

Descripción general y resultados principales de RADSIM, un proyecto de investigación para la generación y validación de modelos numéricos para la predicción de la entrada de radón en edificios a partir de una caracterización del terreno y una definición tipológica de la construcción en España

J. G. Rubiano¹, H. Alonso¹, Ll. Font², B. Frutos³, M. García-Talavera⁴, P. Martel¹, V. Moreno², L. Quindós⁵, C. Sainz⁵, J.T. Santana^{1,6}, D. Rábago⁵, I. Sicilia³, A. Tejera¹.

¹ Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Spain

² Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Spain

³ Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Spain

⁴ Consejo de Seguridad Nuclear. Spain.

⁵ Grupo Radón. Universidad de Cantabria. Spain.

⁶ Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias. Spain.

Canfranc. 11-13 de octubre 2024



UAB

Universitat Autònoma de Barcelona



Laboratorio de Radiactividad Ambiental



INSTITU
TO
EDUAR
DO
TOR
ROJA

Objetivos del Proyecto

Objetivo fundamental.

El objetivo fundamental del proyecto es la realización de un **estudio teórico-experimental en condiciones reales de campo** que permita **desarrollar una herramienta informática válida para la simulación de procesos de generación, transporte, inmisión y acumulación de radón en edificios, y así como para el análisis de efectividades de las técnicas de prevención y remedio** de lugares afectados por radón.

Alcance. Objetivos específicos:

1. Selección de **2 casos de estudio experimental** para la validación de los modelos teóricos desarrollados.
2. **Desarrollo teórico de los modelos numéricos** analizando las alternativas software más adecuadas.
3. **Identificación de las variables significativas a medir** y elaboración de un procedimiento sistemático de toma de datos incluyendo su control de calidad.
4. **Validación de los modelos** teóricos utilizando los datos obtenidos en la fase experimental e intercomparación de los dos tipos de modelos.

Actividades propuestas

WP1: Selección de los casos de estudios para la validación de los modelos. Grupos responsables: **ULPGC, UC, UAB**

WP2: Caracterización tipológica sobre las características constructivas de los emplazamientos seleccionados. Grupos responsables: **UC, ULPGC, IETcc-CSIC.**

WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. Grupos responsables: **UC, ULPGC**

WP4: Caracterización de la permeabilidad al gas del terreno de asiento en los casos de estudio. Grupos responsables: **ULPGC, UC Geomnia.**

WP5: Monitorización en continuo de presiones diferenciales, temperatura y presión atmosférica durante 6 meses en Saelices (Gran Canaria, opcional). Grupos responsables: **UC (ULPGC, opcional)**

WP6 Monitorización de los terrenos circundantes a la escombrera del emplazamiento de Saelices para caracterizar el caso de un terreno contaminado que en el que se han realizado acciones de remedio Grupo responsable: **UC**

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. Grupos responsables: **UAB, IETcc-CSIC.**

WP8: Validación de los modelos de simulación. Grupos responsables: **UAB, IETcc-CSIC.**

WP9: Aplicación de los modelos a la valoración de la efectividad de medidas de mitigación. Grupos responsables: **UAB, IETcc-CSIC.**

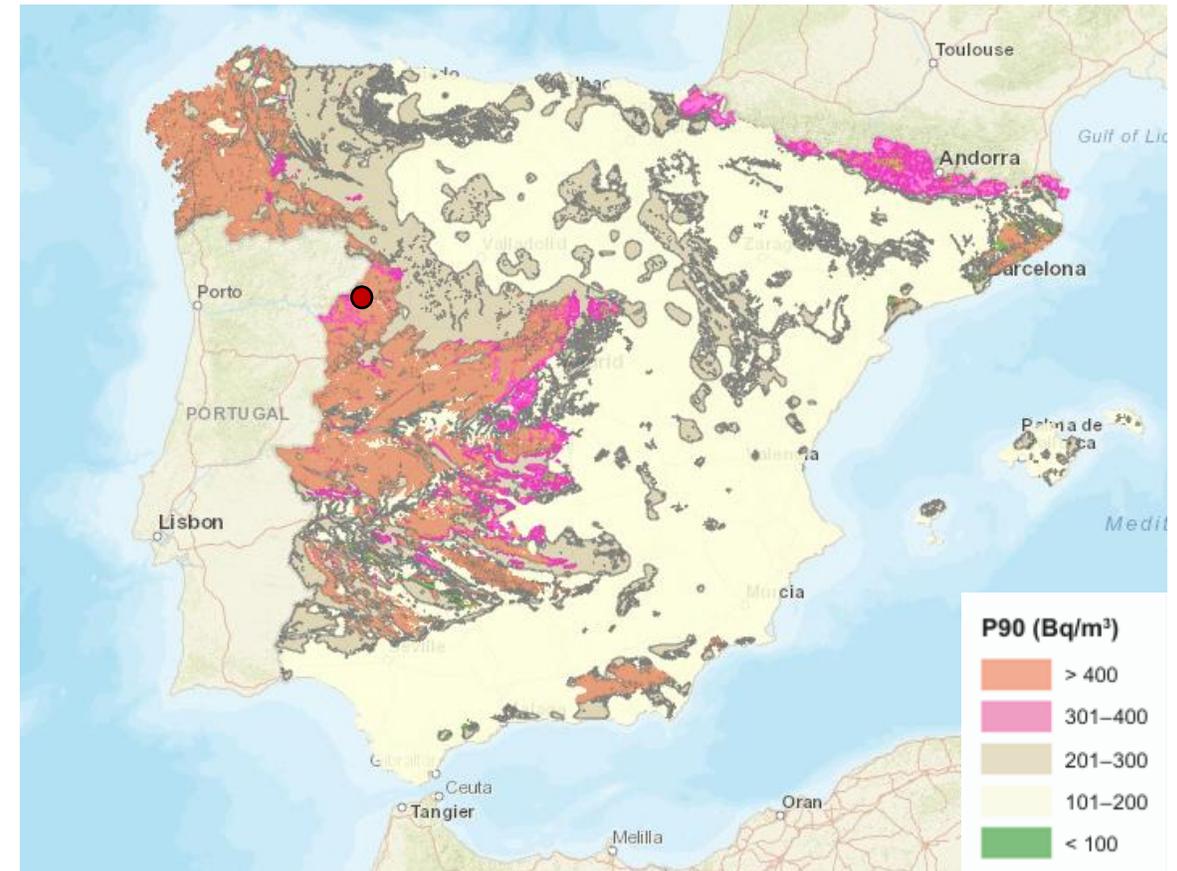
WP10: Coordinación. Grupos responsables: **ULPGC, CSN**

WP1: Selección de los casos de estudios para la validación de los modelos. (ULPGC, UC, UAB)

Se seleccionaron dos emplazamientos en zonas con potencial de radón elevado y con características geológicas diferentes

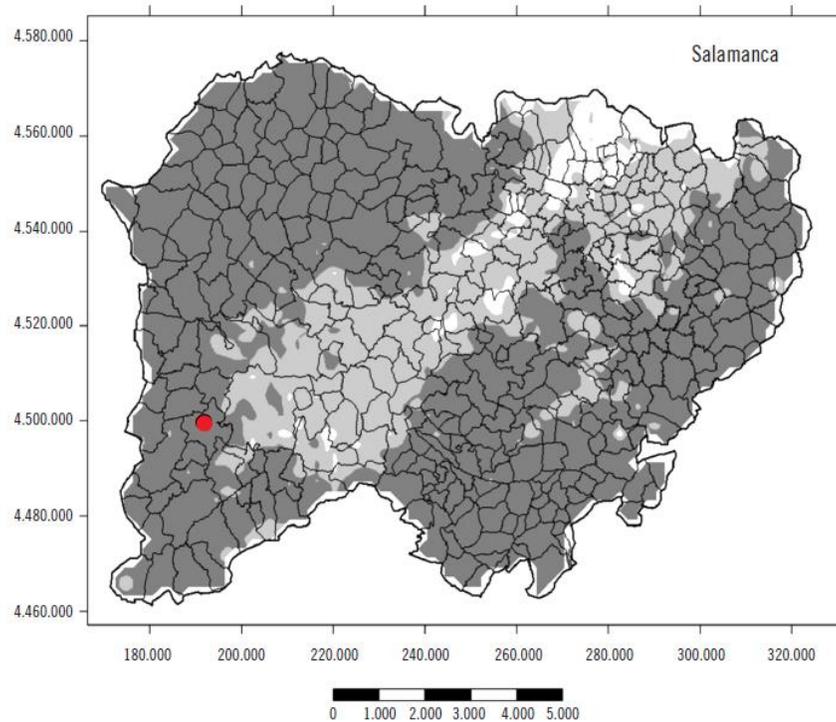


Fuente: <https://www.csn.es/mapa-del-potencial-de-radon-en-espana>



WP1: Selección de los casos de estudios para la validación de los modelos. (ULPGC, UC, UAB)

Emplazamiento 1. Módulo experimental del Laboratorio de Radiación Natural (LNR) situado en las instalaciones de ENUSA en Saelices El Chico (Ciudad Rodrigo, Salamanca).



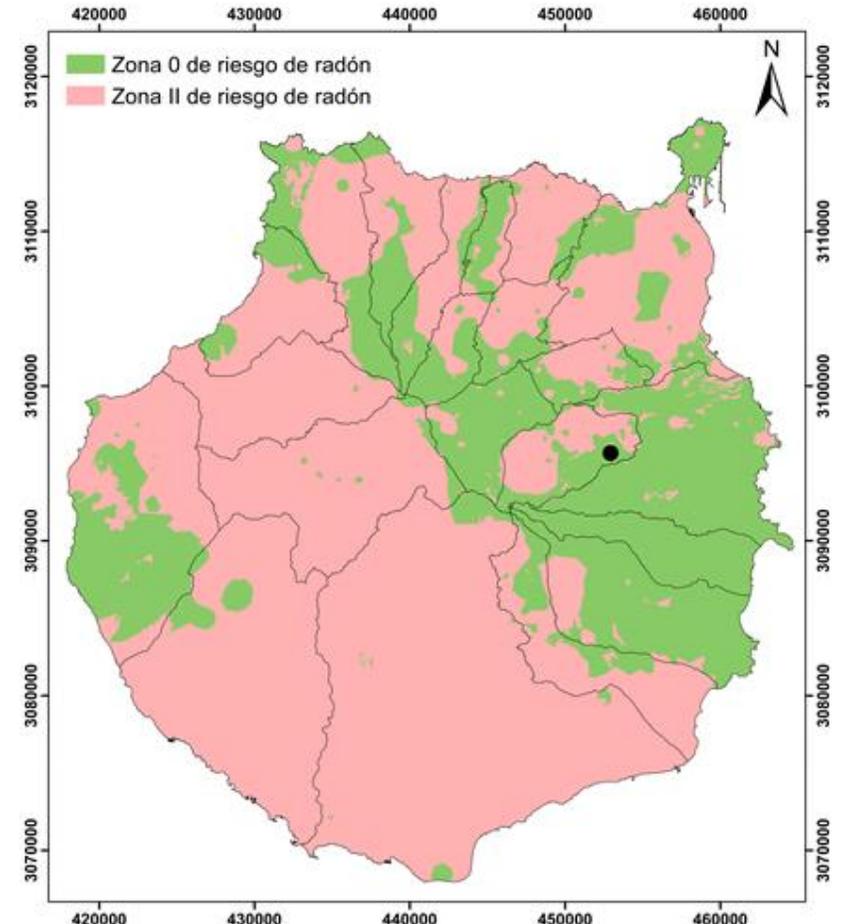
WP1: Selección de los casos de estudios para la validación de los modelos. (ULPGC, UC, UAB)

Emplazamiento 2. Vivienda situada en el municipio de Valsequillo (Gran Canaria).

Requisitos establecidos para el segundo emplazamiento:

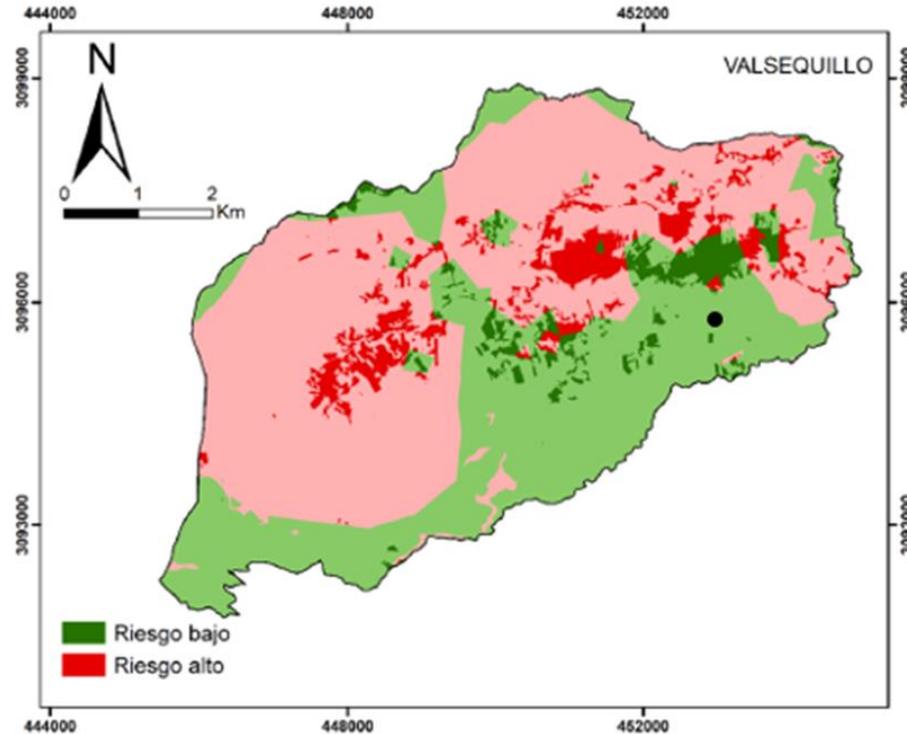
- Debía ser una edificación en contacto con el suelo del tipo vivienda unifamiliar o casa tradicional.
- Debía contar con terreno colindante para poder realizar las medidas de radón en suelos y la medida de su composición radioisotópica.
- Debía tener un acceso viable para el transporte de equipos de medida la realización de las medias periódicas.

Fuente: C. Briones, J. Jubera, H. Alonso, J. Olaiz, J.T. Santana, N. Rodríguez-Brito, A.C. Arriola-Velásquez, N. Miquel, A. Tejera, P. Martel, E. González-Díaz, J.G. Rubiano. (2024). *Indoor radon risk mapping of the Canary Islands using a methodology for volcanic islands combining geological information and terrestrial gamma radiation data.* *Science of The Total Environment*, 92.



WP1: Selección de los casos de estudios para la validación de los modelos. (ULPGC, UC, UAB)

Emplazamiento 2. Vivienda situada en el municipio de Valsequillo (Gran Canaria).

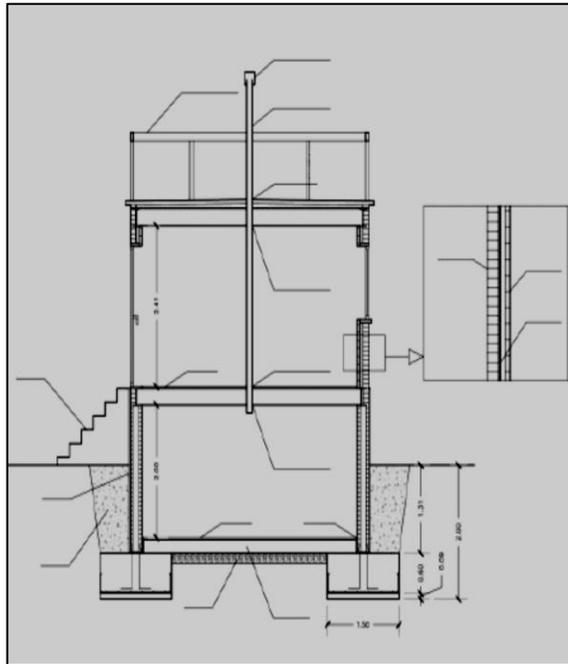


Fuente: J. García-Rubiano, H.E. Alonso-Hernández. Informe final del convenio: *Elaboración de una propuesta de nueva zonificación para la predicción del nivel de riesgo derivado de la presencia de concentraciones de radón en el interior de edificios en las Islas Canarias.*

WP2: Caracterización tipológica de las características constructivas de los emplazamientos seleccionados. UC, ULPGC, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 1. Saelices.

Módulo experimental: Características de una construcción de vivienda unifamiliar en un entorno rural, Dos alturas, con una planta semienterrada y otra en la superficie del terreno. Planta cuadrada de 25 m².



