado a cabo durante el año 2020 en la cámara de radón tipo STAR (System for Test Atmospheres with Radon) del INTE de la UPC.

En este documento se presentan y discuten los resultados obtenidos durante los dos ejercicios de intercomparación.



El INTE-UPC dispone de una cámara de radón tipo STAR para la medida de la concentración de radón en interiores, conforme con la norma IEC 61577-4:2009 (Radiation Protection Instrumentation–Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products), cuya puesta en marcha fue impulsada por el CSN mediante el proyecto de «Adaptación de la cámara de radón del INTE/UPC a la Norma ISO 13466 e intercomparación de sistemas de medida».

La cámara de radón del INTE, en acuerdo con la norma IEC 61577-4:2009, consiste en un recinto de unos 20 m³ equipada con los equipos necesarios para controlar y medir la concentración de la actividad de radón, la dosis ambiental, la temperatura y la humedad relativa (Vargas et al., 2004).

El equipo de referencia de medida de la concentración de radón de la STAR del INTE-UPC es un monitor Atmos 12 DPX (Gammadata Instrument AB), número de serie ATM226. La

trazabilidad de la magnitud medida (concentración de la actividad de radón en aire en Bq m⁻³) está referida al Swedish Radiation Safety Authority (Certificado de calibración n. SSM2018-2074-5) con una incertidumbre expandida (k=2) del 7.1 %.

Los equipos de referencia de medida de las magnitudes de Temperatura (°C) y de la Humedad Relativa (%) están trazados con el Instituto Nacional de Técnicas Aeroespacial “Esteban Terradas” (INTA) (Certificado de calibración n. 2018-E-1354, documento ENAC N. 235/LC10.190).

El equivalente de tasa dosis ambiental, $\dot{H}^*(10)$ (μSv h⁻¹), se ha medido en la STAR con un equipo de referencia modelo RADEYE SPRD, número de serie 10587 calibrado en el Laboratorio de Calibración del INTE que está trazado con el Laboratorio Nacional Alemán Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (Certificado de calibración 12693, documento ENAC N. 23/LC10.015) con una incertidumbre expandida (k=2) del 5 %.



CAMPAÑA DE INTERCOMPARACIÓN DE SISTEMAS DE MEDIDA EN
CONTINUO DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE BAJO DIFERENTES
CONDICIONES AMBIENTALES



En los siguientes apartados se describen el desarrollo y los resultados del ejercicio de intercomparación de equipos de medida en continuo.

3.1. Objetivos

Los objetivos principales de la campaña de intercomparación de equipos continuos son:

- i) Estudiar la sensibilidad de los sistemas de medida de la concentración de radón en continuo en condiciones ambientales estándar, típica de viviendas y lugares de trabajo no extremos, y con concentraciones de radón del orden de 0.5 kBq m^{-3} .
- ii) Estudiar la sensibilidad de los sistemas de medida de la concentración de radón en continuo en condiciones ambientales estándar a concentraciones de radón del orden de 3 kBq m^{-3} .
- iii) Cuantificar la influencia que condiciones de medidas extremas de temperatura y humedad, típicas en algunos lugares de trabajo como por ejemplo termas, pueden tener sobre la respuesta de los monitores continuos de las concentraciones de radón en la atmósfera interior.

iv) Evaluar la rapidez de la respuesta de los monitores a cambios repentinos de la concentración de radón.

v) Cuantificar la concentración de fondo de los monitores continuos de radón.

3.2. Participantes

En el ejercicio de intercomparación de equipos continuos de la medida de la concentración de gas ^{222}Rn en aire participaron diez laboratorios seleccionados en base a criterios definidos por el Consejo de Seguridad Nuclear y establecidos en el anuncio de la campaña. Los laboratorios pertenecen a diferentes entidades (UTPR, empresas y universidades) distribuidas de manera homogénea en el territorio español.

Cada laboratorio envió un monitor en continuo siguiendo las instrucciones indicadas por el Laboratorio de Radón del INTE-UPC, que se adjuntan en el “Informe de Organización de la intercomparación de equipos de medida en continuo bajo diferentes condiciones ambientales” (N. Registro: 2913 del 9 de marzo de 2020).

En la tabla 1 se presenta el listado de laboratorios participantes, las entidades de procedencia, el monitor con que participaron y el modo de operación de este último (difusión o con bomba de caudal).

Tabla 1. Laboratorios participantes en la intercomparación de equipos continuos de la medida de radón en aire

Laboratorio	Entidad	Monitor	Modo de Operación
Asesoría y Control en Protección Radiológica, SL	-	Airthings modelo Corentium Pro	Difusión
Laboratorio de Radón de Galicia	Universidad de Santiago de Compostela	Radon Scout PLUS	Difusión
Laboratorio de Radiactividad Ambiental de Badajoz	Universidad de Extremadura	AlphaGuard PQ 2000 Pro	Difusión
Unitat de Física de les Radiacions	Universitat Autònoma de Barcelona	AlphaGuard PQ 2000 Pro	Difusión
Laboratorio de Bajas Actividades	Universidad de Zaragoza	AlphaGuard PQ 2000 Pro	Difusión
Laboratorio de Radón	Universidad de Cantabria	Radon Scout	Difusión
Laboratorio de Radiactividad Ambiental	SEIRMA Servicios Integrados, SL	Radon Scout	Difusión
Laboratorio de Radiactividad Ambiental de Cáceres	Universidad de Extremadura	AlphaGuard PQ 2000 Pro	Difusión
NORM Technology Consulting, SL	Universidad de Huelva	Rad7	Bomba de caudal
Centro Nacional de Sanidad Ambiental	Instituto de Salud Carlos III	AlphaGuard PQ 2000 Pro	Difusión

3.3. Metodología

3.3.1. Planificación de las exposiciones

Con el fin de conseguir los objetivos, la intercomparación de los equipos continuos ha consistido en tres fases: 1) la determinación de la respuesta de los equipos a diferentes concentraciones de la actividad de radón; 2) el estudio de la influencia de las condiciones ambientales de humedad y temperatura y 3) la determinación del fondo de cada equipo.

Las fases 1 y 2 se llevaron a cabo exponiendo los 10 equipos en continuo en la cámara de radón del INTE. La fase 3, dependiendo del sistema de la toma de aire de muestreo de los distintos monitores, se realizó de dos maneras:

- haciendo circular aire sintético envejecido por el volumen de detección del equipo;
- exponiendo el monitor en una atmósfera con aire sintético envejecido en recipiente cilíndrico de unos 200 L de capacidad.

En la tabla 2 se muestran las condiciones nominales de temperatura, humedad y concentración de radón en aire a las que se planificó exponer los equipos durante los ejercicios de intercomparación.

Tabla 2. Resumen de la planificación de las condiciones de exposición de los monitores de medida en continuo en la cámara de radón del INTE

Exposición	Concentración de ^{222}Rn (Bq m^{-3})	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad Relativa (%)
I	3000	20	45
II	500	20	45
III	3000	20	30
IV	3000	30	45
V	3000	10	45
VI	3000	20	90
VII (Cambio repentino de la concentración)	3000→500	20	45
VIII (Cuantificación de la concentración de fondo)	0	20	45

Figura 1. Imagen de los monitores de radón en continuo en la cámara de radón del INTE-UPC durante las fases 1 y 2 del proyecto



fondo de 200 L de volumen por la que se hace circular aire sintético envejecido para disponer de una concentración de radón nula. La cámara está equipada con un ventilador para asegurar la homogenización del aire en su interior como se representa en el esquema de figura 2. En la foto de la figura 3 se representa la imagen de la cámara de fondo durante el experimento.

Todos los equipos que trabajan en modo “difusión”: cinco AlphaGuard (AG), tres Radon Scout (RS) y un Airthing (AT) se expusieron en el interior de la cámara de fondo, mientras que en los equipos que trabajaban con bomba de muestreo (un RAD7) se hizo circular el aire seco por el volumen de detección del equipo. La exposición de fondo de los equipos participantes tuvo lugar al mismo tiempo para asegurar las mismas condiciones de medida. En el esquema de la figura 2 se muestra la configuración utilizada para llevar a cabo este experimento.

En la medida de fondo, se utilizó un monitor AlphaGuard (modalidad de funcionamiento con bomba de muestreo, AG_INTE), como equipo de control de la cámara de fondo del INTE-UPC. Este monitor fue utilizado en serie con el equipo de referencia de la cámara STAR del INTE-UPC, monitor Atmos 12 DPX (Gammadata Instrument AB), como se observa en el esquema de figura 2. En la figura 3 se muestra una fotografía del dispositivo montado para la exposición de fondo.

3.3.2. Cámara de fondo del INTE-UPC

La fase 3, relacionada con la determinación del fondo de los 10 equipos continuos, se realizó mediante la exposición de estos en una cámara de

El fondo del monitor AG_INTE fue previamente medido entre el 28 y el 29 de enero del 2020 en el marco de la actividad 5.3 del proyecto europeo 16ENV10 MetroRADON y su valor medio resultó ser de 15.4 Bq m^{-3} con una desviación estándar de

la media de 2.8 Bq m^{-3} con $k = 2$. Durante la exposición VIII, de la tabla 2, el fondo medido por el AG_INTE tuvo un valor medio de 16.1 Bq m^{-3} con una desviación estándar de la media de 2.8 Bq m^{-3} con $k = 2$.