Emplazamiento 2. Valsequillo. Vivienda unifamiliar de aproximadamente 450 m² de una sola planta reformada a partir de una antigua instalación de pozo y galerías dedicada a la explotación de aguas subterráneas



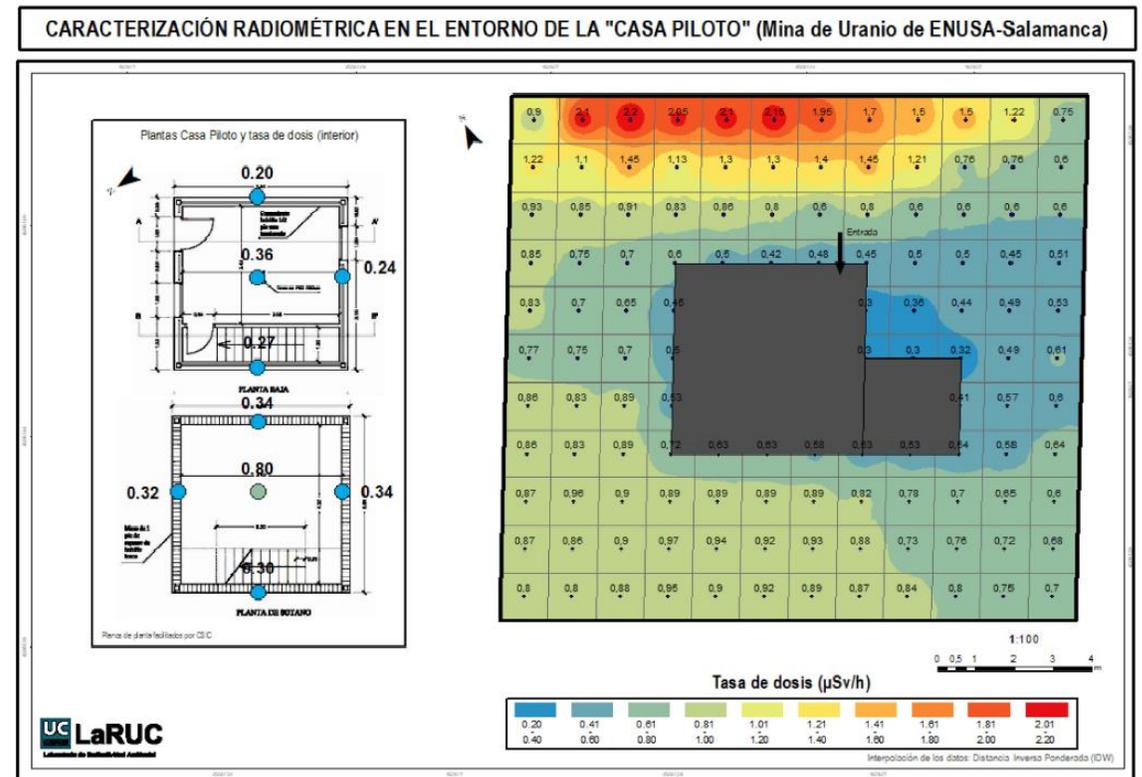
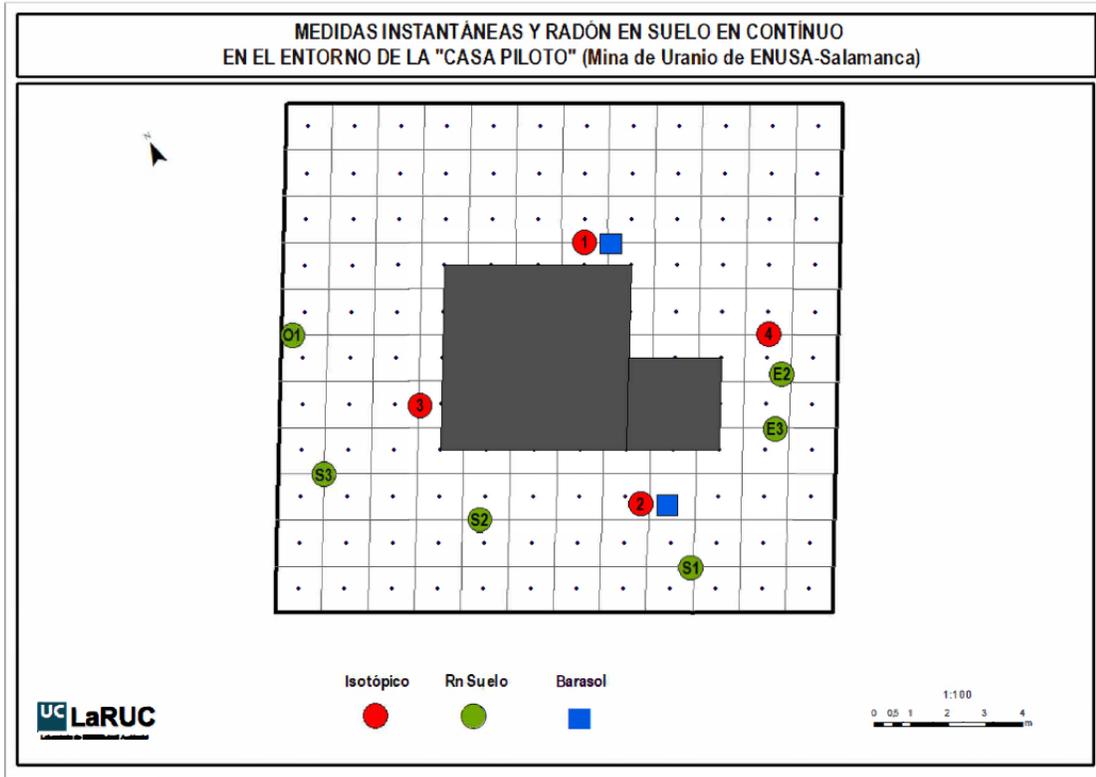
WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Parámetros medidos en los dos emplazamientos:

- Tasas de exposición a 1 m del suelo.
- Concentración radioisotópica del suelo.
- Concentración instantánea del suelo y permeabilidad. Método de Neznal (M. Neznal and M. Neznal 2009).
- Concentración de radón *indoor* en distintas estancias (6 meses – 1 año).
- Variación temporal de la concentración de radón en el suelo (Barasol). 6 meses

WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Emplazamiento 1. Saelices. Localización de las medias y dosis gamma.



WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Emplazamiento 1. Saelices. Concentración de radioisótopos y radón en suelos (GRP)

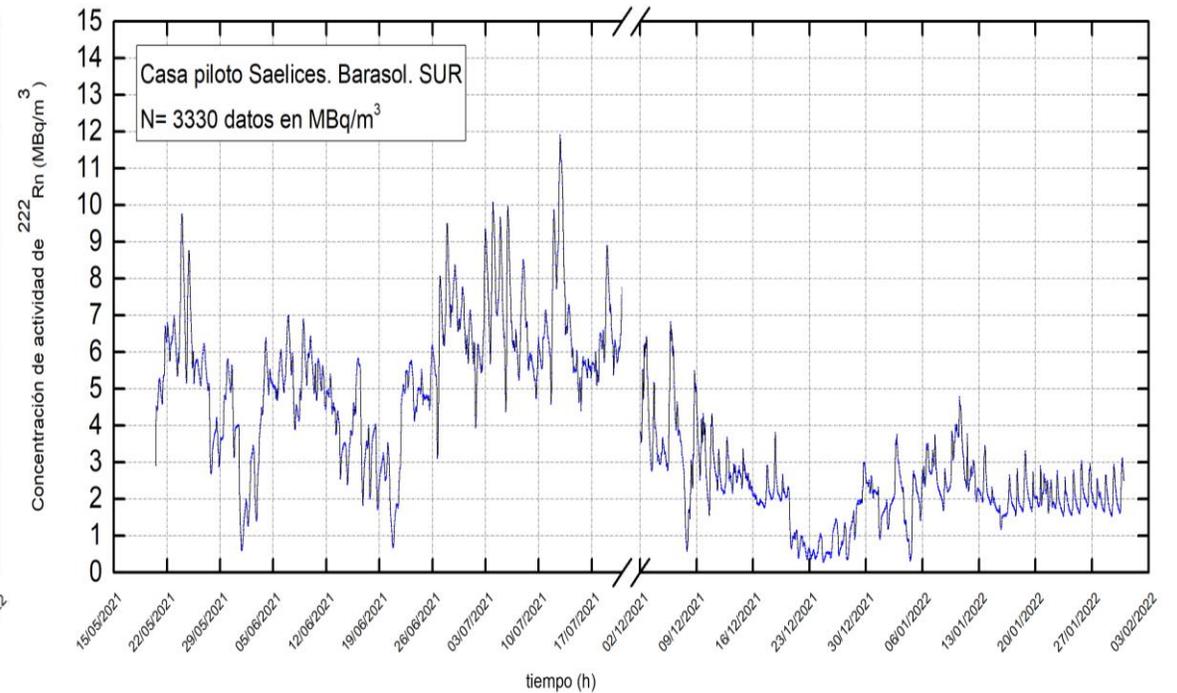
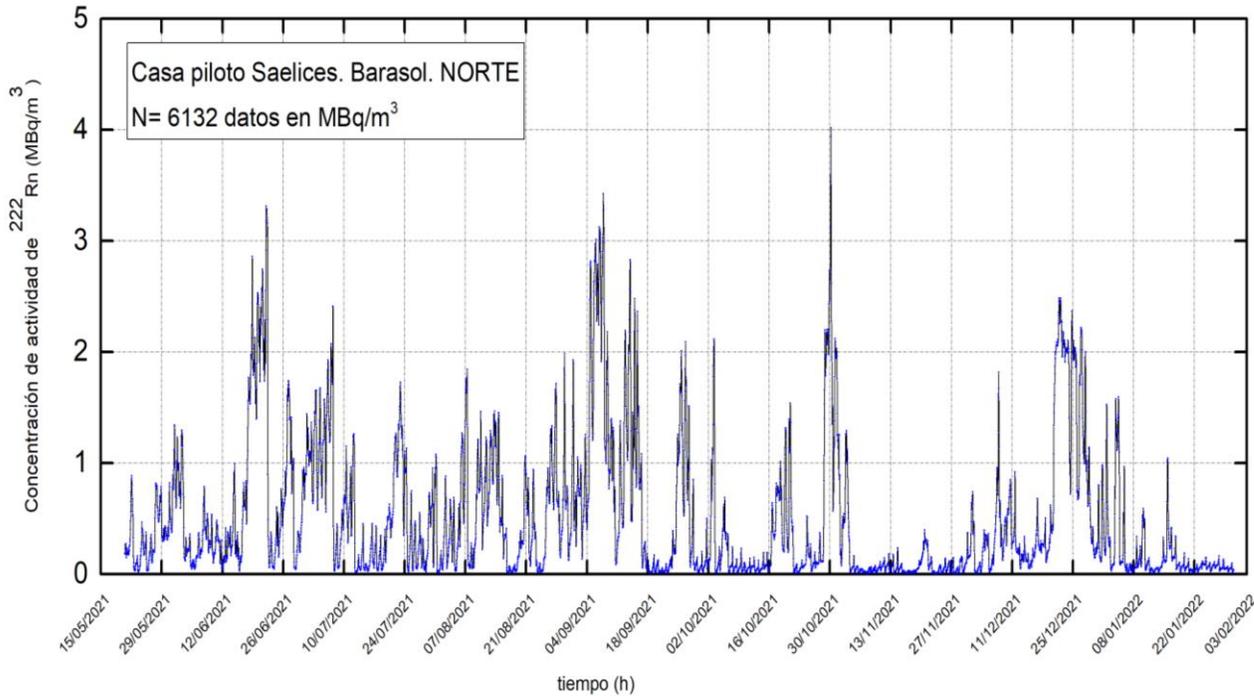
| Punto | $^{238}\text{U}(^{234}\text{Th})$ Bq/kg | $^{226}\text{Ra}(^{214}\text{Pb})$ Bq/kg | $^{232}\text{Th}(^{228}\text{Ac})$ Bq/kg |
|--------------------------|--|---|---|
| 01 Norte | 1260±210 | 2310±190 | 72±17 |
| 02A Sur (superficial) | 1180±200 | 2360±200 | 61±16 |
| 02B Sur (profundo) | 1550±250 | 2860±240 | 54±16 |
| 03 Oeste | 1140±190 | 1890±160 | 64±15 |
| 04 Este | 1040±170 | 2060±170 | 44±14 |

Tabla 3. Saelices. Valores puntuales de concentración de radón y permeabilidad en el terreno a 80 cm de profundidad y valor de GRP

| Punto | C (kBq m ⁻³) | κ (m ²) | GRP |
|-------|--------------------------|---------------------|-----|
| E2 | 690 | 10 ⁻¹³ | 230 |
| E3 | 1207 | 10 ⁻¹³ | 402 |
| S1 | 744 | 10 ⁻¹³ | 248 |
| S2 | 888 | 10 ⁻¹³ | 296 |
| S3 | 887 | 10 ⁻¹³ | 296 |
| O1 | 1707 | 10 ⁻¹² | 854 |

WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

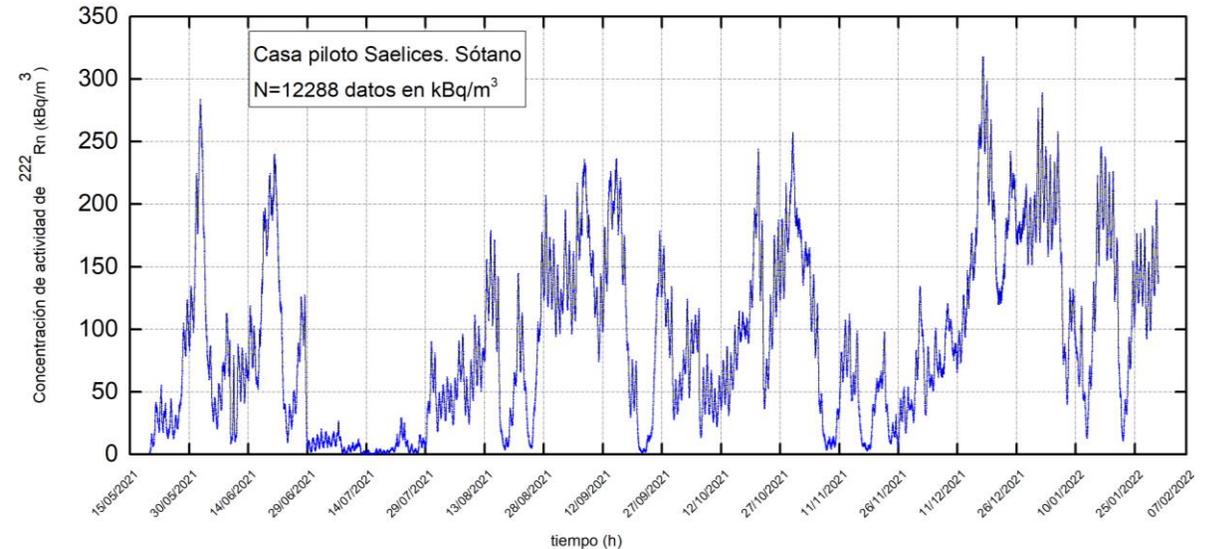
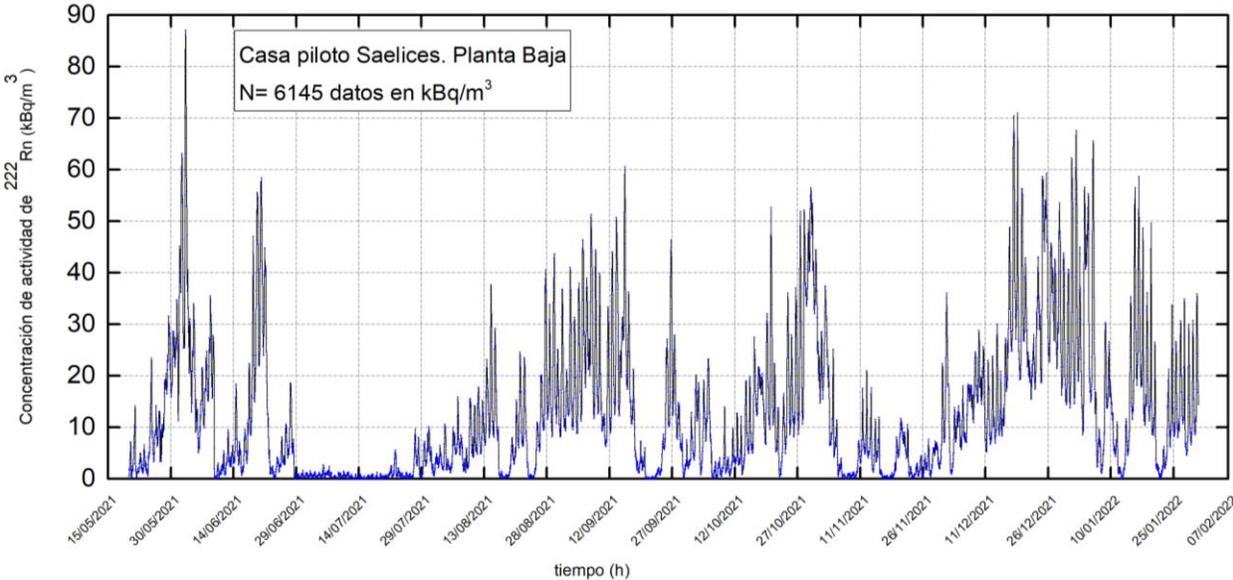
Emplazamiento 1. Saelices. Radón en suelos (1 m) en continuo



WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

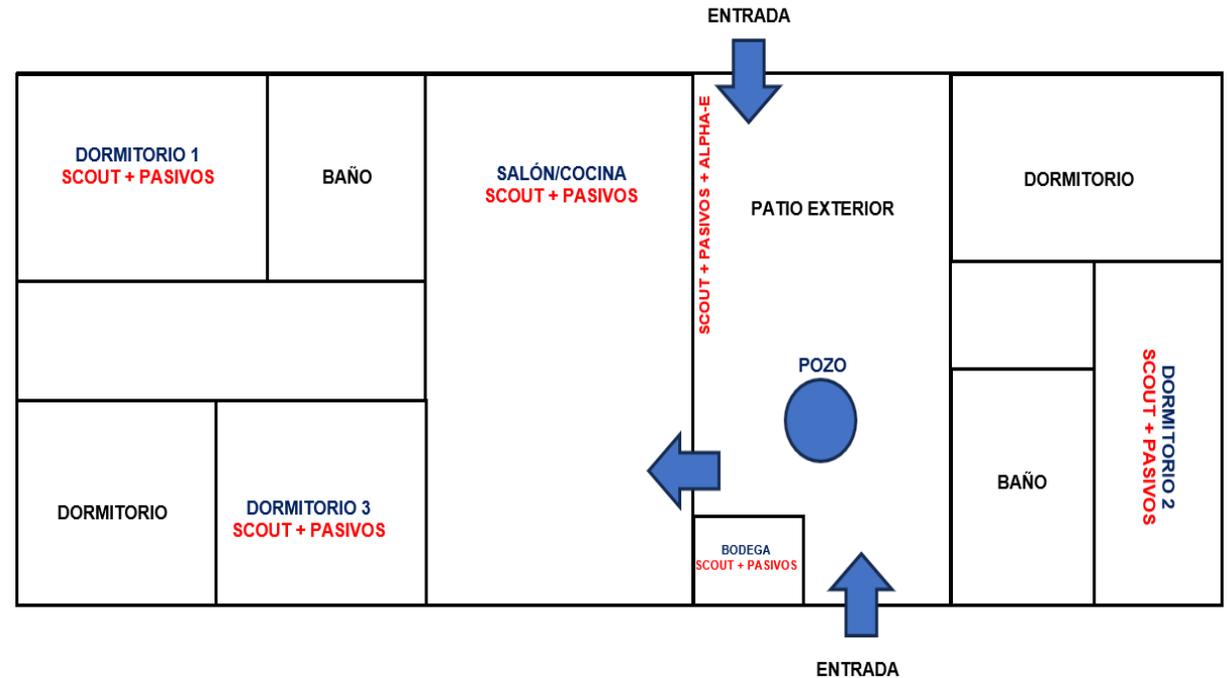
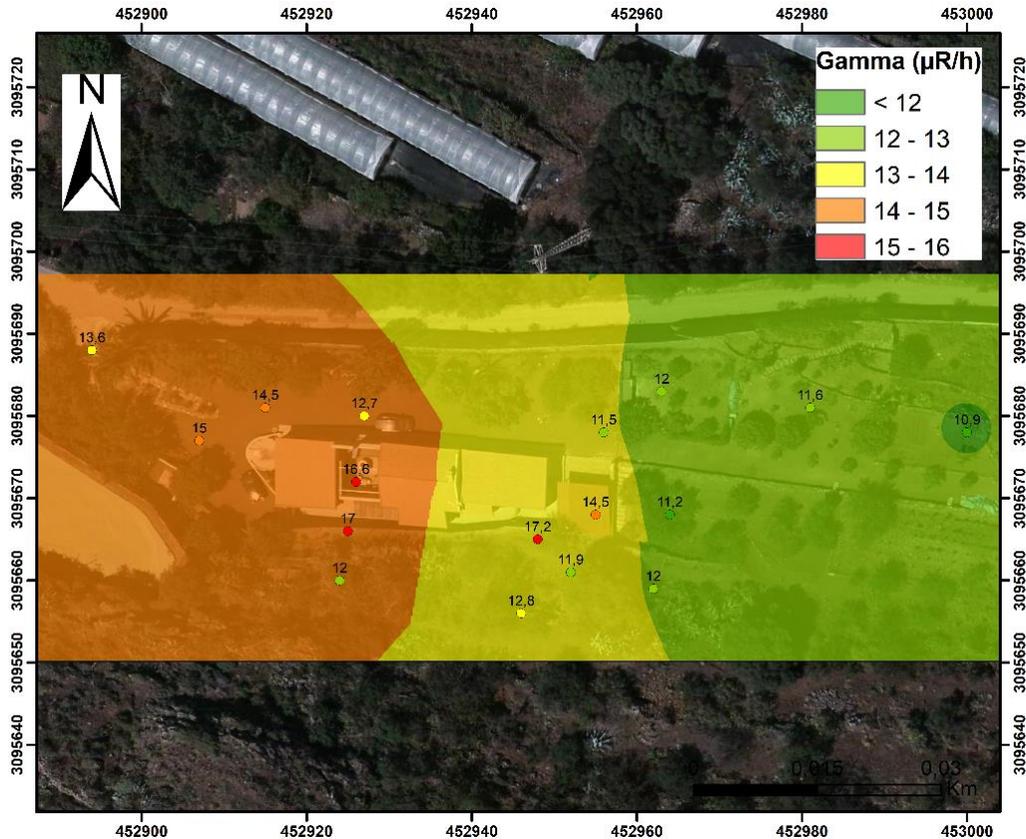
Emplazamiento 1. Saelices. Radón indoor.

6 meses entre mayo de 2021 y enero de 2022



WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

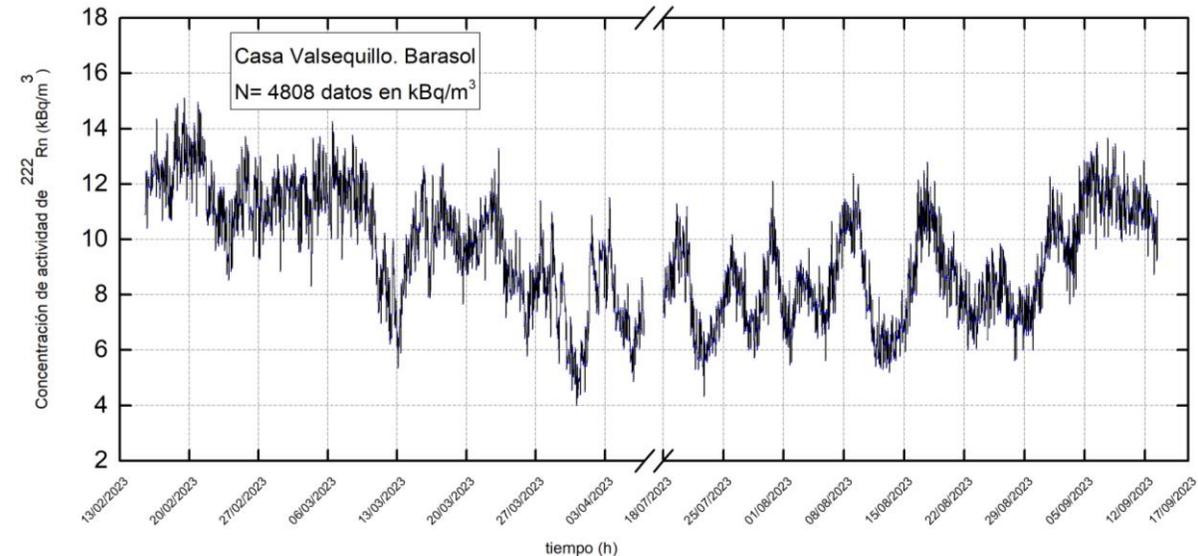
Emplazamiento 2. Valsequillo. Localización de las medias y dosis gamma. (0.131 – 0.096 $\mu\text{Gy/h}$)



WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Emplazamiento 2. Valsequillo. Concentración de radioisótopos y radón en suelos.

| Muestra | ²²⁶ Ra Bq/kg | Incert. Bq/kg | ⁴⁰ K Bq/kg | Incert. Bq/kg | ²²⁸ Ra Bq/kg |
|------------|----------------------------|------------------|--------------------------|------------------|----------------------------|
| Muestra 01 | 25.55 | 1.43 | 383.00 | 19.10 | 52.97 |
| Muestra 02 | 21.95 | 1.08 | 313.00 | 14.50 | 51.45 |
| Muestra 03 | 18.94 | 1.12 | 261.00 | 13.90 | 37.03 |
| Muestra 04 | 32.87 | 1.66 | 691.00 | 31.00 | 52.76 |



C_{Rn} : 14.5 - 22.5 kBq/m³.

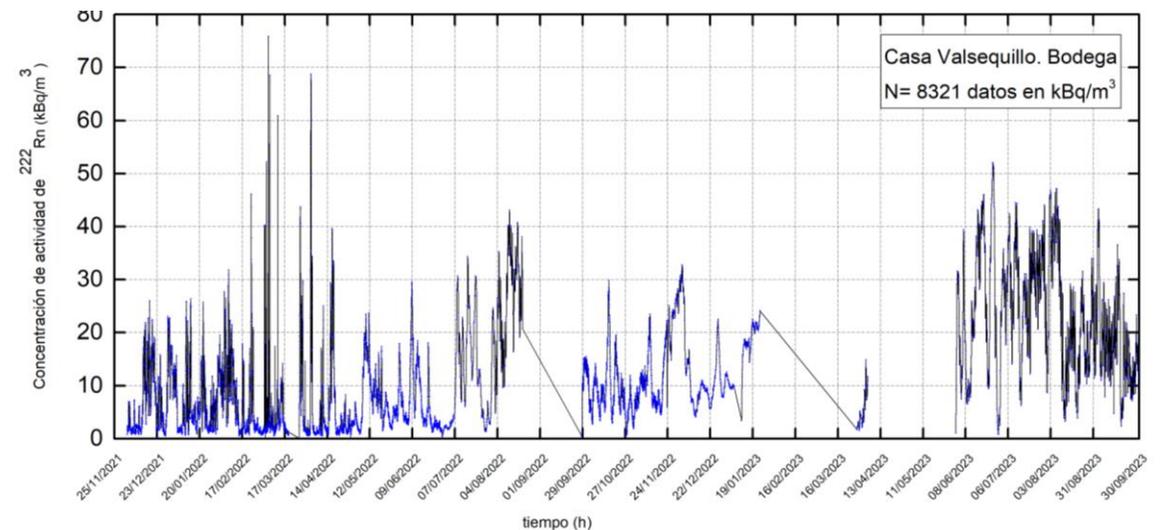
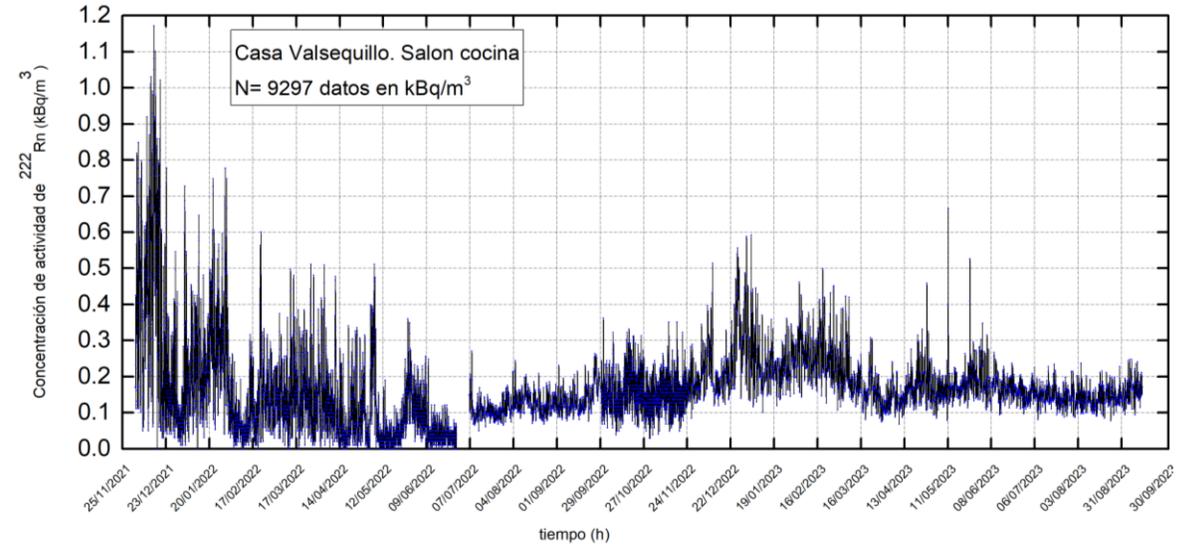
Permeabilidad de suelo: $k 1.8 \times 10^{-11} \text{ m}^2$ (alta permeabilidad). GRP: 20 - 30. Método de Neznal (M. Neznal and M. Neznal 2009).

WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Emplazamiento 2. Valsequillo. Radón indoor.

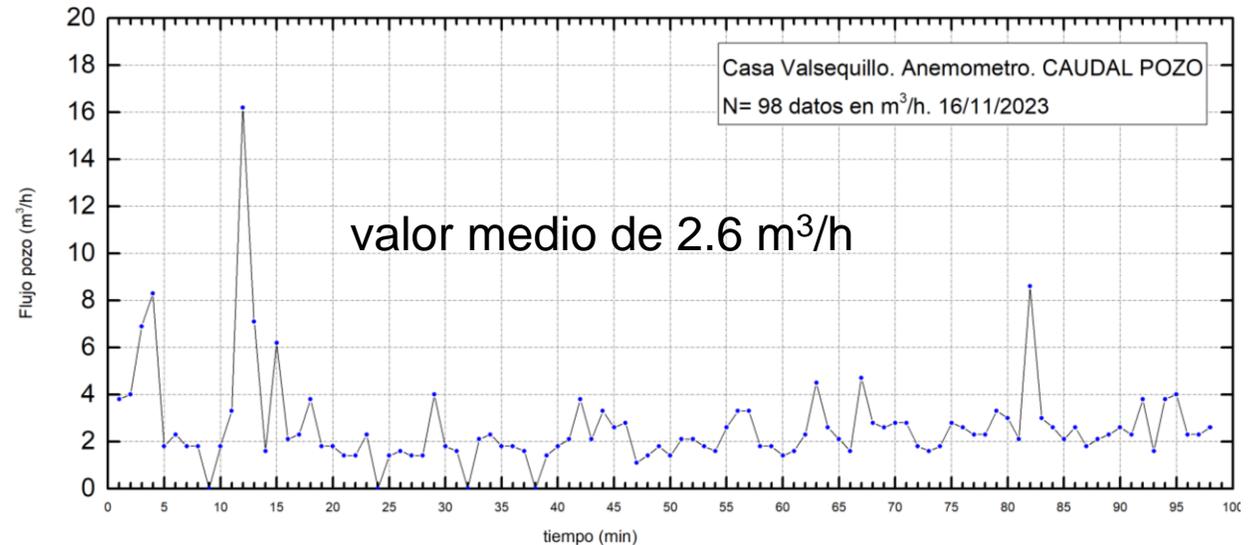
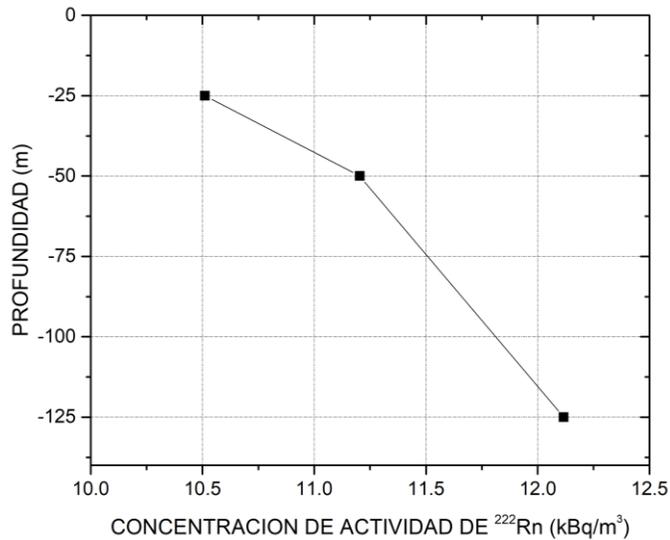
Tabla 5. Concentración de actividad de radón indoor medida con detectores pasivos en dos periodos.

| Radón indoor invierno 2021-2022 | | | |
|---------------------------------------|------------|------------|--------------------------|
| Estancia | Inicio | Fin | RAC (Bq/m ³) |
| BD | 03/12/2021 | 04/03/2022 | 3240 ± 230 |
| DM1 | 03/12/2021 | 04/03/2022 | 219 ± 16 |
| SC | 03/12/2021 | 04/03/2022 | 174 ± 13 |
| Radón indoor otoño-invierno 2022-2023 | | | |
| BD | 28/09/2022 | 11/01/2023 | 2530 ± 179 |
| DM1 | 28/09/2022 | 11/01/2023 | 17 ± 2 |
| DM2 | 28/09/2022 | 11/01/2023 | 176 ± 13 |
| DM3 | 28/09/2022 | 11/01/2023 | 12 ± 1 |
| SC | 28/09/2022 | 11/01/2023 | 80 ± 6 |



WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. UC, ULPGC

Emplazamiento 2. Valsequillo. El pozo como fuente de radón.



WP4: Caracterización de la permeabilidad al gas del terreno de asiento en los casos de estudio. ULPGC, UC, Geomnia.

Estudio de la geotecnia en los dos emplazamientos realizados por Geomnia:



- Caracterización Geológica.
- Cálculo en laboratorio de la permeabilidad intrínseca por diferentes métodos:
 1. Granulometría y porosidad
 2. Granulometría, porosidad y humedad
 3. Textura
 4. Ensayo in situ de alto vacío.
- Análisis del contenido volumétrico de agua en el suelo.

WP4: Caracterización de la permeabilidad al gas del terreno de asiento en los casos de estudio. ULPGC, UC, Geomnía.