Figura 2. Esquema de la cámara de fondo de equipos de radón del INTE-UPC y configuración utilizada durante la fase 3

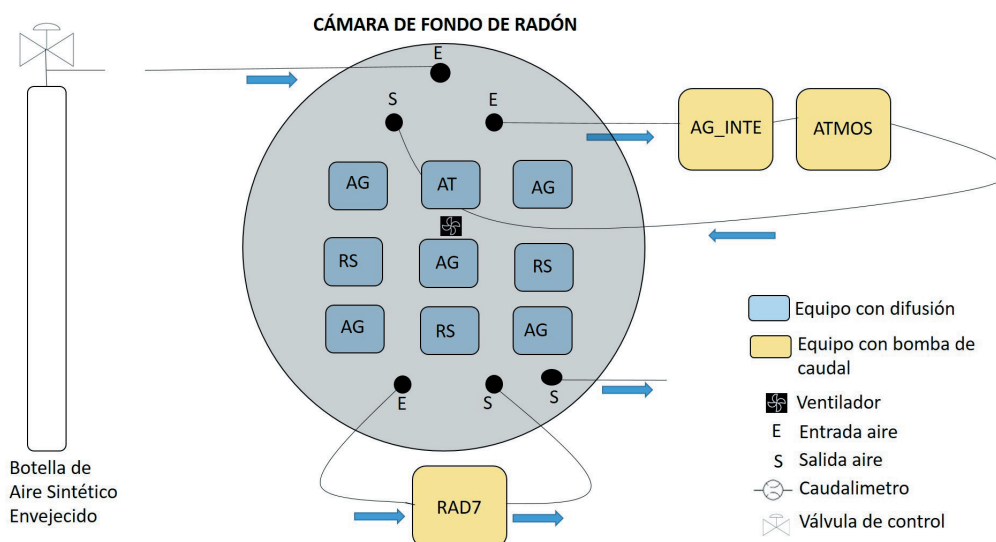
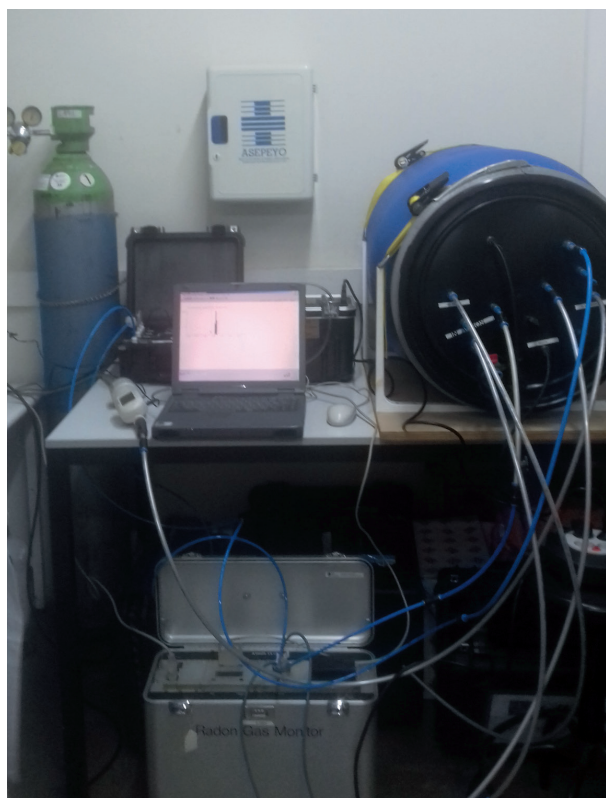


Figura 3. Fotografía del dispositivo montado para llevar a cabo exposición de la fase 3 en la cámara de fondo de radón del INTE-UPC



3.3.3. Análisis estadístico de los resultados de la intercomparación de equipos continuos de radón

Para evaluar la respuesta de los monitores continuos se ha utilizado el ensayo de aptitud (*proficiency test*). Este ensayo se ha llevado a cabo de acuerdo con la ISO/IEC 17043:2010 (es) Evaluación de la conformidad — Requisitos generales para los ensayos de aptitud.

El ensayo de aptitud proporciona la posibilidad de efectuar dichas comparaciones y tener una valoración independiente de los resultados proporcionados por los 10 laboratorios comparados con el valor de referencia determinado en la cámara STAR del INTE-UPC. Para poder llevar a cabo una evaluación de la respuesta de cada monitor de radón, para los diferentes niveles de concentración de radón en aire y condiciones de temperatura y humedad relativa, durante las exposiciones I, II, III, IV, V y VI de la tabla 2, se han utilizado los siguientes parámetros:

- a) El factor de calibración de cada equipo en cada exposición F_{cal} , se calculó como:

$$F_{cal} = C_{ref}/C_{eq} \quad (1)$$

Donde C_{eq} es la media de las medidas del equipo expuesto y C_{ref} es la media de las medidas obtenidas con el equipo de referencia en la cámara de radón del INTE-UPC. La concentración de referencia se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$C_{ref} = (C_{Atmos} - C_{fondo}) * F_{cal_Ref} * F_T, \quad (2)$$

Donde C_{Atmos} es el valor medio medido por el equipo Atmos 12 DPX en la cámara durante cada periodo de exposición estable, C_{fondo} es el valor medio de la concentración de radón de fondo del equipo Atmos 12 DPX y F_{cal_Ref} es el factor de calibración del Atmos 12 DPX (Certificado de calibración n. SSM2018-2074-5) con una incertidumbre expandida U_{cal_Ref} (con $k=2$) del 7.1 %. Además, se tuvo en cuenta el valor de corrección por las condiciones de temperatura en la cámara F_T y su incertidumbre u_T .

- b) La incertidumbre expandida U_{cal} de F_{cal} , es expresada con un intervalo de confianza del 95 % y calculada como $U_{cal} = u_{cal} \cdot t_{st}$ donde la t_{st} se ha elegido para cada exposición y números de datos en la tabla de valores críticos de la distribución t de Student; la u_{cal} se ha calculado propagando las incertidumbres con la siguiente expresión:

$$\left(\frac{u_{Cal}}{F_{Cal}} \right) = \left(\frac{S_{eq}/\sqrt{n_{eq}}}{C_{eq}} \right)^2 + \left(\frac{S_{Atmos}/\sqrt{n_{Atmos}} + S_{Fondo}/\sqrt{n_{Fondo}}}{C_{Atmos} - C_{Fondo}} \right)^2 + \left(\frac{u_{cal_Ref}}{F_{cal_Ref}} \right)^2 + \left(\frac{u_T}{F_T} \right)^2 \quad (3)$$

Donde las S_{eq} , S_{Atmos} y S_{Fondo} son respectivamente las desviaciones estándar de las medidas de la concentración de radón en aire medidas por el equipo expuesto, por el de referencia y en las medidas de fondo del equipo de referencia. Así mismo n_{eq} , n_{Atmos} y n_{Fondo} representan el número de medidas de la concentración de radón por cada exposición del equipo expuesto, el de referencia y en las medidas de fondo del equipo de referencia respectivamente.

- c) **Criterio z-score.** Es un criterio que permite la interpretación y comparación de los resultados de los participantes en ejercicios de intercomparación (Softic et al., 2012). El parámetro z se calcula como:

$$z = \frac{C_{eq} - C_{ref}}{\sigma_{ref}} \quad (4)$$

Donde C_{eq} y C_{ref} se han definido previamente y σ_{ref} es la desviación estándar de la población del valor de referencia. La interpretación de este parámetro z, calculado para cada laboratorio, establece su desempeño como se indica a continuación:

$|z| \leq 2$ Resultado Satisfactorio

$2 < |z| < 3$ Resultado Cuestionable

$|z| \geq 3$ Resultado Insatisfactorio.

- d) **Criterio del Error Normalizado.** Este criterio de aceptación es uno de los más comunes dentro de las comparaciones entre laboratorios (Botero et al., 2009). El criterio ha sido aplicado teniendo en cuenta, para cada exposición, el valor de referencia (C_{ref}) con su correspondiente incertidumbre expandida (U_{ref}) y el valor del equipo expuesto (C_{eq}) con su correspondiente incertidumbre expandida (U_{eq})*. Para calcular el error normalizado E_N , se calcula mediante la expresión:

$$E_N = \frac{C_{eq} - C_{ref}}{\sqrt{U_{eq}^2 + U_{ref}^2}} \quad (5)$$

La interpretación de este parámetro E_N , calculado para cada laboratorio, establece:

$|E_N| \leq 1$ Resultado Satisfactorio

$|E_N| > 1$ Resultado Cuestionable o Insatisfactorio.

* El valor de incertidumbre expandida se calculó como $U_{eq} = SE_{eq} \cdot t_{st}$ (95 %) con el SE_{eq} es el error estándar de la media.

3.4. Resultados

3.4.1. Determinación del fondo de cada equipo

En acuerdo con los resultados enviados por cada laboratorio, en el gráfico de la figura 4 se presentan el valor medio de la concentración de radón en aire medido por cada equipo en la cámara de fondo del INTE-UPC durante la exposición VIII de la tabla 2, que se realizó entre el 9 de junio 2020 a las 12:45 UTC y el 10 de junio 2020 a las 7:20 UTC. Cada valor se presenta con la desviación estándar del valor medio ($k = 1$). En la tabla 3 se muestran los valores graficados.

Figura 4. Valor medio de la concentración de fondo medidas por cada monitor continuo durante la exposición VIII

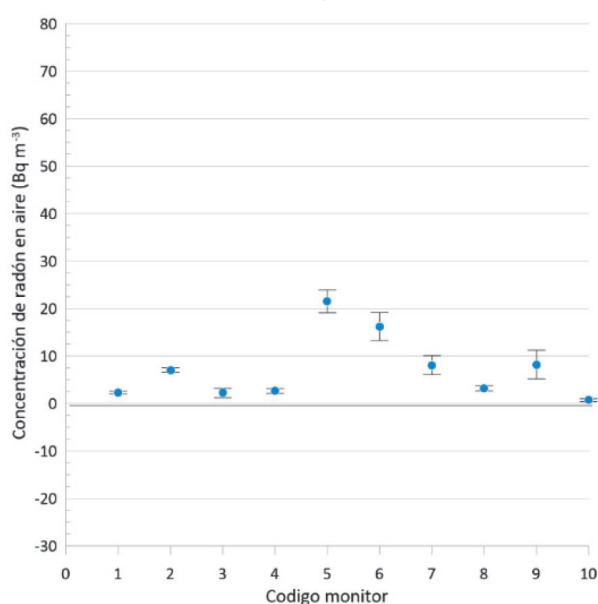


Tabla 3. Valor medio de la concentración de fondo medidas por cada monitor continuo durante la exposición VIII y error estándar de la media declarados por cada laboratorio

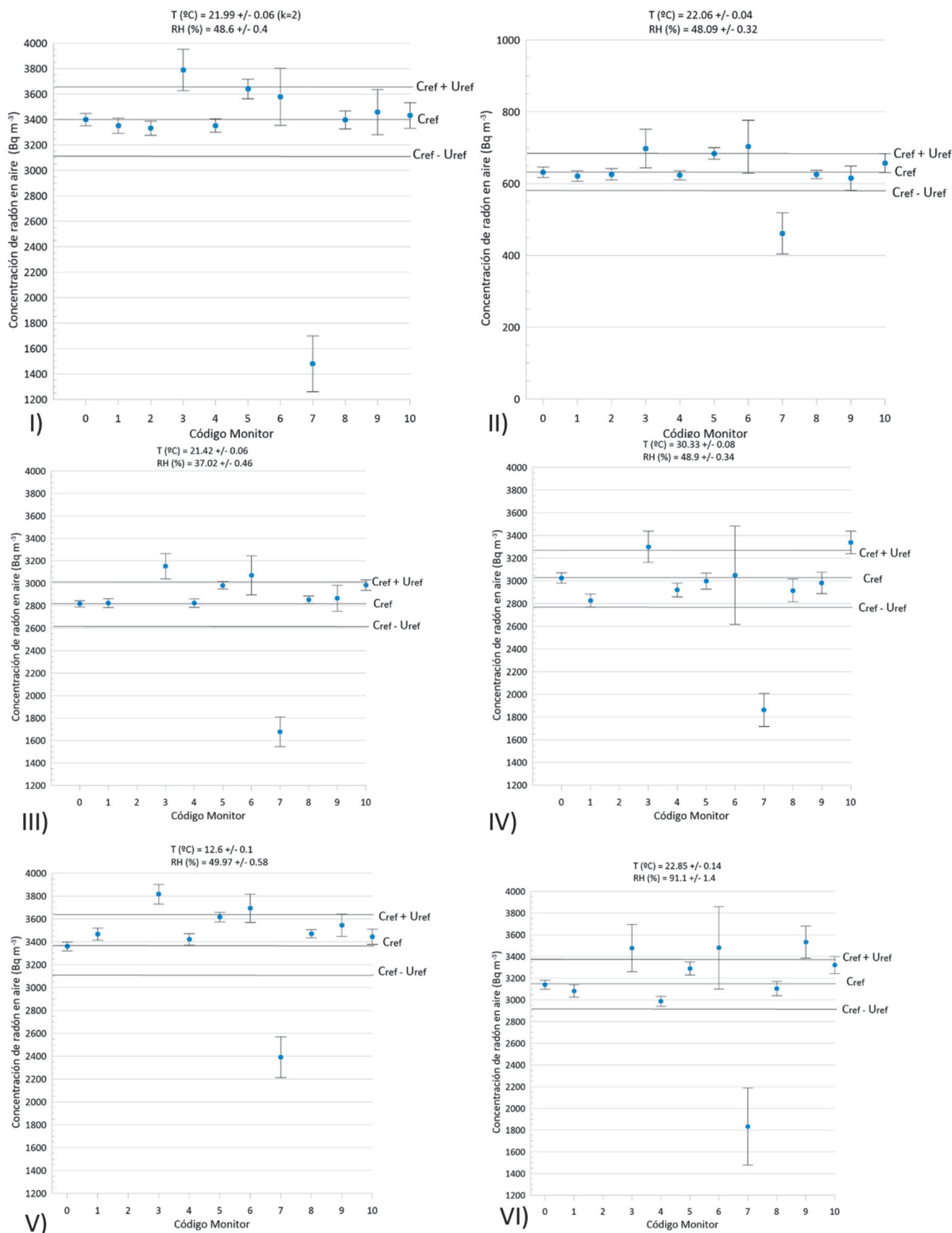
Código MONITOR	Valor medio (Bq m ⁻³)	Error estándar de la media
1	2.3	0.3
2	7	0.5
3	2.2	1.0
4	2.6	0.5
5	21.5	2.4
6	16.2	3.0
7	8.0	2.0
8	3.2	0.5
9	8.2	3.0
10	0.7	0.3

3.4.2. Respuesta de los monitores de radón en continuo bajo diferentes condiciones de la concentración de radón en aire y de las condiciones ambientales

En la figura 5 se representan los resultados, de acuerdo con los datos enviados por los participantes, de los valores medios y las desviaciones estándar de las medias de la concentración de radón medida en la cámara STAR del INTE-UPC durante las exposiciones I-VI de la tabla 2.

El valor medio medido por el equipo de referencia (el Código Monitor es 0) se presenta también para cada exposición junto con la desviación estándar de su media y su incertidumbre total expandida (representada con el intervalo de líneas continuas). En cada gráfico también se muestran los valores medios, con sus desviaciones estándar de la media, de los valores medios de temperatura y humedad relativa medidas en la cámara en cada exposición. El monitor con código 2 solo participó en las dos primeras exposiciones (I y II).