Emplazamiento 1. Saelices.

| | | | |
|---|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Según la granulometría y porosidad | $k_0(m^2)$ (Hazen) | $k_0(m^2)$ (Slichter) | $k_0(m^2)$ (Bakhmeteff) |
| | 4.3×10^{-10} | 1.26×10^{-14} | 2.13×10^{-12} |
| Según la granulometría, porosidad y humedad | $k_0(m^2)$ (Rogers y Nielson) | | $k_0(m^2)$ (Nielson) |
| | 4.46×10^{-12} | | 3.31×10^{-11} |
| Según la textura | $k_0(m^2)$ Cata-10 | $k_0(m^2)$ Cata-85-90 | $k_0(m^2)$ Cata-90 |
| | 1.07×10^{-12} | 7.41×10^{-13} | 7.82×10^{-13} |
| Ensayo de alto vacío | $k_0(m^2)$ | | |
| | 2.39×10^{-14} | | |
| RADON JOK | $k_0(m^2)$ | | |
| | $10^{-12} - 10^{-13}$ | | |

Emplazamiento 2. Valsequillo.

| | | | |
|---|-------------------------------|------------------------|-------------------------|
| Según la granulometría y porosidad | $k_0(m^2)$ (Hazen) | $k_0(m^2)$ (Slichter) | $k_0(m^2)$ (Bakhmeteff) |
| | 2.69×10^{-11} | 5.56×10^{-11} | 1.45×10^{-10} |
| Según la granulometría, porosidad y humedad | $k_0(m^2)$ (Rogers y Nielson) | | $k_0(m^2)$ (Nielson) |
| | 1.08×10^{-9} | | 5.20×10^{-9} |
| Según la textura | $k_0(m^2)$ sondeo | | $k_0(m^2)$ cata |
| | 3.51×10^{-12} | | 5.75×10^{-13} |
| Ensayo de alto vacío | $k_0(m^2)$ | | |
| | 2.59×10^{-8} | | |
| RADON JOK | $k_0(m^2)$ | | |
| | 1.8×10^{-11} | | |

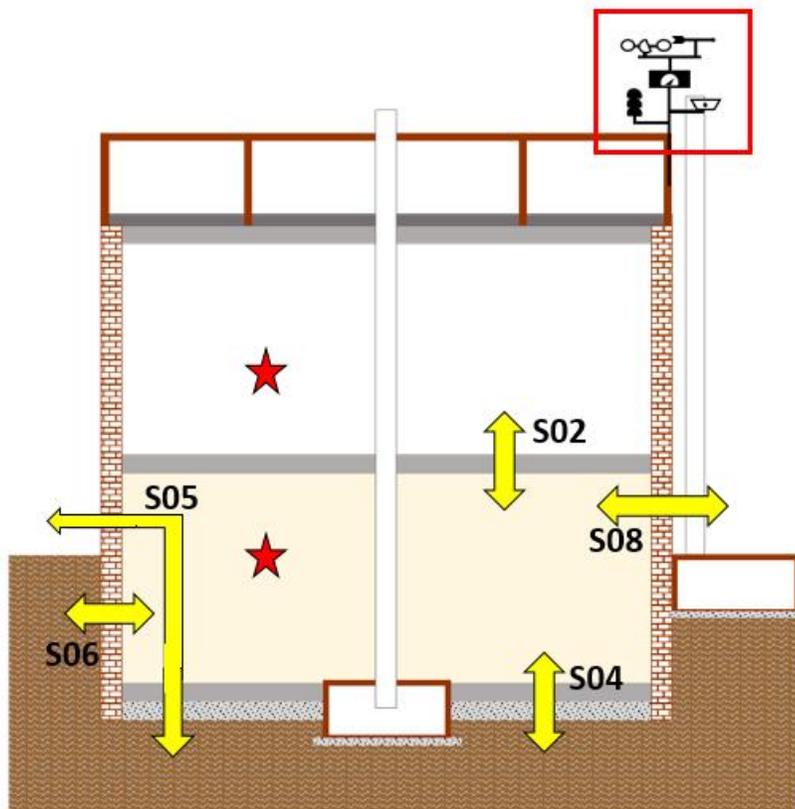
WP5: Monitorización en continuo de presiones diferenciales, temperatura y presión atmosférica. UC. ULPGC.

Emplazamiento 1. Saelices.

Monitorización meteorológica completa: Estación local PCE-138 FWS20, PCE Instruments. Medida de Velocidad del viento, Temperatura, Presión, Humedad, Radiación solar, evaporación. Lluvia. Serie de 8 meses.

Medida de presiones diferenciales entre distintas estancias. Serie de 6 meses.

Ensayo Blower Door. Tasa de infiltración de aire (n50) $2,4 \text{ h}^{-1}$ para la planta 1 y sótano y de 2.2 h^{-1} para la planta sótano.



WP5: Monitorización en continuo de presiones diferenciales, temperatura y presión atmosférica. UC. ULPGC.

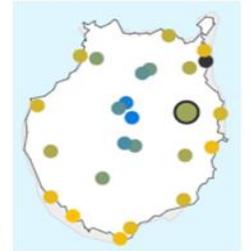
Emplazamiento 2. Valsequillo.

Monitorización meteorológica: Equipos Sarad, Medida de Temperatura, Presión y Humedad, Serie de 12 meses. El resto de parámetros se pueden obtener de la estación de la AEMET más cercana (Telde-Centro forestal Doramas).

Medida de presiones diferenciales entre distintas estancias. No ha sido posible realizarla por restricciones en la instalación de los sensores.

Estación 'TELDE-CENTRO FORESTAL DORAMAS'

- [Tabla comparativa 2023 vs. 2022.](#)
- [Histórico de datos horarios, desde 01/12/2019 hasta 23/02/2023.](#)
- [Tabla de datos meteorológicos principales.](#)
- [Estaciones próximas.](#)
- [Gráfica de temperaturas.](#)
- [Gráfica de precipitaciones acumuladas.](#)
- [Gráfica de precipitaciones.](#)
- [Ubicación de la estación TELDE-CENTRO FORESTAL DORAMAS.](#)
- [Acrónimos y términos utilizados.](#)



La estación meteorológica está próxima al municipio de 'Telde', a una altitud de 344 msnm., y cerca de Malpaís, Tecén, Barranco de la Palma, Presa de Salvaindía, Lomo Magullo, Tecén de Valsequillo, Caserío Casa Blanca, Vista Alegre, Montaña de las Palmas, Lomo Bristol....

Modelos de simulación.

Modelo RAGENA (UAB): Software de simulación concebido para estudiar la dinámica del radón en recintos cerrados. Basado en la herramienta de programación simbólica STELLA. Permite una representación de los procesos de acumulación del gas radón en espacio interiores tanto en estado estacionario como dinámico. Sin resolución espacial. (Font, 1997; Font et al., 2001; Font y Baixeras, 2003).

Modelo COMSOL-ITCC: Software basado en el Método de los Elementos finitos. concebido para estudiar la dinámica del radón en recintos cerrados. Basado en la herramienta de programación COMSOL Multiphysics. Contempla los mecanismos físicos de generación, desintegración, transporte y dilución del radón, que son aplicados tanto a los medios porosos (terreno y materiales de construcción), como a los espacios interiores. Con resolución espacial.

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Definición de parámetros para la simulación. Emplazamiento 1. Saelices.

Tabla 9. Saelices. Parámetros relativos al Terreno

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|--------------------------------|---|------------------------------|--|
| Fuente | $(A_{Ra-226_soil} * \lambda_{Rn} * f * \rho_{gr_soil} * (1 - E_{soil})) / E_{soil}$ R.L. (Nazaroff et al., 1988) | 11,86 Bq/(m ³ .s) | Cálculo de fuente partiendo de concentración de radio en el terreno. |
| f_{max} | (0,2 – 0,7) R.L. (Nazaroff et al., 1988) | 0,3 | Coefficiente máximo de emanación |
| f | $f_{max} * (0,2 + 0,8 * (1 - \exp(-q * m)))$ R. Tesis. (LI.Font) | 0,22765 | Coefficiente emanación corregido |
| q | $6 + 2 * \log((d_{soil}) * 1E6)$ | 11,991 | Parámetro exponencial para cálculo de f |
| A_{Ra-226_soil} | (2310 / 2860) [Bq/kg] R.M. | 2300 Bq/kg | Actividad ²²⁶ Ra |
| λ_{Rn} | V.E. | 2,0972E-6 s ⁻¹ | Coefficiente de desintegración del radón |
| m | (0,05 / 0,97) R. Tesis. (LI.Font) | 0,1 | Fracción de saturación del agua |
| k_{soil} | (1,26E-14 / 4,34E-10) [m ²] R.M. | 1E-13 m ² | Permeabilidad del suelo |
| ρ_{gr_soil} | V.E. | 2700 kg/m ³ | Densidad de los granos del suelo |
| d_{soil} | (2E-9 / 6E-6) [m] R. Tesis (LI.Font) | 2E-5 m | Diámetro medio granos del suelo. |
| De_{soil} | $D_0 * E_{soil} * \exp(-6 * m * E_{soil} - 6 * m^{14} * E_{soil})$ R.Tesis (LI.Font) | 2,1085E-6 m ² /s | Coefficiente de difusión efectiva suelo |
| E_{soil} | (0,17 / 0,24) R.M. | 0,2 | Porosidad del suelo |

Tabla 10. Saelices. Parámetros relativos a la solera de hormigón

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|---------------------------|--|------------------------|--|
| ρ_{slab} | V.E. | 2400 kg/m ³ | Densidad del hormigón |
| E_{slab} | (0,12 / 0,27) R.Tesis. | 0,2 | Porosidad del hormigón |
| D_{e_slab} | (7,6E-9 / 3,6E-6) [m ² /s] R.Tesis (LI.Font) | 5E-8 m ² /s | Coefficiente de difusión efectivo del hormigón |
| k_{slab} | (1,4E-16 / 8,7E-16) [m ²] R.Tesis (LI.Font) | 5E-16 m ² | Permeabilidad hormigón |

Tabla 11. Saelices. Parámetros relativos la grava

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|----------------------------|---|--------------------------|--------------------------------------|
| E_{gravel} | V.E. | 0,4 | Porosidad de la grava |
| De_{gravel} | V.E. | 1,8E-6 m ² /s | Coefficiente de difusión de la grava |
| k_{gravel} | $((3,1 \pm 1)E-8 / (2,3 \pm 0,3)E-7)$ [m ²] R.L. (Fuente et al., 2019) | 1,355E-7 m ² | Permeabilidad grava |

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Definición de parámetros para la simulación. Emplazamiento 1. Saelices.

Tabla 12. Saelices. Parámetros relativos muro de sótano (Ladrillo)

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|----------------|--|------------------------|---------------------------------------|
| ρ_{brick} | V.E. | 2000 kg/m ³ | Densidad del ladrillo |
| E_{brick} | (0,24 / 0,26) R.Tesis. (LI.Font) | 0,25 | Porosidad del ladrillo |
| k_{brick} | V.E. | 1E-13 m ² | Permeabilidad ladrillo |
| De_{brick} | (8,4E-8 / 3,4E-7) [m ² /s] R.Tesis (LI.Font) | 2E-7 m ² /s | Coefficiente de difusión del ladrillo |

Tabla 13. Saelices. Simulación junta abierta en solera de contacto entre terreno e interior

| Parámetro | Rango [unidades] | Valor | Descripción |
|-------------|--------------------------|--------------------------|--|
| k_{frac} | (k_{gravel}) V.E. * | 1,355E-7 m ² | Permeabilidad de la junta |
| E_{frac} | (E_{gravel}) V.E. * | 0,4 | Porosidad de la junta |
| De_{frac} | (De_{gravel}) V.E. * | 1,8E-6 m ² /s | Coefficiente de difusión en junta |
| W_{junta} | (0,01) [m] | 0,01 m | Ancho de junta perimetral (estimación inicial) |
| W_{frac} | (0,04) [m] | 0,04 m | Ancho de agujeros con área equivalente igual a la junta perimetral |

Tabla 14. Saelices. Aire y radón

| Parámetro | Valor | Descripción |
|------------------|-------------------------|---------------------------------|
| k_{air} | 7,5E-7 m ² | Permeabilidad del aire |
| t_{RnA} | 10 °C | Temperatura media período A * |
| t_{RnB} | 21 °C | Temperatura media período B * |
| $\rho_{air,RnA}$ | 1,246 kg/m ³ | Densidad aire media período A * |
| $\rho_{air,RnB}$ | 1,204 kg/m ³ | Densidad aire media período B * |
| μ_{RnA} | 1,778E-5 Pa·s | Viscosidad dinámica período A * |
| μ_{RnB} | 1,825E-5 Pa·s | Viscosidad dinámica período B * |

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Definición de parámetros para la simulación. Emplazamiento 2. Valsequillo.

Tabla 15. Valsequillo. Parámetros relativos al Terreno

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|--------------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Fuente | $(A_{Ra-226_soil} * \lambda_{Rn} * f * \rho_{gr_soil} * (1 - E_{soil})) / E_{soil}$ R.L. (Nazaroff et al., 1988) | 0,12432 Bq/(m ³ ·s) | Cálculo de fuente partiendo de concentración de radio en terreno. |
| f_{max} | (0,2 – 0,7) R.L. (Nazaroff et al., 1988) | 0,5 | Coefficiente máximo de emanación |
| f | $f_{max} * (0,2 + 0,8 * (1 - \exp(-q * m)))$ R. Tesis. (Ll.Font) | 0,37942 | Coefficiente emanación corregido |
| A_{Ra-226_soil} | 24.8 [Bq/kg] R.M. | 24,8 Bq/kg | Actividad ²²⁶ Ra |
| D_{e_soil} | $D_0 * E_{soil} * \exp(-6 * m * E_{soil} - 6 * m^2 * (14 * E_{soil}))$ R. Tesis (Ll.Font) | 3,0058E-6 m ² /s | Coefficiente de difusión efectiva suelo |
| E_{soil} | V.E. | 0,3 | Porosidad del suelo |
| k_{soil} | (1 E-12 – 1 E-11) [m ²] R.M. | 5,5 E-12[m ²] | Permeabilidad del suelo |

Tabla 16. Valsequillo. Parámetros relativos la grava

| Parámetro | (Rango / Cálculo) [unidades] | Valor | Descripción |
|---------------------------|---|-------------------------|--|
| E_{gravel} | V.E. | 0,5 | Porosidad de la grava |
| k_{gravel} | $((3,1 \pm 1)E-8 / (2,3 \pm 0,3)E-7 [m^2])$ R.L. (Marta Fuente et al., 2019) | 1.3E-7[m ²] | Permeabilidad grava |
| w_{frac} | (0,05) [m] | 0,05 m | Ancho de agujeros con área equivalente igual a la junta perimetral |

Tabla 17. Valsequillo. Parámetros relativos al aire y al radón.

| Parámetro | Valor | Descripción |
|------------------------|--------------------------|---------------------|
| t | 293.15 K | Temperatura media |
| ρ_{air} | 1.2041 kg/m ³ | Densidad aire media |
| μ_{RnA} | 1.825E-5 Pa·s | Viscosidad dinámica |

Calibración de los códigos en el estado estacionario:

Saelices: Se seleccionaron dos periodos de las series temporales de radón obtenidas. En el periodo A los niveles de radón en el sótano son muy elevados, del orden de 200000 Bq/m^3 mientras que en el periodo B los niveles han sido más bajos, de unos 11000 Bq/m^3 .

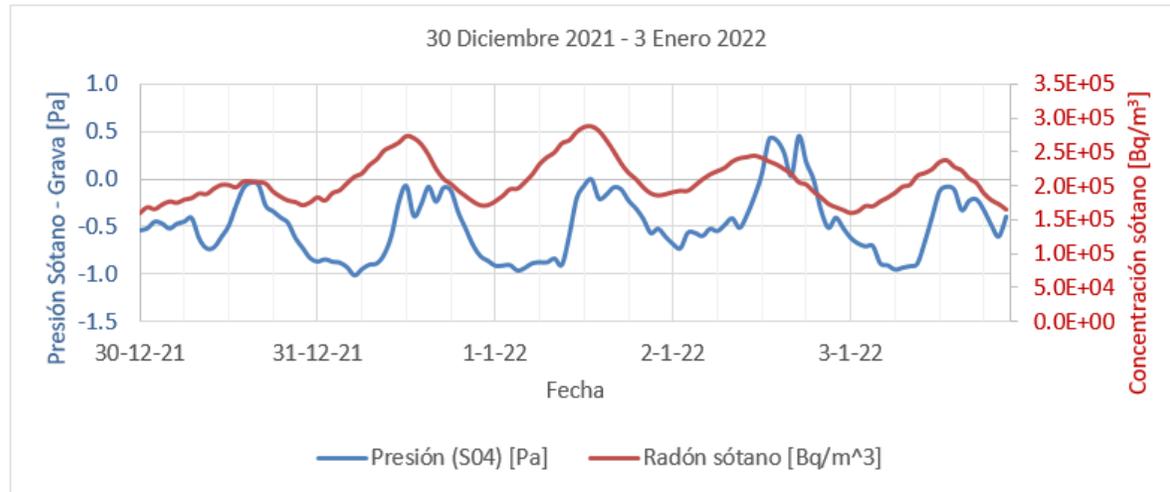
Valsequillo: El periodo 1 corresponde a una situación en que los niveles de radón son elevados debido a la ausencia de los propietarios, mientras que el periodo 2 periodo en el que los niveles de radón han sido bajos debido a un aumento de la ventilación natural por parte de los ocupantes de la vivienda.

Calibración: Se han ajustado los parámetros de los modelos para que reproduzcan razonablemente los valores en estos dos periodos, tanto en el estado estacionario, (considerando los valores medios de los parámetros de entrada), como en el estado dinámico.

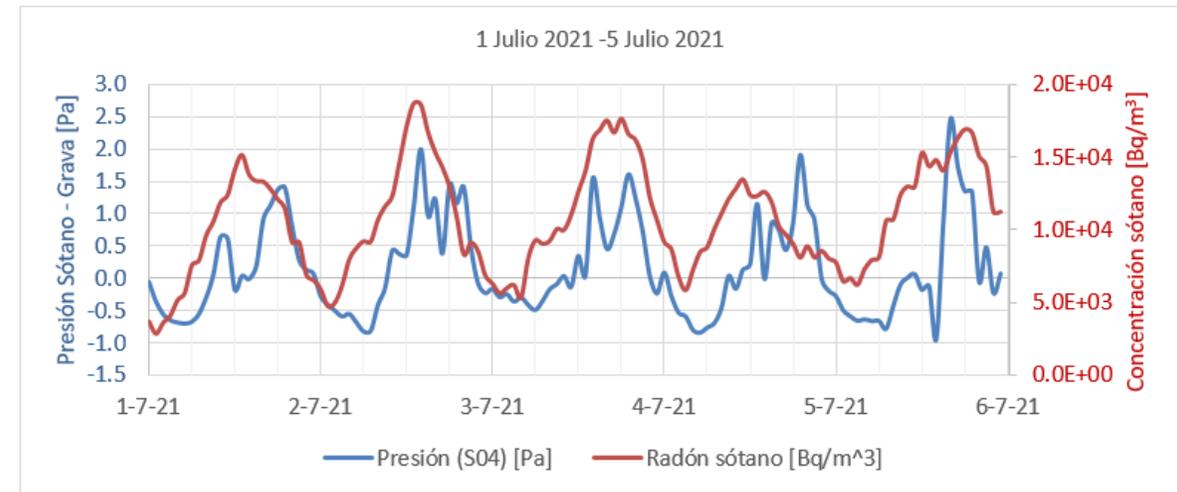
Validación: Una vez ajustados los modelos, los hemos ejecutado en el resto de periodos para comparar con los datos experimentales.