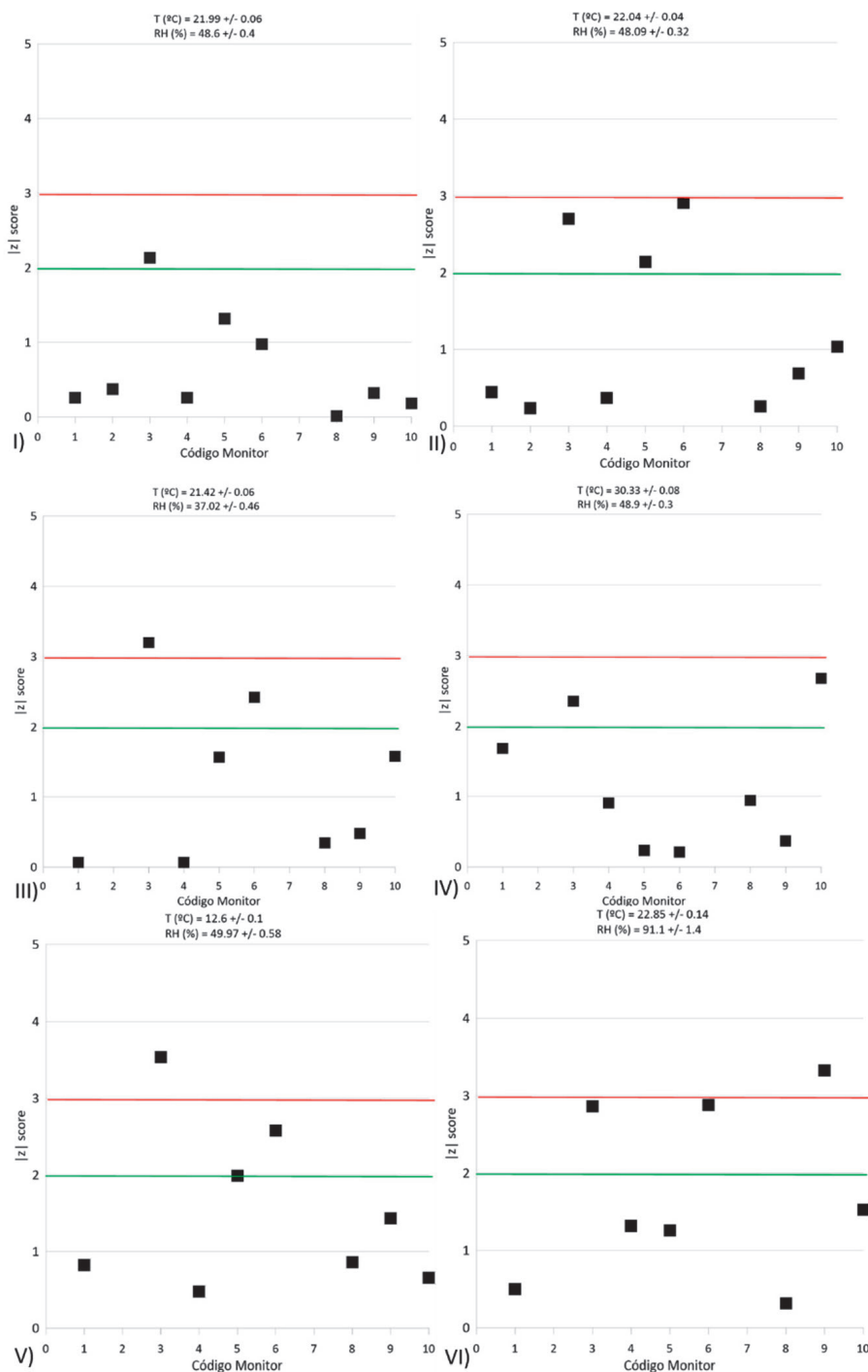
Figura 5. Valores medios (C_{eq}) y desviaciones estándar de las medias (SE $_{eq}$) de la concentración de radón medida en la cámara STAR del INTE-UPC durante las exposiciones I-VI de la tabla 2. El valor medio medido por el equipo de referencia (Cref con Código del Monitor = 0) junto con su desviación estándar (uref) y su incertidumbre total expandida (Uref)



En la figura 6 se muestran los parámetros z-score calculados para cada una de las exposiciones desde la I a las VI y por cada equipo participante en la intercomparación. En cada gráfico se indican también los intervalos del criterio $|z| \leq 2$ (línea verde) y $|z| \geq 3$ (línea roja).

verde) y $|z| \geq 3$ (línea roja). El parámetro z-score del monitor 7 no ha sido representado porque se sale de la escala al tener un valor superior a 7 en todas las exposiciones.

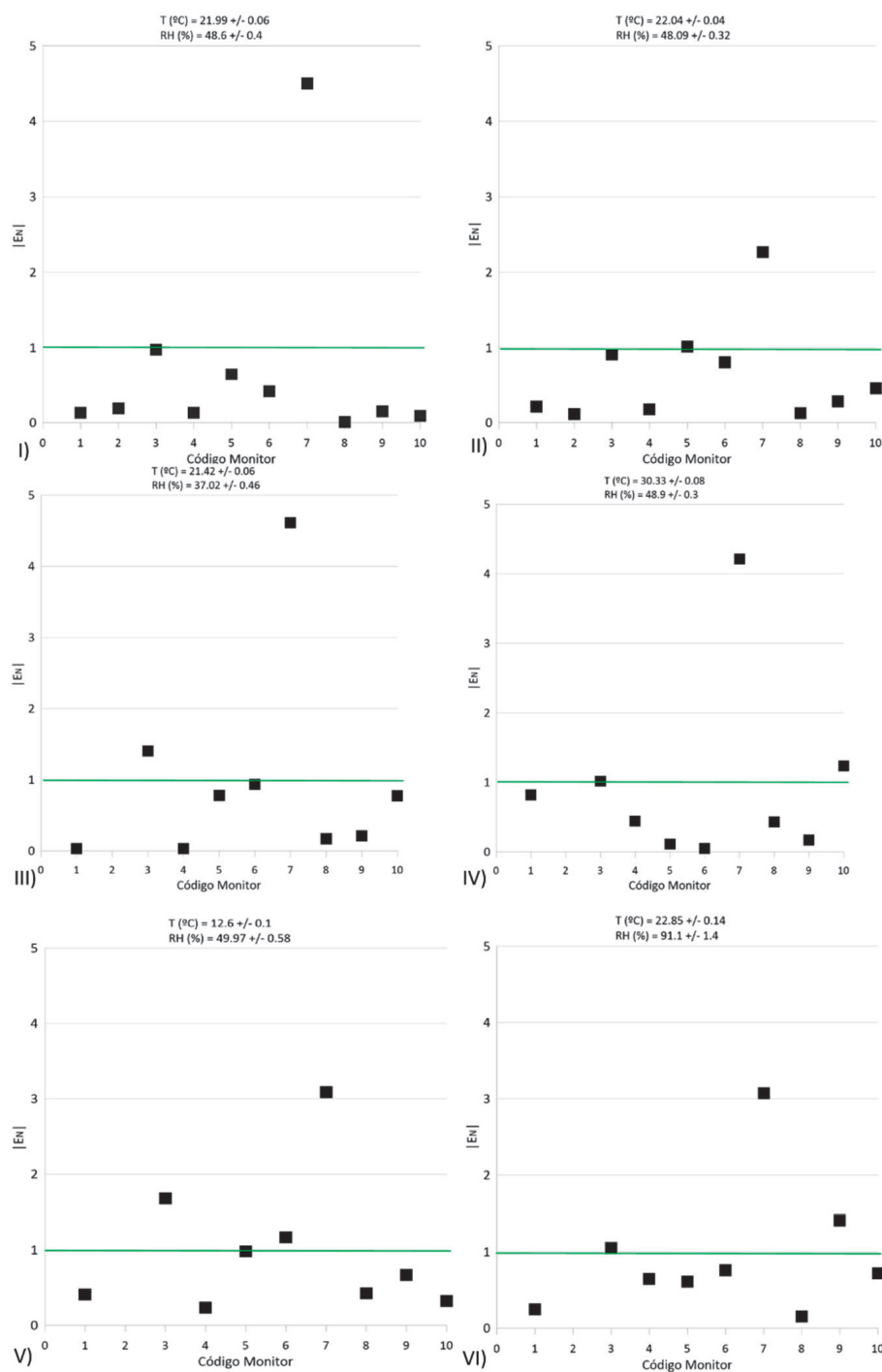
Figura 6. Parámetros z-score (cuadrados negros) calculados para cada una de las exposiciones desde la I a la VI y para cada equipo participante en la intercomparación (Código Monitor). En cada gráfico se indican también los intervalos del criterio $|z| \leq 2$ (línea verde) y $|z| \geq 3$ (línea roja)



En la figura 7 se muestran los parámetros E_N calculados para cada una de las exposiciones desde la I a la VI y para cada equipo participante en la intercomparación. En cada gráfico se indican

también los intervalos del criterio $|E_N| \leq 1$ (línea verde) y las condiciones ambientales bajo las cuales se ha llevado a cabo la medida.

Figura 7. Parámetros E_N (cuadrados negros) calculados para cada una de las exposiciones desde la I a la VI y para cada equipo participante en la intercomparación (Código Monitor). En cada gráfico se indica también el intervalo del criterio $|E_N| \leq 1$ (línea verde) y las condiciones ambientales bajo las cuales se ha llevado a cabo la medida



En la tabla 4 se muestran los valores de $|E_N|$ y $|z|$ score calculados para cada exposición y monitor. En la tabla 5 se muestran los valores de los coeficientes de calibración F_{cal} y su incertidumbre

expandida U_{cal} calculados para cada monitor en las diferentes exposiciones. En ambas tablas los valores en rojo indican que el resultado, siguiendo el criterio del $|E_N|$ y/o $|z|$, es insatisfactorio.

Tabla 4. Valores de $|E_N|$ y $|z|$ score calculados para cada exposición I-VI llevada a cabo en la cámara STAR del INTE-UPC y cada monitor (1-10) que ha participado en la campaña de intercomparación. En rojo aparecen los valores que, en acuerdo con los criterios de $|E_N|$ y $|z|$ score, serían insatisfactorios. En azul aparecen los valores, que en acuerdo con el criterio de $|z|$ score serían cuestionables

EXPO	TIPO	CÓDIGO MONITOR / PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	C.E.	$ z $	0,37	0,53	3,06	0,37	1,88	1,39	15,03	0,02	0,46	0,26
		$ E_N $	0,18	0,26	1,29	0,18	0,90	0,52	5,70	0,01	0,19	0,12
II	C.E.	$ z $	0,44	0,23	2,70	0,37	2,14	2,91	6,98	0,26	0,68	1,03
		$ E_N $	0,21	0,11	0,91	0,18	1,02	0,80	2,27	0,12	0,28	0,46
III	SECA	$ z $	0,07	0,00	3,20	0,06	1,57	2,42	10,88	0,34	0,48	1,58
		$ E_N $	0,03	0,00	1,40	0,03	0,78	0,93	4,61	0,17	0,21	0,77
IV	CALIENTE	$ z $	1,69	0,00	2,35	0,91	0,24	0,21	9,90	0,94	0,37	2,67
		$ E_N $	0,82	0,00	1,02	0,44	0,11	0,05	4,21	0,43	0,17	1,23
V	FRÍA	$ z $	0,83	0,00	3,54	0,47	1,99	2,58	7,51	0,86	1,43	0,66
		$ E_N $	0,40	0,00	1,68	0,23	0,98	1,16	3,09	0,42	0,67	0,32
VI	HÚMEDA	$ z $	0,50	0,00	2,86	1,32	1,26	2,88	11,11	0,31	3,33	1,52
		$ E_N $	0,24	0,00	1,05	0,65	0,61	0,76	3,07	0,15	1,41	0,72

Tabla 5. Valores de los coeficientes de calibración F_{cal} y su incertidumbre expandida U_{cal} calculados para cada monitor 1-10 en las diferentes exposiciones I-VI

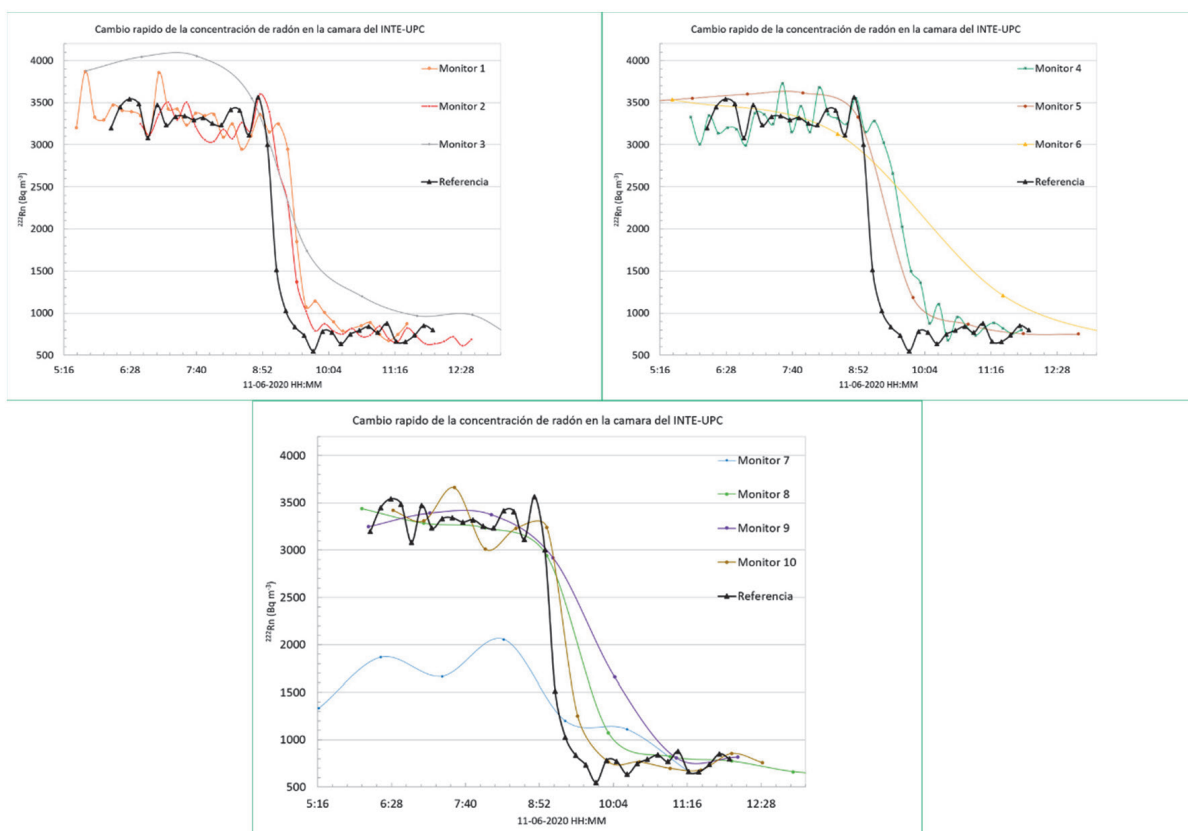
EXPO	TIPO	CÓDIGO MONITOR/ PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	C.E.	F_{cal}	1.01	1.02	0.90	1.01	0.93	0.95	2.30	1.00	0.98	0.99
		U_{cal}	0.08	0.08	0.07	0.08	0.07	0.08	0.36	0.07	0.09	0.08
II	C.E.	F_{cal}	1.02	1.01	0.91	1.01	0.92	0.90	1.37	1.01	1.03	0.96
		U_{cal}	0.08	0.08	0.09	0.08	0.07	0.10	0.19	0.08	0.09	0.08
III	SECA	F_{cal}	1.00		0.89	1.00	0.94	0.92	1.68	0.99	0.98	0.94
		U_{cal}	0.07		0.07	0.07	0.07	0.08	0.17	0.07	0.08	0.07
IV	CALIENTE	F_{cal}	1.07		0.92	1.04	1.01	0.99	1.62	1.04	1.01	0.91
		U_{cal}	0.08		0.08	0.08	0.08	0.16	0.17	0.08	0.08	0.07
V	FRÍA	F_{cal}	0.97		0.88	0.98	0.93	0.91	1.41	0.97	0.95	0.98
		U_{cal}	0.08		0.07	0.08	0.07	0.07	0.15	0.08	0.08	0.08
VI	HÚMEDA	F_{cal}	1.02		0.90	1.05	0.95	0.90	1.71	1.01	0.89	0.95
		U_{cal}	0.08		0.09	0.08	0.07	0.11	0.35	0.08	0.07	0.07

3.4.3. Respuesta de los monitores de radón en continuo a cambios bruscos de la concentración de radón en aire

En la figura 8 se presentan los resultados de las concentraciones de radón, medidas por cada uno de los monitores participantes en la campaña de intercomparación dentro la cámara STAR del INTE, durante un cambio brusco de la concentración de radón en la cámara de un orden de magnitud.

Los resultados demuestran que los monitores con resolución temporal baja (medias horarias) no son capaces de seguir variaciones rápidas de la concentración de radón medidas y tienden a suavizar este comportamiento. Por otro lado, cuando los monitores trabajan en modo difusión se observa un retraso en la respuesta del equipo en comparación con equipos con bomba de succión.

Figura 8. Concentraciones de radón medidas por cada uno de los 10 monitores dentro la cámara STAR del INTE durante un cambio brusco de radón de un orden de magnitud. Comparación con las medidas por el equipo de referencia (Línea negra)



3.5. Conclusiones

Los resultados muestran que la mayoría de los monitores son capaces de medir correctamente la concentración de radón bajo diferentes condiciones ambientales y diferentes concentraciones de radón (para concentraciones en el orden de centenas o de unos miles de Bq m^{-3}). Uno de los monitores participantes, monitor 7, basado en una cámara de difusión pasiva con un sensor para espectrometría alfa con resolución horaria, presenta valores en todas las exposiciones que no son aceptables en base a los criterios del $|E_N|$ y $|z|$ score. El monitor 3, otro modelo de difusión pasivo con resolución horaria, presenta valores que se pueden considerar al límite de la aceptabilidad.

El estudio de la respuesta de los monitores a un cambio brusco de concentración de radón en aire muestra que equipos con baja resolución temporal no son capaces de seguir cambios rápidos de la concentración y presentan valores suavizados como resultados de la integración temporal de la concentración medida.

A partir de los resultados observados en la campaña de intercomparación de monitores en continuo se aconseja a las entidades participantes que a la hora de efectuar una medida en interior:

- Comprueben y declaren la hora de referencia del monitor utilizado (Local, UTC, etc.);
- Consideren en los cálculos de las concentraciones medidas el valor de fondo de radón del monitor presentado en tabla 3.
- Apliquen a las concentraciones medidas por su monitor el factor de calibración presentado en la tabla 5 dependiendo de las condiciones ambientales en las cuales se han tomado las medidas;
- Reporten el valor medido con una incertidumbre total expandida.



4.1. Objetivos

El objetivo principal de la campaña de intercomparación de sistemas de medidas integradores es realizar la evaluación de la respuesta de los sistemas utilizados a concentraciones del orden de 300 Bq m^{-3} durante un periodo mínimo de exposición de unos 3 meses.

Este objetivo global se concreta en utilizar la cámara de radón del LER para llevar a cabo un estudio de la sensibilidad que los sistemas de medida de la concentración de radón integradores, usados más habitualmente, tienen en condiciones ambientales estándar, típica de viviendas y lugares de trabajo no extremos, y con concentraciones de radón del orden de 300 Bq m^{-3} . Estos sistemas comprenden detectores pasivos de trazas y electretes.