Calibración de los códigos en el estado estacionario:

Periodo A. Alta concentración de radón en sótano: 31 diciembre 2021- 2 enero 2022



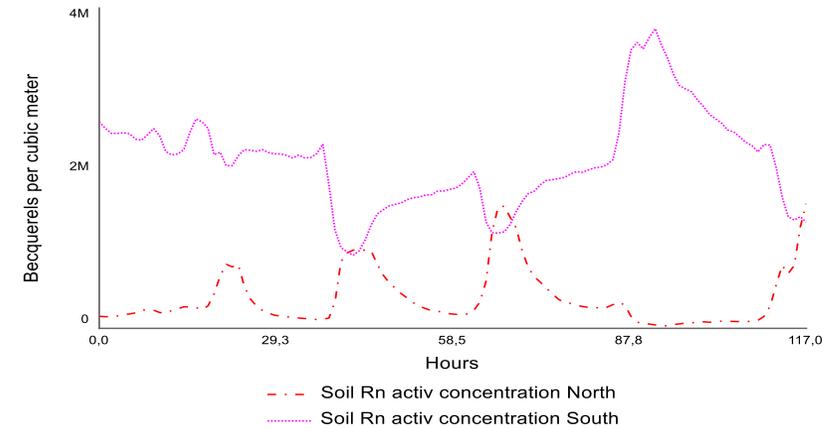
Periodo B. Baja concentración de radón en sótano: 1 Julio 2021 – 5 Julio 2021



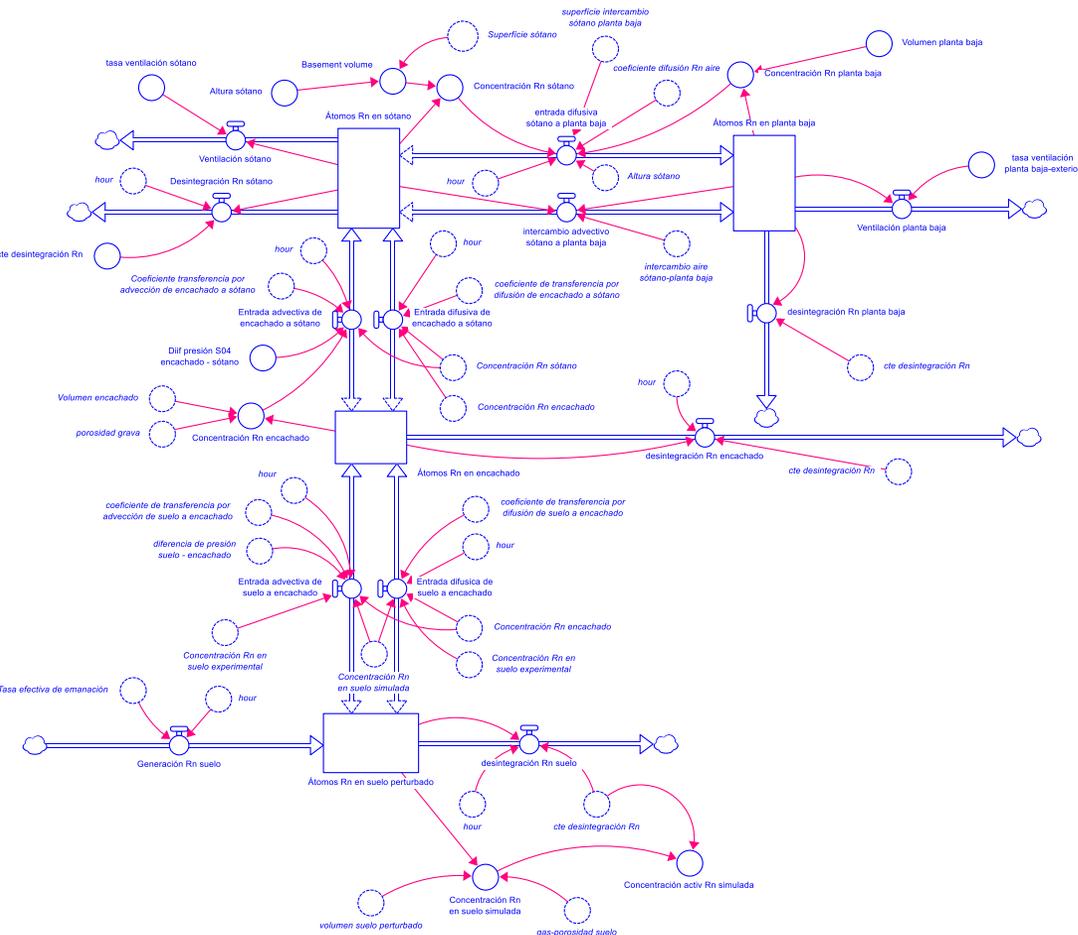
Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de RAGENA

inputs de entrada:

- Los valores de la concentración de radón en el suelo obtenidos con Barasol en dos puntos distintos.



- Los valores experimentales de las diferencias de presión entre distintas zonas
- Los valores de los parámetros meteorológicos.
- Los valores de la caracterización radiológica y geológica del terreno circundante.



WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración RAGENA en estado estacionario

Tabla 19. Resultados del modelo RAGENA calibrado en los dos periodos A y B bajo condiciones estacionarias. FC es el cociente entre el valor experimental y el simulado, es decir, el factor corrector por el que hay que multiplicar el resultado de la simulación para obtener el valor experimental.

| Periodo | Rn Sótano (Bq/m ³) | | | Rn Planta baja (Bq/m ³) | | | Rn suelo (Bq/m ³) | | |
|---------|--------------------------------|--------|------|-------------------------------------|--------|------|-------------------------------|--------|------|
| | Valor exp. | RAGENA | FC | Valor exp. | RAGENA | FC | Valor exp. * | RAGENA | FC |
| A | 2,08E5 | 2,18E5 | 0,95 | 3,0E4 | 2,3E4 | 1,32 | 1,6E6 | 5,1E6 | 0,31 |
| B | 1,07E4 | 1,60E4 | 0,67 | 691 | 865 | 0,80 | 5,3E6 | 5,1E6 | 1,04 |

*Ponderado con un peso del suelo norte del 30% y del suelo sur del 70%

Tabla 18. Resumen de los ajustes para calibrar el modelo RAGENA a los periodos A y B en estado estacionario.

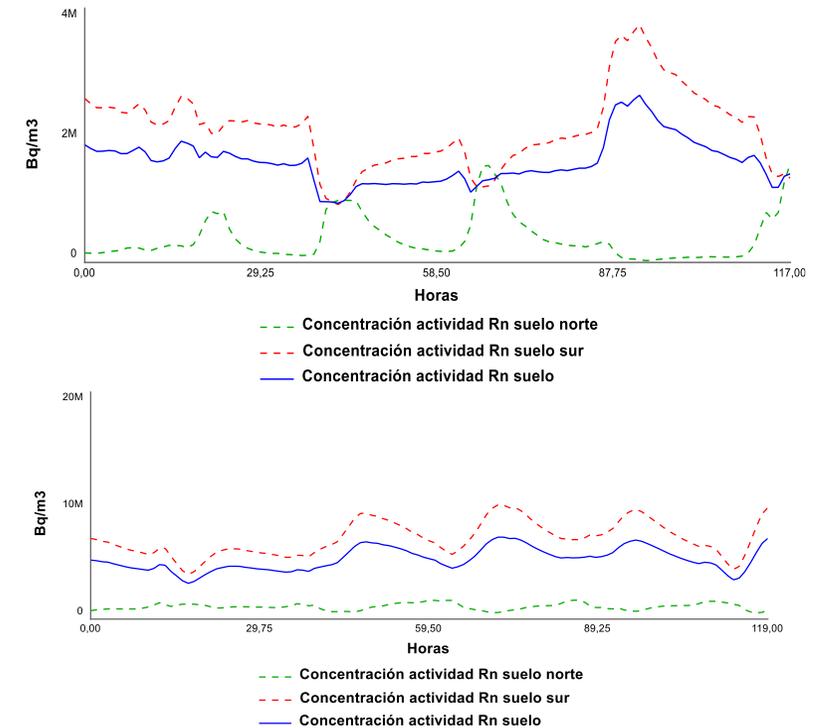
| Parámetro | Valor por defecto | Valor ajustado | Observaciones |
|--|-----------------------------------|-----------------------|---|
| Permeabilidad grava | 1,355E-7 m ² | 1,5E-8 m ² | Ha sido necesario reducir un factor 9 la permeabilidad de la grava. El nuevo valor también es un valor característico de lo que se podría denominar grava limpia. En Nazaroff (1988) el rango para la grava limpia va de 10E-7 a 10E-9. Esta reducción afecta al coeficiente de transferencia por advección del encachado al sótano. El mismo efecto se consigue disminuyendo el mismo factor la superficie abierta del encachado al sótano, o aumentando la distancia entre los dos volúmenes, o cualquier modificación de estos parámetros que conduzca a la disminución del coeficiente de transferencia. |
| Superficie abierta de intercambio entre el sótano y la planta baja | 0,15x0,15 = 0,0225 m ² | 0,083 m ² | Hemos aumentado un factor 3,7 esta superficie. De alguna forma, el modelo parece indicar que la conexión entre el aire del sótano y el de la planta baja es superior a la estimada. |
| Tasa ventilación del sótano al exterior | 0,11 h ⁻¹ | 0,03 h ⁻¹ | Inicialmente habíamos considerado una tasa de ventilación igual para las dos habitaciones del edificio y estimada a partir del ensayo blower door , pero parece también razonable suponer que el sótano tiene una menor ventilación promedio debido a que no hay la puerta que da al exterior y a que está parcialmente bajo rasante. |
| Peso del suelo norte | 0,5 | 0,3 | El ajuste a los datos experimentales ha mejorado si la concentración de radón en el suelo se aproxima más a la del barasol situado en la parte sur. |

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración RAGENA en estado dinámico.

Se obtiene con el código RAGENA introduciendo una variable de entrada como una serie temporal importando directamente los datos experimentales.

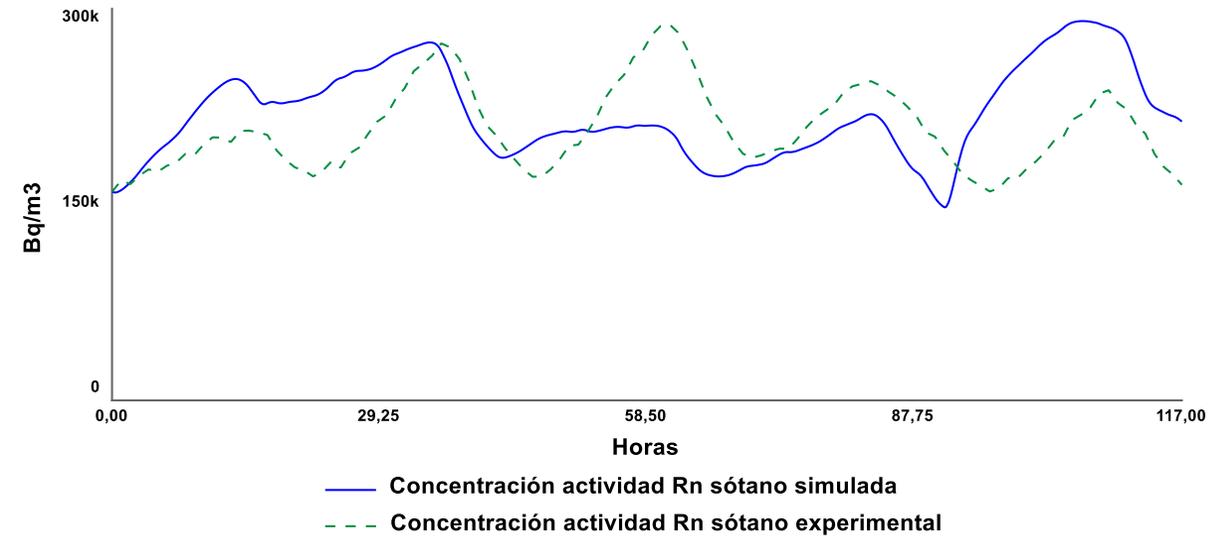
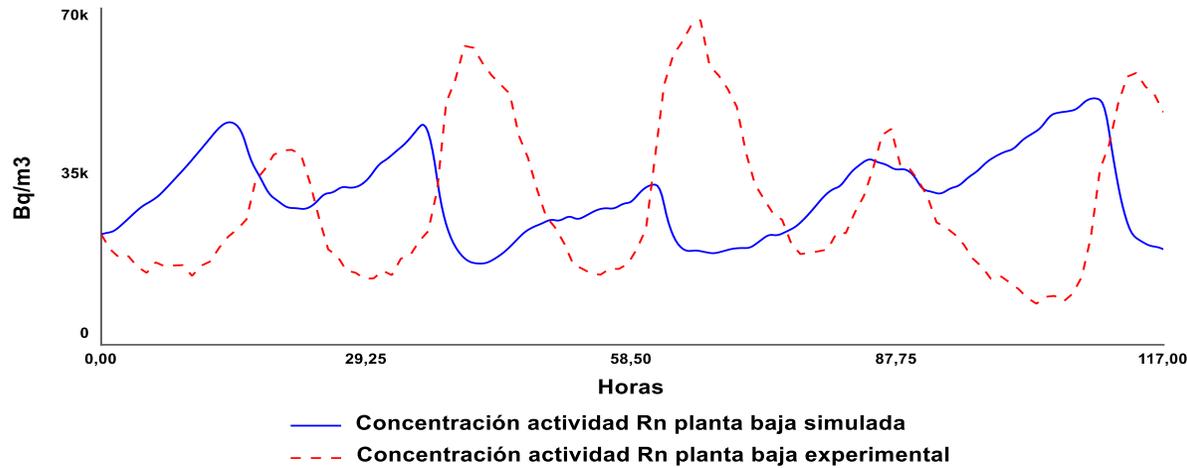
Para cada período A y B, se incluyen las series temporales experimentales de:

- Concentración de radón en el suelo norte
- Concentración de radón en el suelo sur
- Diferencias de presiones medidas con los distintos sensores.



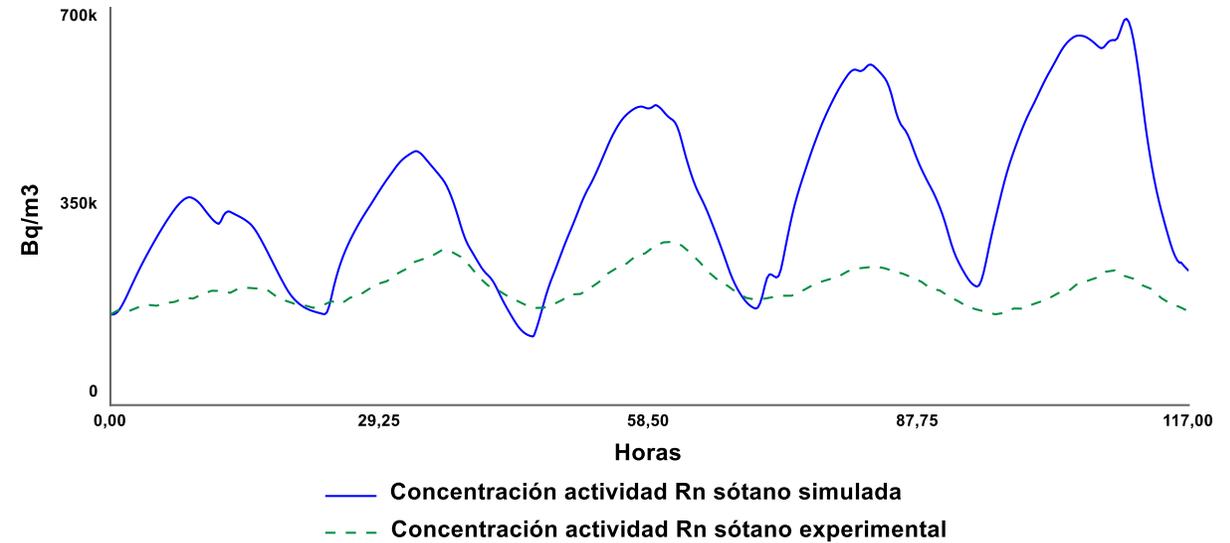
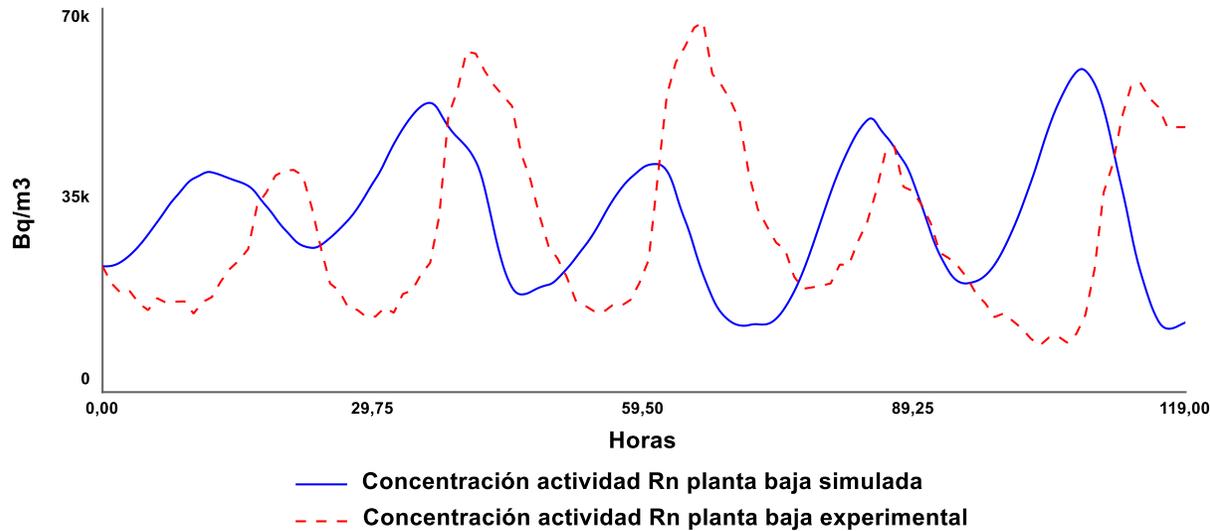
WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración RAGENA en estado dinámico.



WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

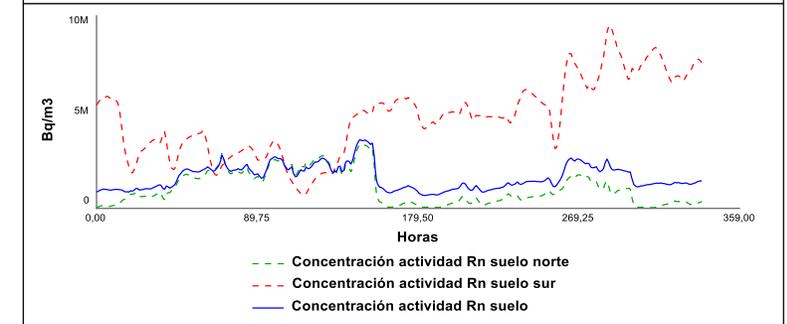
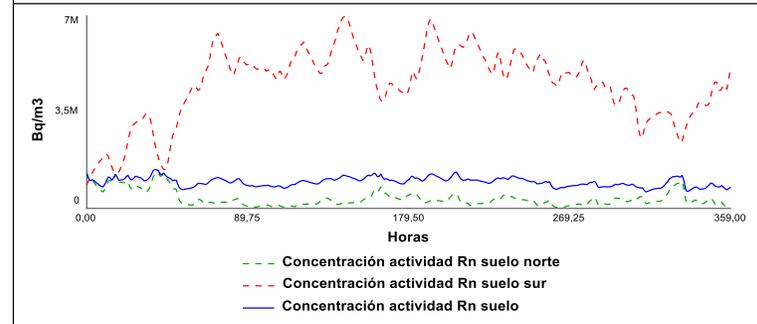
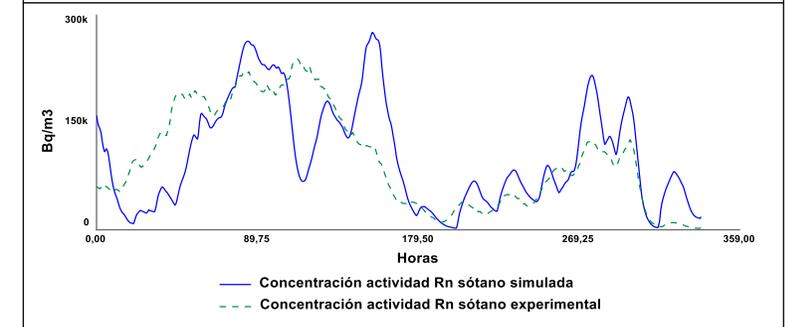
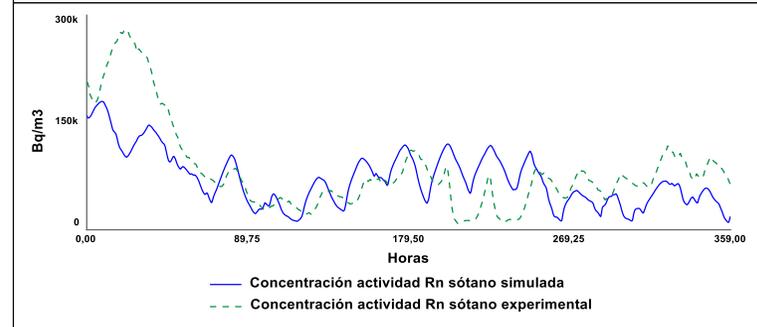
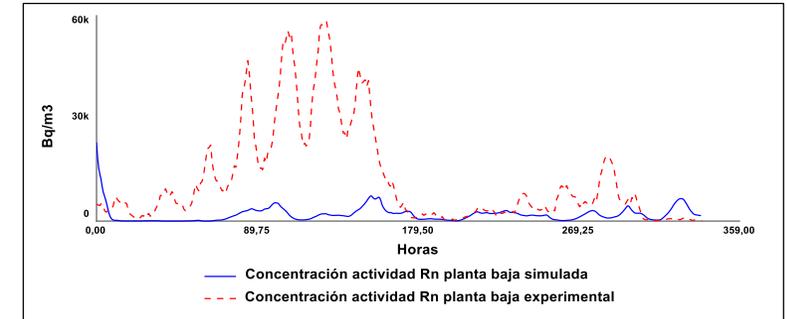
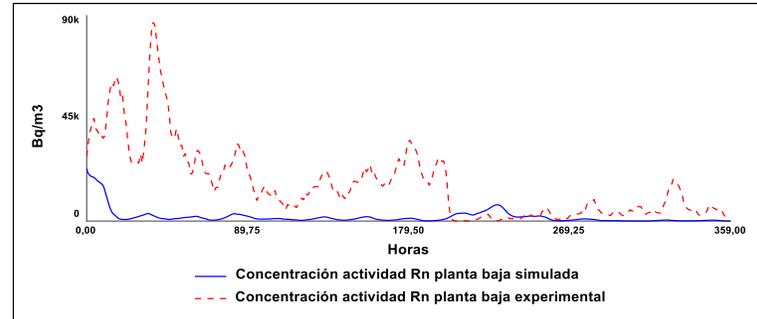
Emplazamiento 1. Saelices. Calibración RAGENA en estado dinámico.



WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

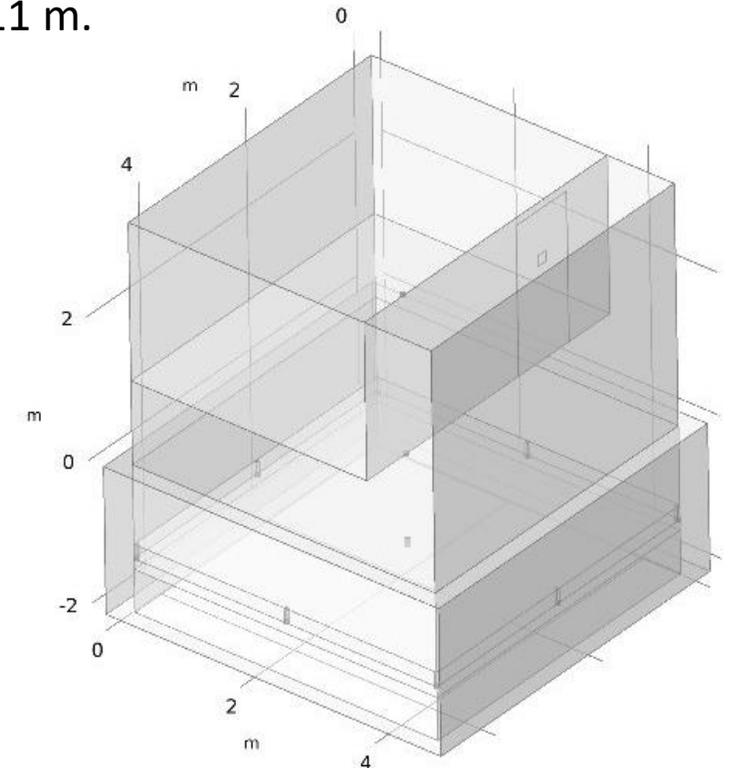
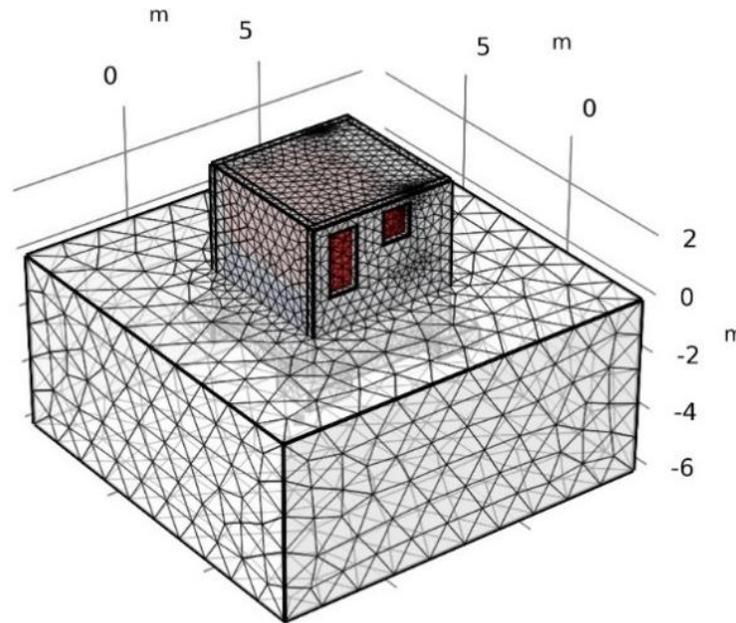
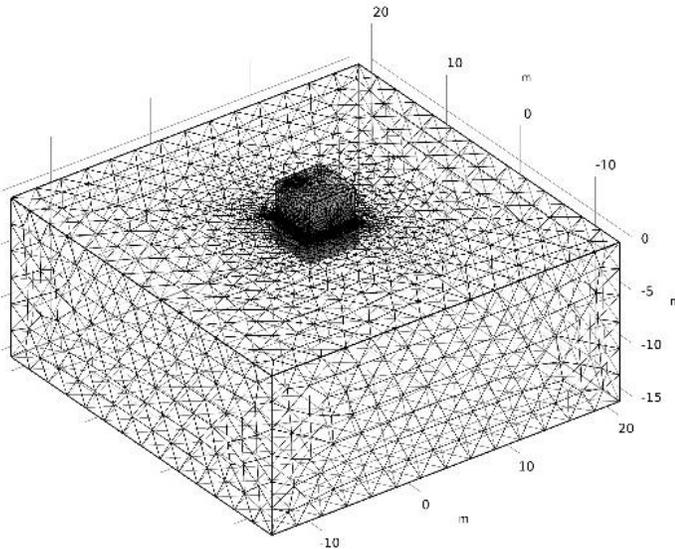
Emplazamiento 1. Saelices. Resultados de RAGENA.

Resultados de la comparación del modelo con los datos experimentales en el sótano y en la planta baja con un peso del suelo norte del 85%.



Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de COMSOL-ITCC

La geometría del modelo reproduce los espacios y sistemas constructivos del edificio. Se compone de un espacio de dimensiones 4,52 x 4,52 x 4,49 m que contiene las dos plantas. Se encuentra insertado en un bloque de material con características de terreno, de tal forma que queda enterrado hasta una cota de -1,11 m.



Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de COMSOL-ITCC

Modelado y aplicación de las físicas del transporte:

- La condición de separación entre ambas plantas reproduce las características y espesores de los materiales, hormigón para forjado y ladrillo para la pared de la escalera.
- Se establece una condición de “no flujo” en el módulo de transporte advectivo y una barrera de difusión delgada con el coeficiente de difusión del hormigón en el forjado y de ladrillo en la pared y espesores de 0,2 y 0,1 m respectivamente.
- La comunicación aérea entre ambas plantas, se modela estimado una abertura cuadrada de 0,15 m x 0,15 m en la puerta, que simula la holgura entre la hoja de la puerta y el cerco a modo de área efectiva equivalente

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de COMSOL-ITCC

Modelado y aplicación de las físicas del transporte:

- Para el terreno se usa un tamaño de bloque de 35 m x 35 m x 15 m con condición de no flujo en paredes. El bloque de terreno es responsable de la generación de radón y de la comunicación aérea con la atmósfera. Su tamaño ha sido determinado mediante estudios paramétricos previos para encontrar el tamaño mínimo (con menor coste computacional), sin comprometer la precisión de los resultados.

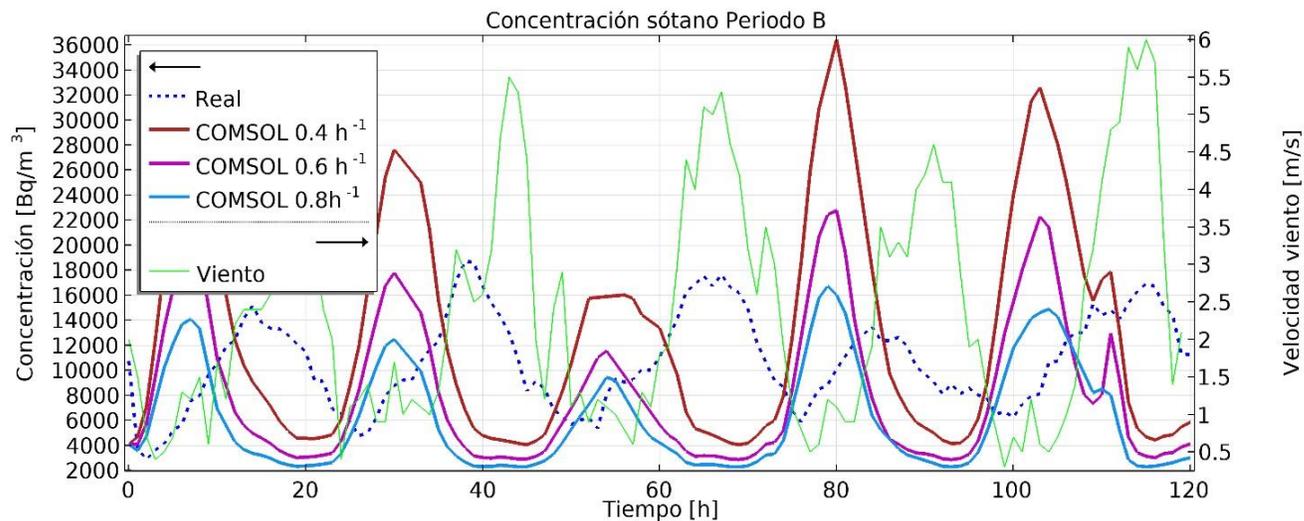
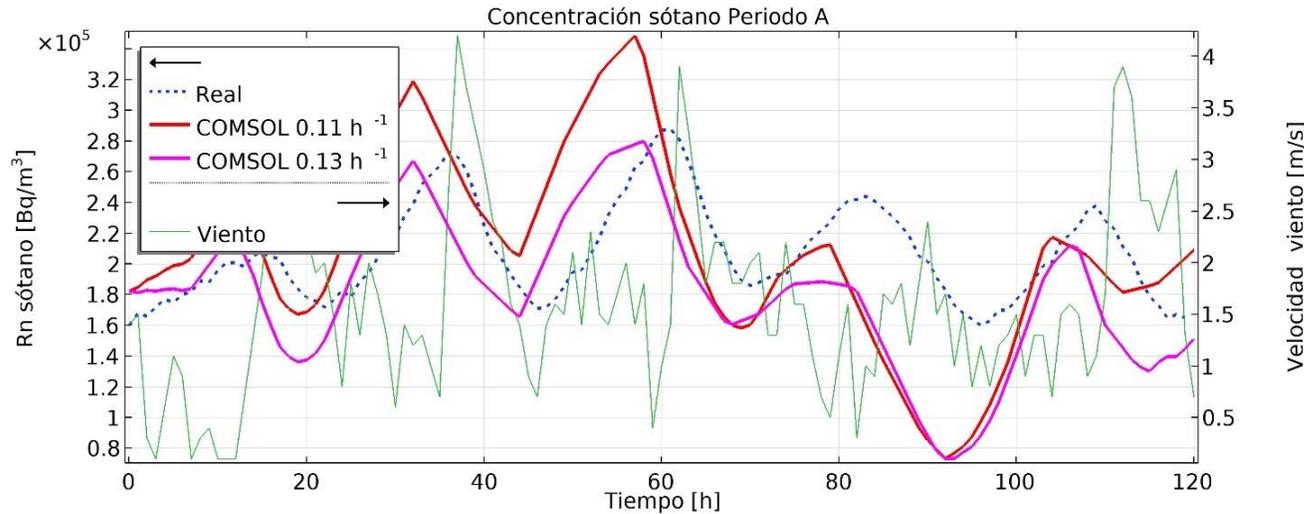
WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de COMSOL-ITCC en estado estacionario

Tabla 21 Resultados de concentración media en terreno y espacios interiores obtenidos mediante el modelo COMSOL estacionario.

| | Rn sótano [Bq/m³] | | | | Terreno | | |
|------------------|-------------------------------------|----------------------|------------|-------|----------------|----------------|---------|
| | Real | Simulación COMSOL | Desviación | % | Real máximo | Real mínimo | COMSOL |
| Periodo A | 2,08 E5 | 1,97E5 | -0,11 E5 | 5,3 % | 5 E5 | 12 E6 | 4,77 E6 |
| Periodo B | 1,07 E4 | 1,06E4 | -0,01E4 | 1 % | | | 4,77 E6 |