4.2. Participantes

En la presente campaña de intercomparación de sistemas de medidas integradores de la concentración de radón en aire participaron 10 laboratorios seleccionados de acuerdo con los criterios del Consejo de Seguridad Nuclear establecidos en el anuncio de la campaña. Los laboratorios pertenecen a diferentes entidades (UTPR, empresas y universidades) distribuidas de manera homogénea en el territorio español. Cada laboratorio envió un mínimo de 5 detectores del mismo modelo siguiendo instrucciones indicadas por el Laboratorio de Radón del INTE-UPC. En la tabla 6 se presenta el listado de laboratorios participantes, las entidades de procedencia y el modelo de detectores con que participaron.

Tabla 6. Laboratorios participantes en la intercomparación de sistemas de medida integradores de la medida de radón en aire

Laboratorio	Centro	Detectores
Asesoría y Control en Protección Radiológica, SL	-	Radtrak ²
Laboratorio de Radón de Galicia	Universidad de Santiago de Compostela	CR39
Laboratorio de Radiactividad Ambiental de Badajoz	Universidad de Extremadura	CR39
Unitat de Física de les Radiacions	Universitat Autònoma de Barcelona	CR39
Centro Nacional de Sanidad Ambiental	Instituto de Salud Carlos III	CR39
Laboratorio de Radón	Universidad de Cantabria	CR39
Labs & Technological Services AGQ S.L	-	CR39
Laboratorio de Análisis y Asesoramiento Medioambiental	Eurofins	E-Perm Electretes
Laboratorio de Radiactividad Ambiental	Seirma Servicios Integrados, SL	E-Perm Electretes
Laboratorio de Radiactividad Ambiental	Universidad Politécnica de Valencia	E-Perm Electretes

4.3. Metodología

4.3.1. Planificación de las exposiciones

Con el fin de conseguir los objetivos, la campaña consistió de dos exposiciones. La primera correspondía a una exposición de $668 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$ que representaría una concentración de radón

aproximadamente de 300 Bq m^{-3} durante un periodo de exposición de 3 meses. La segunda fue una de nivel superior, de $1.977 \text{ Bq m}^{-3} \text{ h}$ que representaría una concentración de radón aproximada de 900 Bq m^{-3} durante 3 meses. En la tabla 7 se resumen las condiciones de las 2 exposiciones que se llevaron a cabo y sus condiciones ambientales aproximadas.

Tabla 7. Resumen de las exposiciones de sistemas integradores de la concentración de radón en aire que se llevaron a cabo en la cámara de radón del INTE

Exposición	^{222}Rn (kBq m ⁻³ h)	Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)
I	668	20	45
II	1.977	20	45

Figura 9. Imagen de los diferentes tipos de detectores que participaron en la intercomparación de sistemas de medidas integradores de la concentración de radón en aire



4.3.2. Análisis estadístico de los resultados de la intercomparación de sistemas de medida integradores de la concentración de radón en aire

El ensayo de aptitud (*proficiency test*) que se ha llevado a cabo con la intercomparación de sistemas de medidas integradores de radón en aire ha servido para evaluar su respuesta. Este ensayo se ha realizado de acuerdo con la ISO/IEC 1703:2010(es) Evaluación de la conformidad — Requisitos generales para los ensayos de aptitud.

El ensayo de aptitud proporciona la posibilidad de efectuar dichas comparaciones y tener una valoración independiente de los resultados proporcionados por los 10 laboratorios comparados con el valor de referencia determinado en la cámara STAR del INTE-UPC durante el

periodo de exposición. Para poder llevar a cabo una evaluación de la respuesta de cada tipo de detector, proporcionado por cada entidad, en los dos diferentes niveles de concentración de radón en aire y condiciones de temperatura y humedad relativa estándar se han utilizado los siguientes parámetros:

a) El factor de calibración de cada equipo en cada exposición F_{cal} , se calculó como:

$$F_{cal} = C_{ref}/C_{eq} \quad (6)$$

Donde C_{eq} es la media de las concentraciones medidas por cada uno de los detectores proporcionados por el mismo participante durante el periodo de exposición y C_{ref} es la media de las medidas obtenidas con el equipo de referencia en la cámara de radón del INTE-UPC en el mismo periodo.

La concentración de referencia se calcula con la siguiente expresión:

$$C_{ref} = (C_{Atmos} - C_{fondo}) * F_{cal_Ref} \quad (7)$$

Donde C_{Atmos} es el valor medio medido por el equipo Atmos 12 DPX en la cámara durante cada periodo de exposición estable, C_{fondo} es el valor medio de la concentración de radón de fondo del equipo Atmos 12 DPX y F_{cal_Ref} es el factor de calibración del Atmos 12 DPX (Certificado de calibración n. SSM2018-2074-5) con una incertidumbre expandida U_{cal_Ref} (con $k=2$) del 7.1 %.

b) La incertidumbre expandida U_{cal} de F_{cal} , es expresada con un intervalo de confianza del 95 % y se calculó como $U_{cal} = u_{cal} * t_{st}$ donde la t_{st} se ha elegido para cada exposición y número de detectores expuesto por cada participante en la tabla de valores críticos de la distribución t de Student; la u_{cal} se ha calculado propagando las incertidumbres con la siguiente ecuación:

$$\left(\frac{u_{Cal}}{F_{Cal}}\right)^2 = \left(\frac{S_{eq}/\sqrt{n_{eq}}}{C_{eq}}\right)^2 + \left(\frac{S_{Atmos}/\sqrt{n_{Atmos}} + S_{Fondo}/\sqrt{n_{Fondo}}}{C_{Atmos} - C_{Fondo}}\right)^2 + \left(\frac{u_{cal_Ref}}{F_{cal_Ref}}\right)^2 \quad (8)$$

Donde las S_{eq} , S_{Atmos} y S_{Fondo} son respectivamente las desviaciones estándar de las medidas de la concentración de radón en aire medidas por los detectores expuestos por cada participante, por el de referencia y en las medidas de fondo del equipo de referencia. Así mismo n_{eq} , n_{Atmos} y n_{Fondo} representan el número de detectores expuestos por cada participante, el número de valores obtenidos de la concentración de radón por el equipo de referencia y en las medidas de fondo del equipo de referencia respectivamente.

- c) **Criterio z' -score.** Es un criterio que permite la interpretación y comparación de los resultados de los participantes en ejercicios de intercomparación (Eurachem, 2011). El parámetro z' se ha calculado como:

$$z' = \frac{|C_{eq} - C_{ref}|}{\sqrt{\sigma_{pt}^2 + u_{ref}^2}} \quad (9)$$

Donde C_{eq} y C_{ref} se han definido previamente y σ_{pt} es la desviación estándar del *proficiency test* que se ha considerado del 10 % de la C_{ref} y u_{ref} es la incertidumbre del valor de referencia ($k=1$). El criterio de aceptación del parámetro z' -score se establece con los siguientes umbrales de decisión:

$z' \leq 2$ Resultado Satisfactorio

$2 < z' < 3$ Resultado Cuestionable

$z' \geq 3$ Resultado Insatisfactorio.

- d) **Criterio del Error Normalizado.** Este criterio de aceptación es uno de los más comunes dentro de las comparaciones entre laboratorios (Botero et al., 2009; Eurachem, 2011). El criterio ha sido aplicado teniendo en cuenta, para cada exposición, el valor de referencia (C_{ref}) con su correspondiente incertidumbre expandida (U_{ref}) y el valor medio de las concentraciones medidas por los detectores de cada participante (C_{eq}) con su correspondiente incertidumbre expandida (U_{eq})*. Para calcular el error normalizado EN, se utiliza la ecuación:

$$E_N = \frac{|C_{eq} - C_{ref}|}{\sqrt{U_{eq}^2 + U_{ref}^2}} \quad (10)$$

La interpretación de este parámetro E_N , calculado para cada laboratorio, establece:

$E_N \leq 1$ Resultado Satisfactorio

$E_N > 1$ Resultado Cuestionable o Insatisfactorio.

* El valor de incertidumbre expandido se calculó como $U_{eq} = SE_{eq} \cdot t_{st}$ (95 %) donde SE_{eq} es el error estándar de la media.

- e) **Coefficiente de Variación del laboratorio (CV):** es una medida que relaciona la desviación estándar (S_{eq}), la media aritmética (C_{eq}) y el valor de la *t* de student (t_{st}) de los resultados de cada laboratorio:

$$CV (\%) = \frac{S_{eq} \cdot t_{st}}{C_{eq}} 100 \quad (11)$$

4.4. Resultados

4.4.1. Respuesta de los detectores integradores bajo diferentes condiciones de la concentración de radón en aire y en condiciones ambientales estándar

En la figura 10 se representan los resultados (puntos grises) de cada detector, de acuerdo con los datos enviados por los participantes, junto con

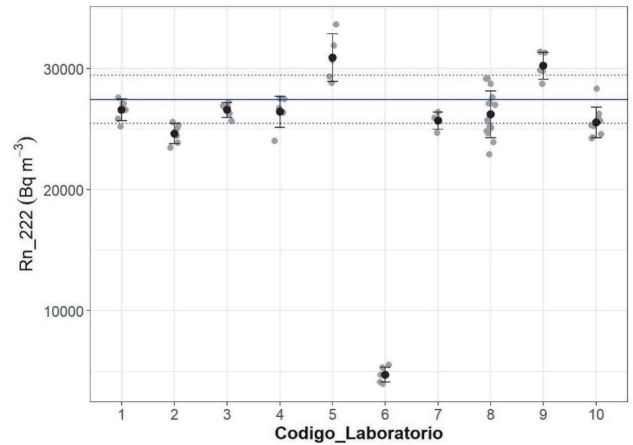
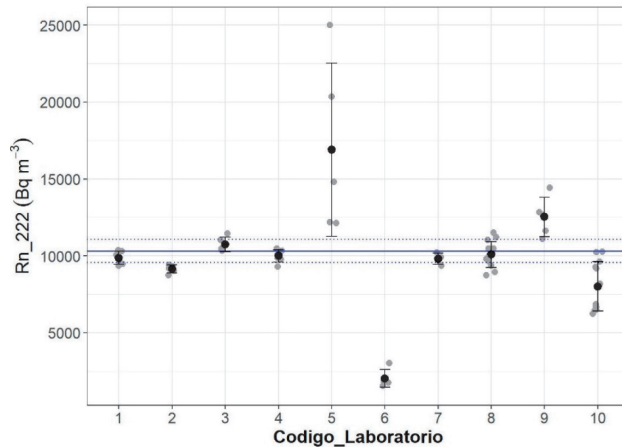
el valor medio y la desviación estándar de las concentraciones de radón medidas en la cámara STAR del INTE-UPC durante las exposiciones I (gráfico superior) y II (gráfico inferior) de la tabla 7. El valor medio medido durante el periodo de exposición por el equipo de referencia se presenta también para cada exposición junto con su desviación estándar de la media con líneas discontinuas. En la tabla 8 se muestran los valores ambientales y de la tasa de $H^*(10)$ medidos en la cámara, y sus incertidumbres expandidas ($k=2$), durante las dos exposiciones. El monitor Thermo Scientific™ RadEye™ no mide toda la

componente cósmica así que se tiene que añadir, para obtener la tasa de $H^*(10)$ total, $0.035 \mu\text{Sv h}^{-1} \pm 0.010 \mu\text{Sv h}^{-1}$ ($k=2$).

Tabla 8. Resumen de los valores de tasas de dosis y parámetros ambientales que se midieron durante las exposiciones de sistemas integradores de la concentración de radón en aire que se llevaron a cabo en la cámara de radón del INTE en noviembre 2020

Exposición	Tasa de dosis ($\mu\text{Sv h}^{-1}$)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Humedad Relativa (%)
I	0.18 ± 0.04	21.8 ± 1.5	48 ± 3
II	0.28 ± 0.05	21.7 ± 1.5	41 ± 3

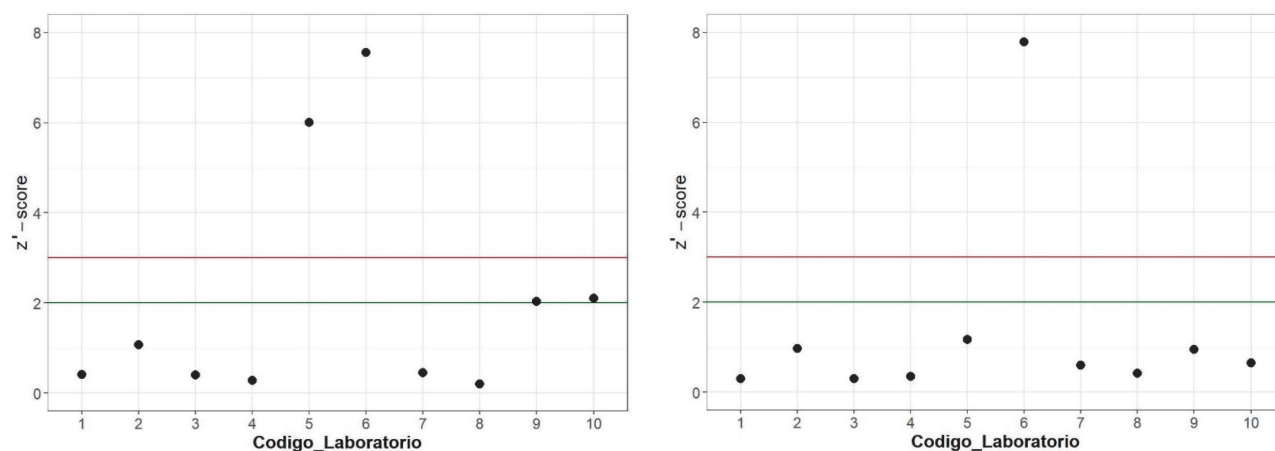
Figura 10. Valores medios y desviaciones estándar de la concentración de radón medida en la cámara STAR del INTE-UPC durante las exposiciones I y II de la tabla 7. El valor medio medido por el equipo de referencia (línea azul) y su incertidumbre expandida (líneas discontinuas) se presentan también



En la figura 11 II se muestran los parámetros z' -score calculados para cada una de las dos exposiciones por cada participante en la intercomparación utilizando sus valores medios y

sus desviaciones estándares de las medias. En cada gráfico se indican también los intervalos del criterio $z' \leq 2$ (línea verde) y $z' \geq 3$ (línea roja).

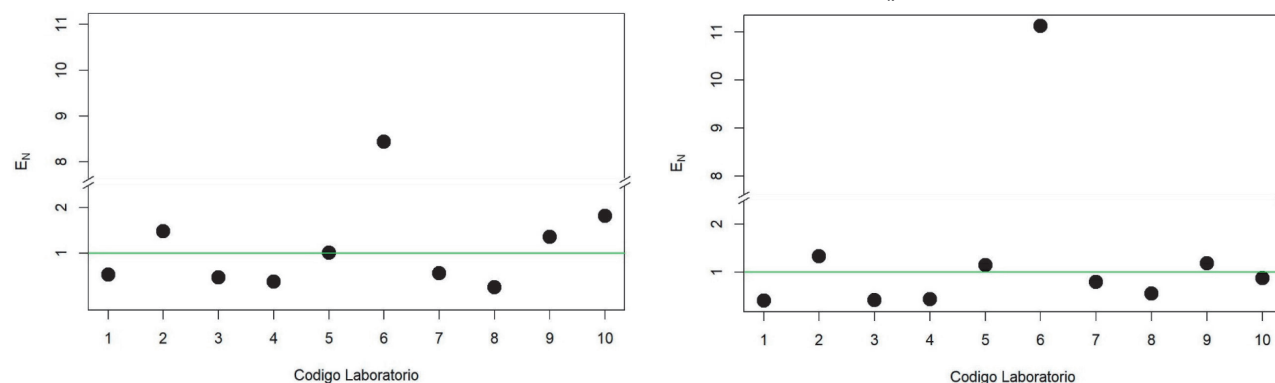
Figura 11. Parámetros z' -score calculados para las dos exposiciones I (gráfico izquierda) y II (gráfico derecha) para cada participante en la intercomparación (Código Laboratorio). En cada gráfico se indican también los intervalos del criterio $z' \leq 2$ (línea verde) y $z' \geq 3$ (línea roja)



En la figura 12 se muestran los parámetros E_N calculados para cada una de las dos exposiciones y para cada participante en la intercomparación. En

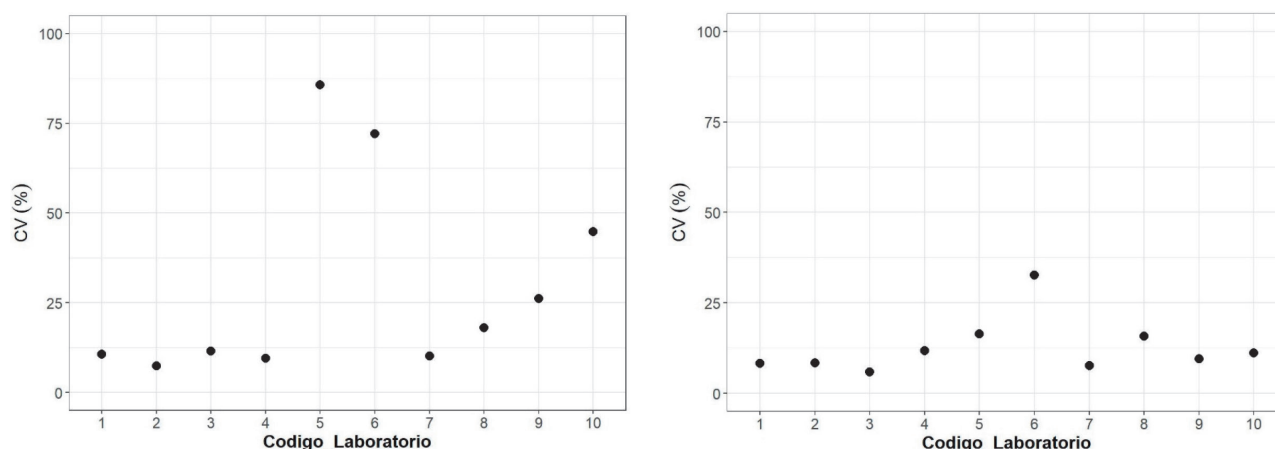
cada gráfico se indican también los intervalos del criterio $E_N \leq 1$ (línea verde).

Figura 12. Parámetros E_N calculados para las exposiciones I (gráfico izquierda) y II (gráfico derecha) para cada participante en la intercomparación (Código Laboratorio). En cada gráfico se indica también el intervalo del criterio $E_N \leq 1$ (línea verde)



En la figura 13 se muestran los valores de los CV calculados para cada una de las dos exposiciones y para cada participante en la intercomparación.

Figura 13. Parámetros CV calculados para las exposiciones I (gráfico izquierda) y II (gráfico derecha) para cada participante en la intercomparación (Código Laboratorio)



Finalmente, en la tabla 9 se muestran los valores de los coeficientes de calibración F_{cal} y su

incertidumbre expandida U_{cal} calculados para cada participante en las dos exposiciones.

Tabla 9. Valores de los coeficientes de calibración F_{cal} y su incertidumbre expandida U_{cal} calculados para cada entidad participante en la campaña A

EXPO	CÓDIGO LABORATORIO PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	F_{cal}	1.05	1.13	0.96	1.03	0.61	5.08	1.05	1.02	0.82	1.29
	U_{cal}	0.10	0.11	0.10	0.10	0.24	1.70	0.12	0.10	0.12	0.20
II	F_{cal}	1.03	1.11	1.03	1.04	0.89	5.83	1.07	1.05	0.91	1.07
	U_{cal}	0.10	0.11	0.10	0.10	0.10	0.93	0.11	0.09	0.09	0.10

4.5. Conclusiones

La campaña de intercomparación de los detectores integrados de la concentración de radón en aire se llevó a cabo en el mes de noviembre 2020. En ella participaron 10 laboratorios distribuidos sobre el territorio español, cada uno con un mínimo de 5 detectores integrados del mismo modelo. Todos los detectores funcionaron correctamente y fueron devueltos a sus propietarios sin incidencias.

Los resultados demuestran que la mayoría de los detectores miden correctamente la concentración de radón a la que han sido expuestos. En general la respuesta de los detectores ha sido mejor para alta exposición (figura 10, gráfico derecha).

Para evaluar el resultado de la intercomparación se calculó el parámetro z' -score con una incertidumbre del 10 % de la C_{ref} . La mayor parte de los laboratorios han obtenido resultados satisfactorios en base al criterio z' -score que se calculó pidiendo una desviación máxima del 10 % (figura 11).

El parámetro E_N se calculó teniendo en cuenta la incertidumbre expandida $U_{eq} = SE_{eq} \cdot t_{St} (95 \%)$ donde SE_{eq} es el error estándar de la media. Los resultados de los valores medios obtenidos para los laboratorios 1, 3, 4, 7, 8, resultan satisfactorios en base al criterio E_N para ambas exposiciones. El factor de calibración de estos detectores se presenta con una incertidumbre expandida del orden del 10 %. Los resultados de los valores medios obtenidos para los laboratorios 2, 5, 9 y 10

resultan cuestionables o no satisfactorios sobre todo en la exposición I, que simula una exposición a una concentración de radón de 300 Bq m^{-3} durante 3 meses, en base al criterio E_N . El factor de calibración de estos detectores en algunos casos se presenta con una incertidumbre expandida del orden del 15 %. Cabe señalar que en el cálculo de E_N no se ha considerado la incertidumbre debida a la calibración del propio sistema medida integrado.

El laboratorio 6 parece mostrar un problema con la lectura de los detectores. Los resultados en este

caso son totalmente insatisfactorios con una incertidumbre expandida sobre el factor de calibración de hasta el 33 %.

La tabla 10 presenta un resumen de los resultados obtenidos utilizando los dos criterios para ambas exposiciones.

Finalmente, la mayor parte de los laboratorios han ofrecido resultados con un coeficiente de variación menor del 15 % (figura 13).

Tabla 10. Resultados de los parámetros E_N y z' -score calculados para cada laboratorio en cada exposición (S = Satisfactorio, C = Cuestionable, N= No satisfactorio)

EXPO	CÓDIGO LABORATORIO PARÁMETRO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	z' -score	S	S	S	S	N	N	S	S	S	C
	E_N	S	N	S	S	S	N	S	S	N	N
II	z' -score	S	S	S	S	S	N	S	S	S	S
	E_N	S	N	S	S	N	N	S	S	N	S



A partir de 2020, y en el marco del Plan Nacional contra el Radón, el CSN ha adquirido el compromiso de organizar cada dos años una campaña de intercomparación de medida de la concentración en aire, abierta a todos los laboratorios y entidades de servicio de España. De este primer ejercicio podemos destacar que:

- Los resultados muestran que la mayoría de los monitores en continuo son capaces de medir correctamente la concentración de radón bajo diferentes condiciones ambientales y diferentes concentraciones de radón (para concentraciones en el orden de centenares o de unos miles de Bq m⁻³).
- Los resultados de la campaña de intercomparación de detectores demuestran que la mayoría miden correctamente la concentración de radón a la que han sido

expuestos, aunque en general la respuesta de los detectores ha sido mejor para alta exposición.

- Las campañas de exposiciones han permitido a los grupos nacionales participantes comprobar la correcta respuesta de sus sistemas de medida, o bien, en caso necesario, aplicar mejoras o correcciones.

Los resultados de ambas campañas nos indican que, en estos momentos, la capacidad de medida de los laboratorios del país que han participado es buena. La organización periódica de campañas de intercomparación va a permitir, además, al CSN establecer un diálogo técnico con los laboratorios y entidades, así como verificar la adecuada respuesta de los nuevos dispositivos de medida que van incorporándose al mercado.



Botero A., Chaves. M. S. Jairo. J. Mendoza V. 2009: Procedimiento de comparación entre laboratorios de calibración basado en el criterio del error normalizado. *Scientia Et Technica*. XV. 42. 226-229. ISSN: 0122-1701. doi: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=849/84916714042>.

IEC 61577-4:2009: Radiation protection instrumentation - Radon and radon decay product measuring instruments - Part 4: Equipment for the production of reference atmospheres containing radon isotopes and their decay products (STAR), <https://webstore.iec.ch/publication/5619>.

ISO/IEC 17043:2010(es): Evaluación de la conformidad — Requisitos generales para los ensayos de aptitud: <https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:iso-iec:17043:ed-1:v1:es>

Softić, A. Zaimović-Uzunović, N. Bašić, H., 2012: Proficiency Testing and Interlaboratory Comparisons in Laboratory for Dimensional Measurement. *J. of Trends in the Development of Machinery and Associated Technology* 16, 1, 115-118.

Vargas, A. Ortega, X. Martín Matarranz, J.L. 2004: Traceability of radon-222 activity concentration in the radon chamber at the technical university of Catalonia (Spain). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 526, 3, 501-509, doi: 10.1016/j.nima.2004.02.022.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PREÁMBULO	3
1. INTRODUCCIÓN	7
2. CÁMARA DE RADÓN DEL INTE-UPC	9
3. CAMPAÑA DE INTERCOMPARACIÓN DE SISTEMAS DE MEDIDA EN CONTINUO DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES	11
3.1. Objetivos	12
3.2. Participantes	12
3.3. Metodología	13
3.3.1. Planificación de las exposiciones	13
3.3.2. Cámara de fondo del INTE-UPC	14
3.3.3. Análisis estadístico de los resultados de la intercomparación de equipos continuos de radón	15
3.4. Resultados	17
3.4.1. Determinación del fondo de cada equipo	17
3.4.2. Respuesta de los monitores de radón en continuo bajo diferentes condiciones de la concentración de radón en aire y de las condiciones ambientales	17
3.4.3. Respuesta de los monitores de radón en continuo a cambios bruscos de la concentración de radón en aire	22
3.5. Conclusiones	23
4. CAMPAÑA DE INTERCOMPARACIÓN DE SISTEMAS DE MEDIDA INTEGRADORES DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE	25
4.1. Objetivos	26
4.2. Participantes	26
4.3. Metodología	26
4.3.1. Planificación de las exposiciones	26
4.3.2. Análisis estadístico de los resultados de la intercomparación de sistemas de medida integradores de la concentración de radón en aire	27
4.4. Resultados	28
4.4.1. Respuesta de los detectores integradores bajo diferentes condiciones de la concentración de radón en aire y en condiciones ambientales estándar	28
4.5. Conclusiones	31
5. CONCLUSIONES GENERALES	33
6. REFERENCIAS	35

INTERCOMPARACIÓN 2020 DE MEDIDAS DE LA CONCENTRACIÓN DE RADÓN EN AIRE BAJO DIFERENTES CONDICIONES AMBIENTALES. EQUIPOS DE MEDIDA EN CONTINUO Y DETECTORES INTEGRADOS

Colección Informes Técnicos

55.2022