Emplazamiento 1. Saelices. Calibración de COMSOL-ITCC en estado dinámico

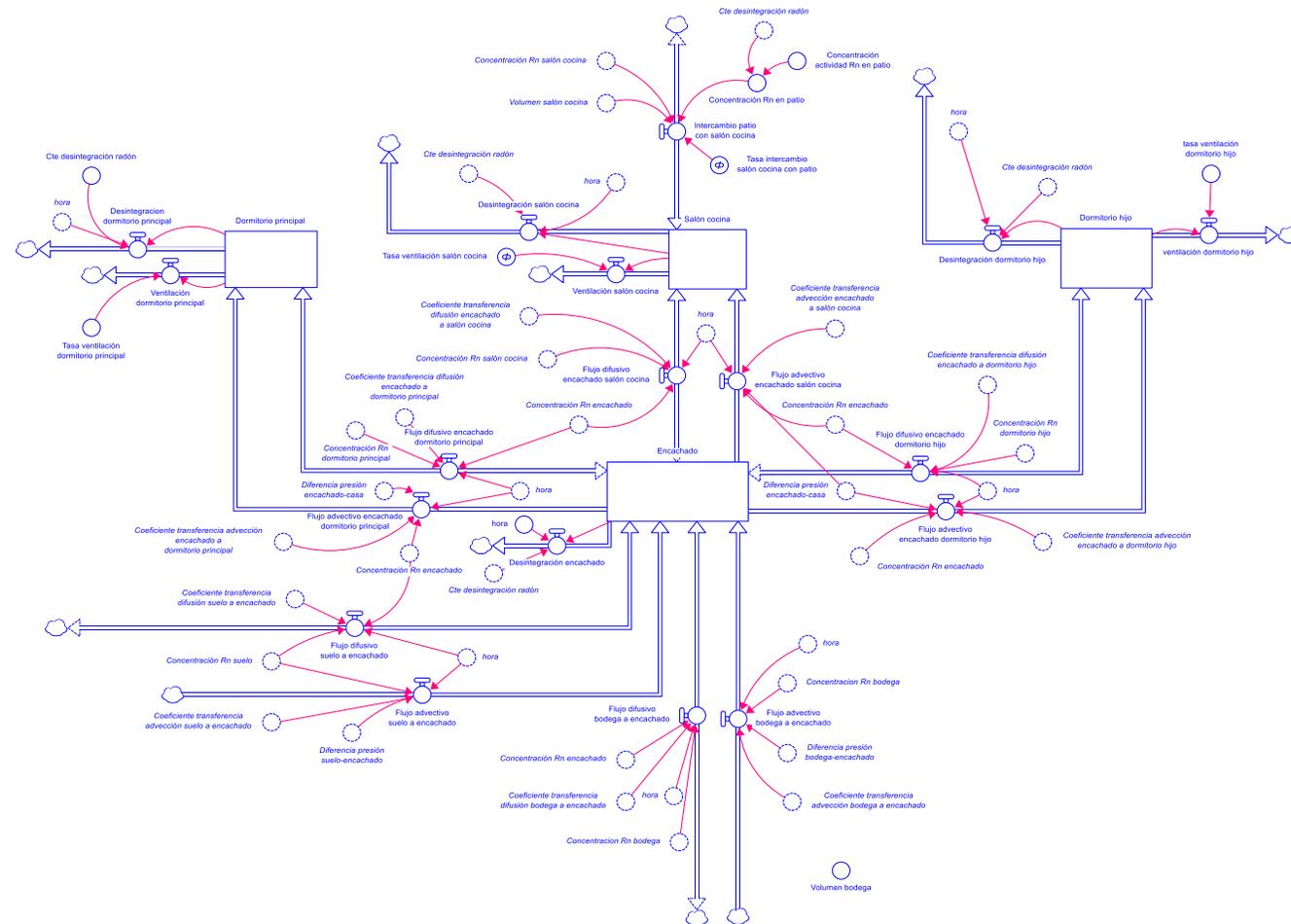


WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de RAGENA

Procesos simulados:

- Entrada al encachado desde la bodega (pozo) y desde el suelo por difusión y advección.
- Entrada a las 3 habitaciones de la vivienda desde el encachado por difusión y advección
- Salida por ventilación desde las 3 habitaciones al exterior.
- En el caso del salón-cocina, hemos dividido la ventilación en dos partes: la ventilación directa al exterior a través de la ventana que da al pasillo externo posterior, y el intercambio de aire con el patio a través de la puerta y de otra ventana.
- Esta distinción nos permite considerar el hecho de que, en ausencia de viento, los niveles de radón en el aire exterior del patio son considerablemente mayores a lo habitual debido a la presencia del pozo.



WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de RAGENA. Estado estacionario

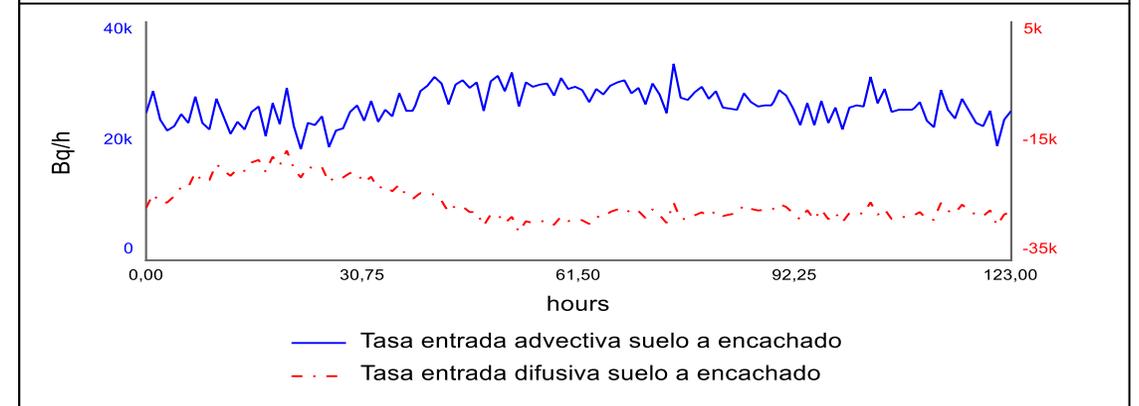
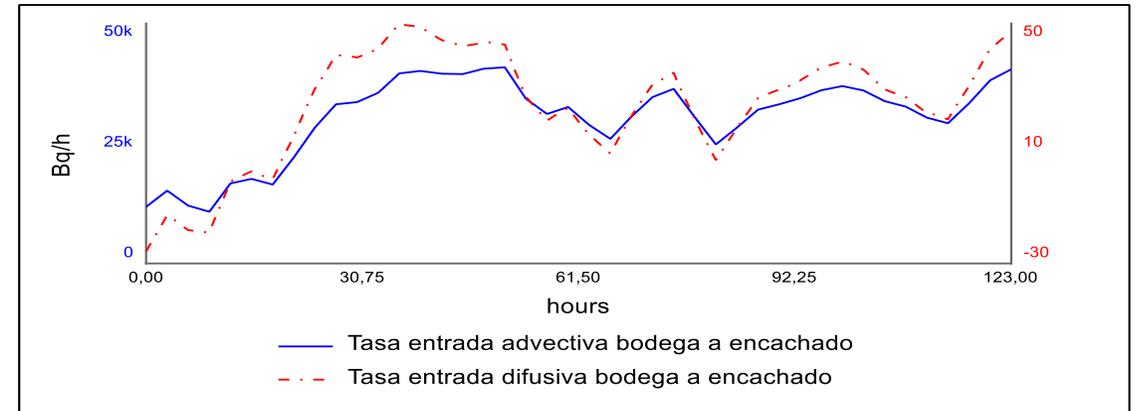
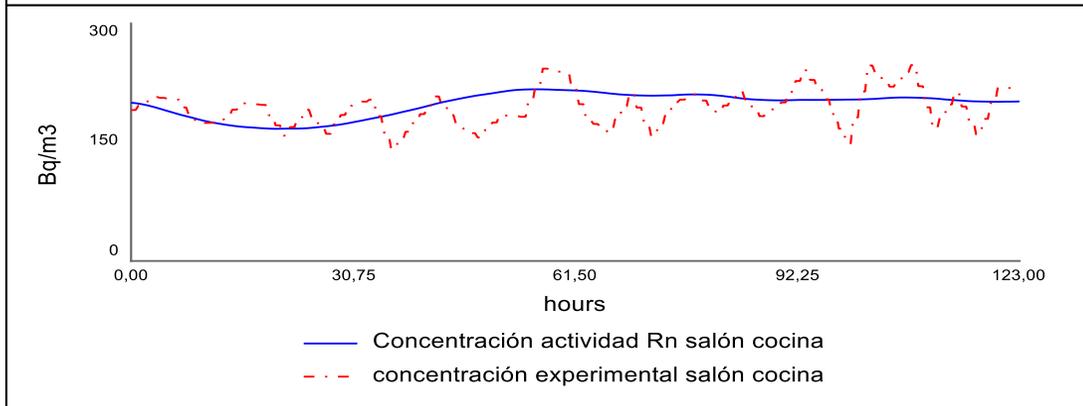
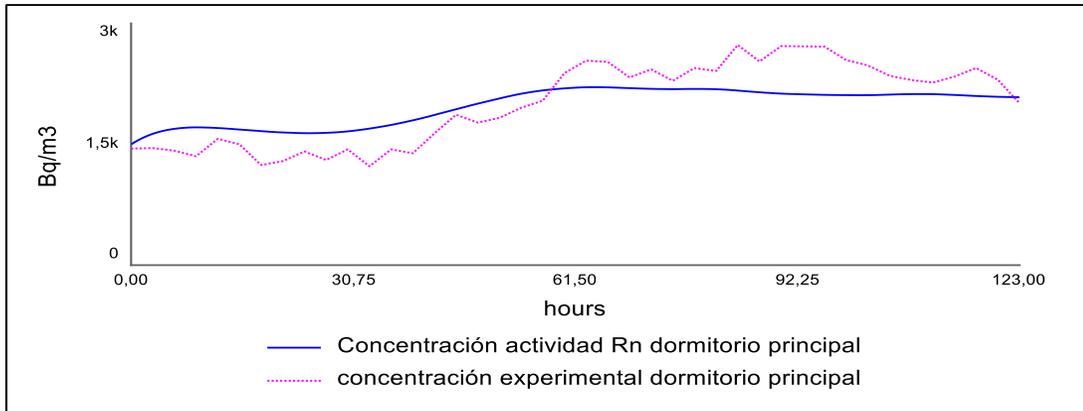
Tabla 22. Comparación de los resultados del modelo RAGENA con los valores experimentales en el estado estacionario para los períodos 1 y 2. Se incluyen también las previsiones para la concentración de radón en el dormitorio del hijo y para el encachado de grava.

| Estancia | PERIODO 1 | | PERIODO 2 | |
|---|--------------------|--------|--------------------|--------|
| | Valor experimental | RAGENA | Valor experimental | RAGENA |
| Rn en el salón-cocina (Bq/m ³) | 194 | 199 | 129 | 128 |
| Rn en dormitorio principal (Bq/m ³) | 2008 | 2040 | 176 | 188 |

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

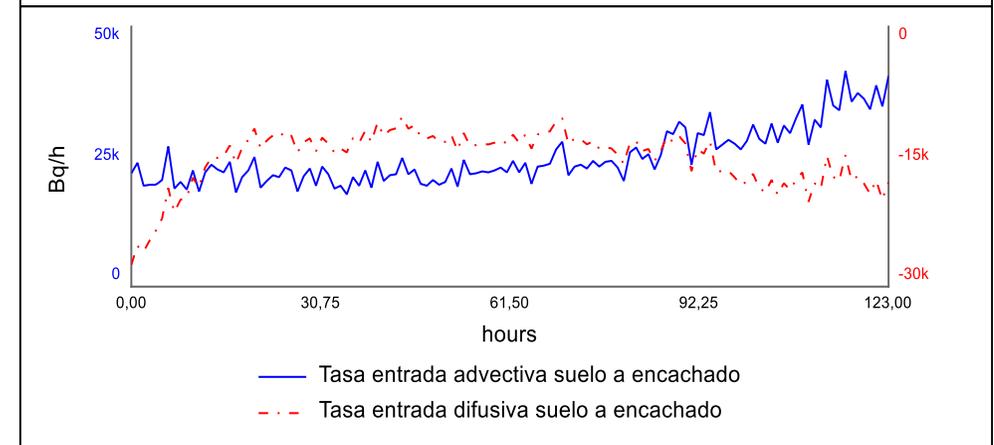
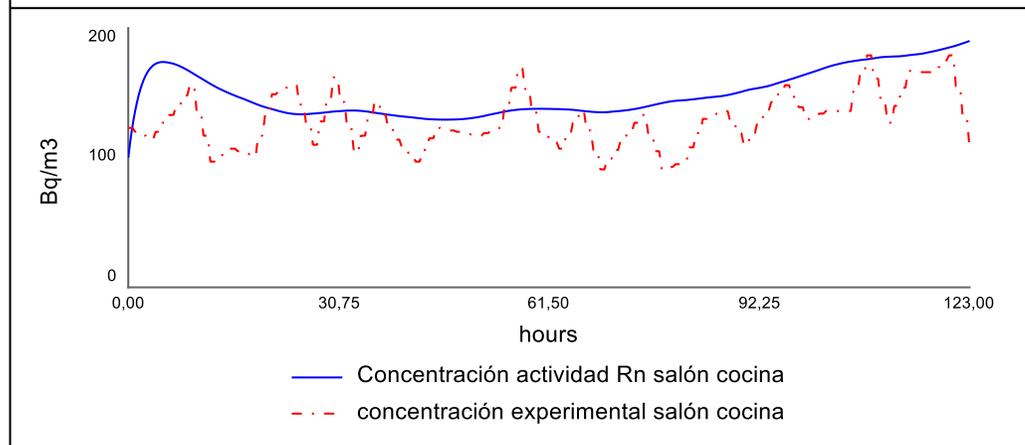
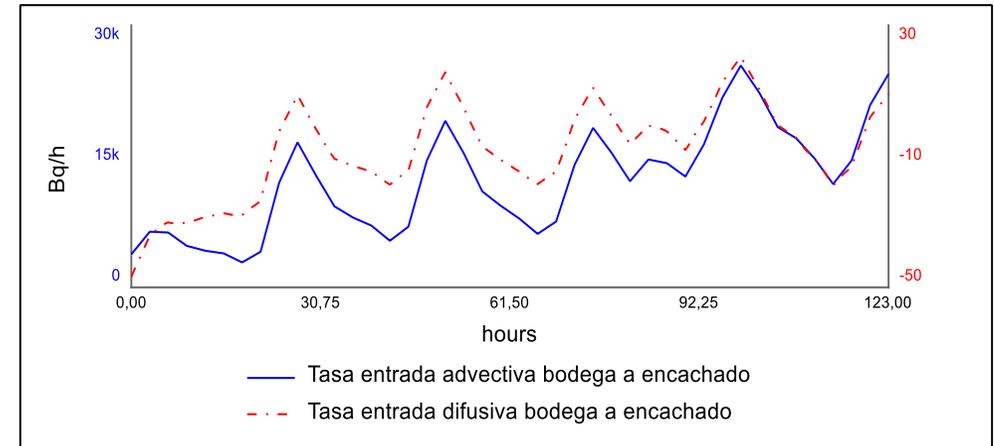
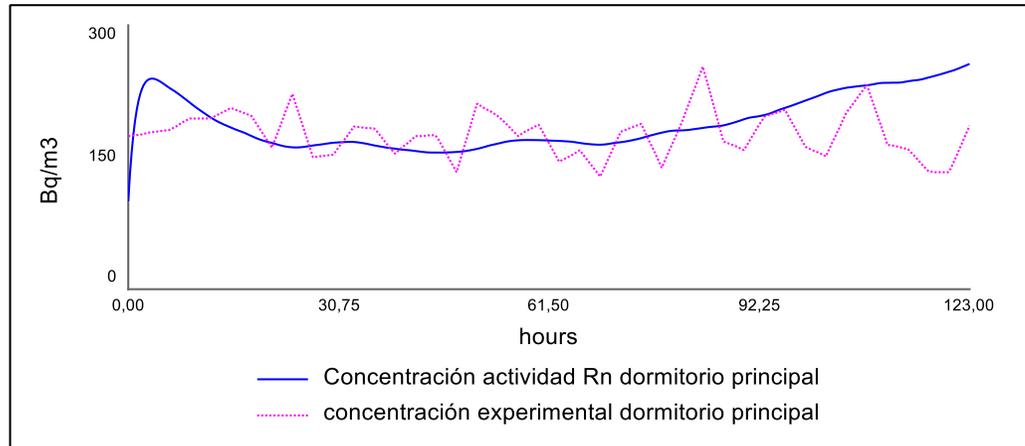
Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de RAGENA. Estado dinámico

Periodo 1



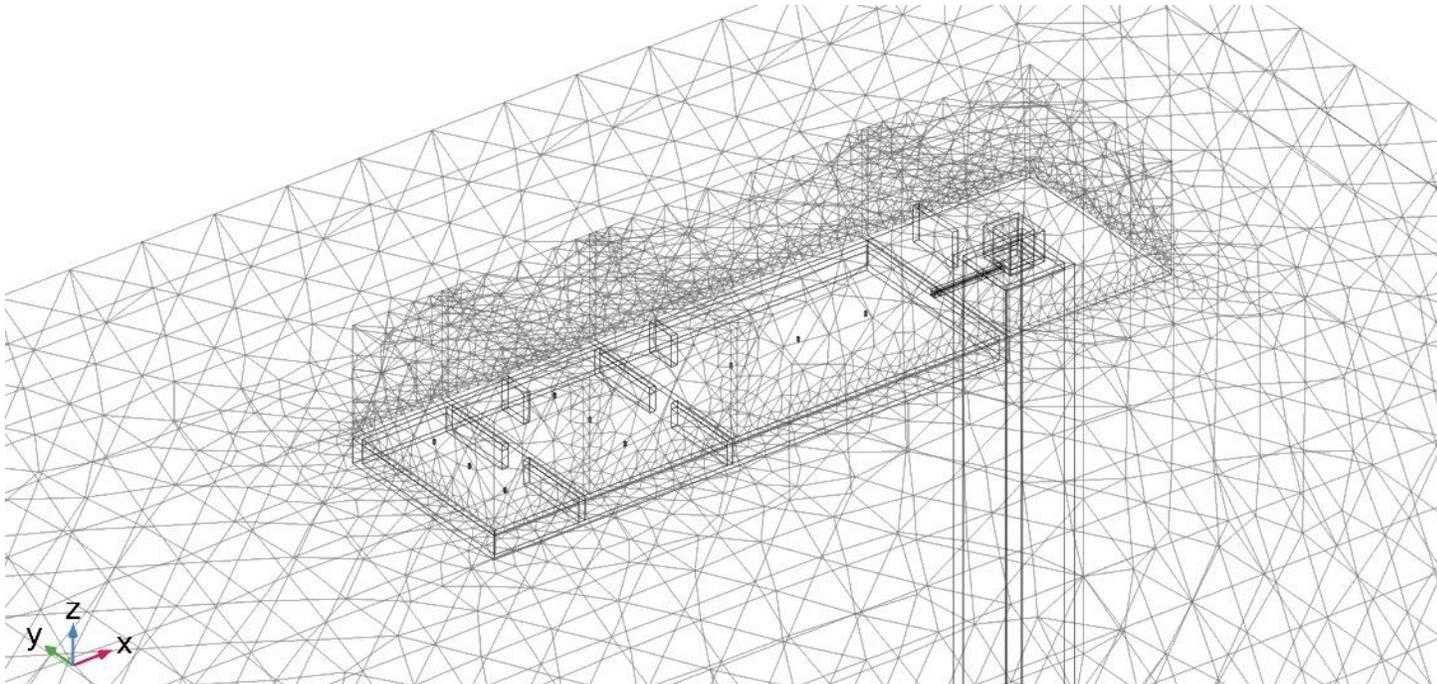
Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de RAGENA. Estado dinámico

Periodo 2



Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de COSOL-ITCC

Se ha simplificado la geometría a un edificio de 3 habitaciones: salón-cocina, habitación intermedia, y dormitorio principal en el extremo del edificio. El modelo contempla únicamente el volumen principal de la vivienda y el Dicho volumen tiene comunicación con el patio a través de una puerta y una ventana.



Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de COSOL-ITCC

Se ha simplificado la geometría a un edificio de 3 habitaciones: salón-cocina, habitación intermedia, y dormitorio principal en el extremo del edificio. El modelo contempla únicamente el volumen principal de la vivienda y el Dicho volumen tiene comunicación con el patio a través de una puerta y una ventana.



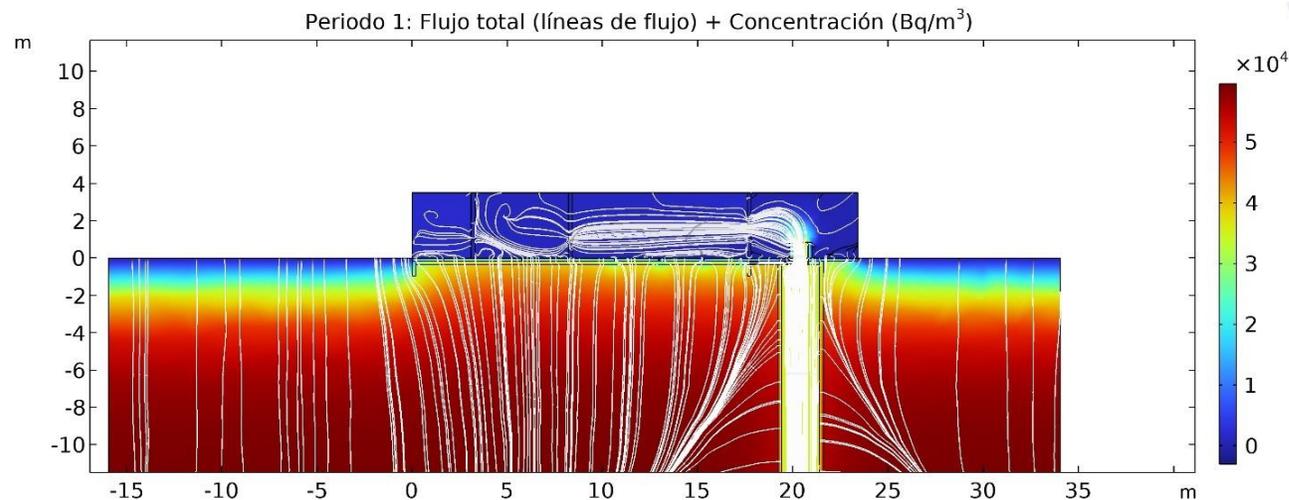
Figura 34. Esquema del modelo y conexiones entre los espacios.

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de COSOL-ITCC

Periodo 1

| Ubicación | Dato registrado | Simulación |
|-------------------|---|--------------------------|
| Bodega | 34871 (12353,5-46814,8) Bq/m ³ | 34099 Bq/m ³ |
| Patio | 60 (2,9-204,1) Bq/m ³ | 181,6 Bq/m ³ |
| Cocina | 194 (141,4-247,5) Bq/m ³ | 555,2 Bq/m ³ |
| Dormitorio | 2008 (1226,2-2731,8) Bq/m ³ | 1934,2 Bq/m ³ |

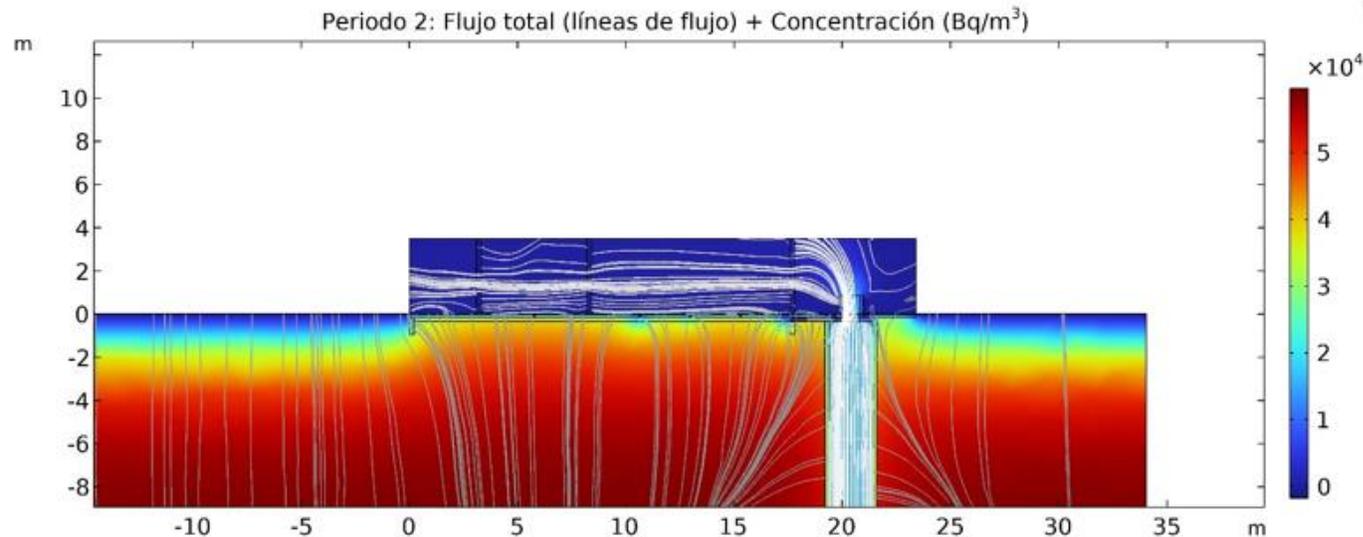


WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 2. Valsequillo. Calibración de COSOL-ITCC

Periodo 2

| Ubicación | Dato registrado | Simulación |
|-------------------|--|-------------------------|
| Bodega | 14020,5 (3276,1-29104,4) Bq/m ³ | 14219 Bq/m ³ |
| Patio | 128,8 (91,0-179,0) Bq/m ³ | 158,1 Bq/m ³ |
| Cocina | 20,1 (0,0-76,4) Bq/m ³ | 186,2 Bq/m ³ |
| Dormitorio | 176,4 (128,2-253,1) Bq/m ³ | 185,0 Bq/m ³ |



Intercomparación de los modelos en una vivienda real (Valsequillo)

Tabla 26. Concentraciones de radón por espacios para el periodo 1. Datos registrados vs. Simulación con COMSOL-IETCC y RAGENA

| Ubicación | Dato registrado | COMSOL-IETCC | RAGENA |
|------------|---|--------------------------|--|
| Bodega | 34871 (12353,5-46814,8) Bq/m ³ | 34099 Bq/m ³ | Se utiliza como dato experimental de entrada |
| Patio | 60 (2,9-204,1) Bq/m ³ | 181,6 Bq/m ³ | No se modela |
| Cocina | 194 (141,4-247,5) Bq/m ³ | 555,2 Bq/m ³ | 199 Bq/m ³ |
| Dormitorio | 2008 (1226,2-2731,8) Bq/m ³ | 1934,2 Bq/m ³ | 2040 Bq/m ³ |

Tabla 27. Concentraciones de radón por espacios para el periodo 2. Datos registrados vs. Simulación con COMSOL-IETCC y RAGENA

| Ubicación | Dato registrado | COMSOL-IETCC | RAGENA |
|------------|--|-------------------------|--|
| Bodega | 14020,5 (3276,1-29104,4) Bq/m ³ | 14219 Bq/m ³ | Se utiliza como dato experimental de entrada |
| Patio | 128,8 (91,0-179,0) Bq/m ³ | 158,1 Bq/m ³ | No se modela |
| Cocina | 20,1 (0,0-76,4) Bq/m ³ | 186,2 Bq/m ³ | 128 Bq/m ³ |
| Dormitorio | 176,4 (128,2-253,1) Bq/m ³ | 185,0 Bq/m ³ | 188 Bq/m ³ |

Emplazamiento 1. Saelices. Simulación de casos de mitigación con COMSOL-ITCC

Se estudia el efecto que podrían distintas acciones de mitigación en las concentraciones interiores.

Mitigación mediante barrera anti radón.

- Colocación de lámina anti-radón en el suelo del sótano del edificio
- Colocación de lámina anti-radón en el suelo y las paredes del sótano.

Mitigación mediante arqueta de despresurización bajo solera

- Arqueta, conservando la solera en su estado original
- Arqueta, sellando las grietas de los agujeros con material con propiedades de hormigón
- Combinación de arqueta + sellado + lámina impermeabilizante en el suelo
- Combinación de arqueta + lámina impermeabilizante en suelo y paredes

WP9 Aplicación de los modelos a la valoración de la efectividad de medidas de mitigación. UAB, IETcc-CSIC.

Emplazamiento 1. Saelices. Simulación de casos de mitigación con COMSOL-ITCC

Tabla 29 Estudio de remediación mediante aplicación de barrera antirradón según CTE.

| | Sin remediación | a) Lámina suelo | b) Lámina suelo + paredes | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------|--|--|
| Concentración sótano | 1,97 E5 Bq/m ³ | 1,92 E5 Bq/m ³ | 1,23 E3 Bq/m ³ | | |
| Reducción % | | 2,54% | 99,37% | | |

| | Sin remediación | a) Solo arqueta | b) Arqueta + sellado | c) Arqueta + sellado + lámina suelo | d) Arqueta + lámina completa |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|--|-------------------------------------|
| Concentración sótano | 1,97 E5 Bq/m ³ | 2.66 E4 Bq/m ³ | 1.88 E4 Bq/m ³ | 8.35 E3 Bq/m ³ | 1.93 E2 Bq/m ³ |
| Reducción % | | 86,5 % | 90,46 % | 95,76 % | 99,90 % |

Emplazamiento 2. Valsequillo. Simulación de casos de mitigación con COMSOL-ITCC

Se estudia el efecto que podrían distintas acciones de mitigación en las concentraciones interiores.

- a) Cierre del pozo
- b) Cierre de la comunicación del encachado del pozo
- c) Sellado de las posibles juntas entre solera y encachado

Emplazamiento 2. Valsequillo. Simulación de casos de mitigación con COMSOL-ITCC

Tabla 28 Resultados de las simulaciones de remediación sobre la vivienda de Valsequillo.

Estado original: Periodo 2- Baja concentración de radón.

| Espacio | Estado original. | a) Cierre pozo | b) Cierre de paso encachado-pozo | c) Sellado juntas de solera |
|----------------------|-------------------------|------------------------|---|------------------------------------|
| Patio | 158,1 Bq/m ³ | 0,54 Bq/m ³ | 163,2 Bq/m ³ | 158 Bq/m ³ |
| Cocina | 186,2 Bq/m ³ | 0,37 Bq/m ³ | 112,9 Bq/m ³ | 186 Bq/m ³ |
| Dormitorio | 185,0 Bq/m ³ | 22,4 Bq/m ³ | 104,0 Bq/m ³ | 183 Bq/m ³ |
| Reducción (%) | | (87,89 %) | (43,78 %) | (10,81 %) |

Conclusiones finales.

- 1 Se comprueba que sí, para un recinto, se especifica la fuente (concentración de radón en el suelo), los parámetros de permeabilidad o difusión de la interface entre el suelo y el espacio interior y la tasa de ventilación, los modelos son capaces de explicar el transporte y acumulación del radón. Con los valores medios proporcionados por los modelos se podría realizar una estimación de máximos con fines de Protección Radiológica.
- 2 El modelo COMSOL-IETCC basado en elementos finitos permite obtener simulaciones con resolución espacial y temporal. Puede realizar estudios detallados de los caminos de entrada de radón y su distribución en los recintos. **Limitaciones:** para poder obtener los resultados con precisión necesita un mallado muy detallado del problema que puede llevar a tiempos de computación excesivamente largos.
- 3 El modelo RAGENA, que se basa en el balance de flujos de entrada-salida en un recinto, tiene la ventaja de su bajo costo computacional y una buena resolución temporal. **Limitaciones:** no tiene resolución espacial y sólo permite calcular parámetros globales de los recintos. Para que el modelo proporcione predicciones adecuadas, es necesario suministrarle datos de los flujos de entrada y salida muy precisos.

Conclusiones finales.

- 1 Los códigos se pueden utilizar para la simulación de la efectividad de las medidas de simulación.
- 2 Un código óptimo de simulación del comportamiento del radón en interiores debería combinar las capacidades de los dos tipos de códigos utilizados. Así, se podría utilizar un código basado en elementos finitos para la determinación precisa, y con resolución espacial y temporal, de los flujos de entrada y salida que necesitan los modelos de cajas, basados en el balance de entrada y salida en un recinto.

¡Muchas gracias por su atención!

Descripción general y resultados principales de RADSIM, un proyecto de investigación para la generación y validación de modelos numéricos para la predicción de la entrada de radón en edificios a partir de una caracterización del terreno y una definición tipológica de la construcción en España

J. G. Rubiano¹, H. Alonso¹, Ll. Font², B. Frutos³, M. García-Talavera⁴, P. Martel¹, V. Moreno², L. Quindós⁵, C. Sainz⁵, J.T. Santana^{1,6}, D. Rábago⁵, I. Sicilia³, A. Tejera¹.

¹ *Dpto. de Física. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Spain*

² *Departament de Física. Universitat Autònoma de Barcelona. Spain*

³ *Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Spain*

⁴ *Consejo de Seguridad Nuclear. Spain.*

⁵ *Grupo Radón. Universidad de Cantabria. Spain.*

⁶ *Servicio de Laboratorios y Calidad de la Construcción del Gobierno de Canarias. Spain.*

Canfranc. 11-13 de octubre 2024

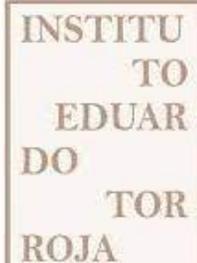


UAB

Universitat Autònoma de Barcelona



Laboratorio de Radiactividad Ambiental



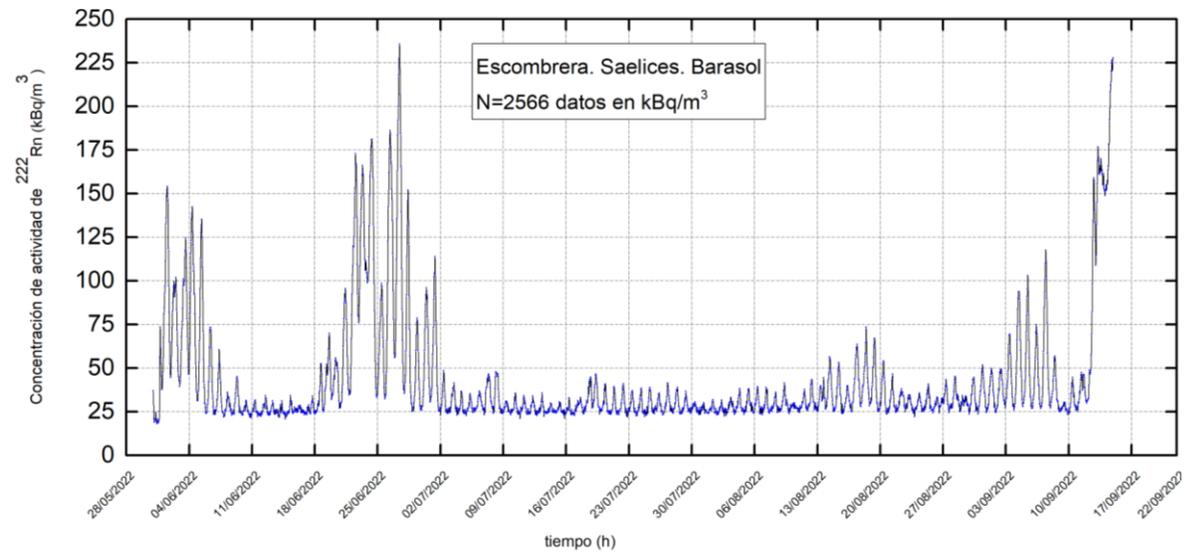
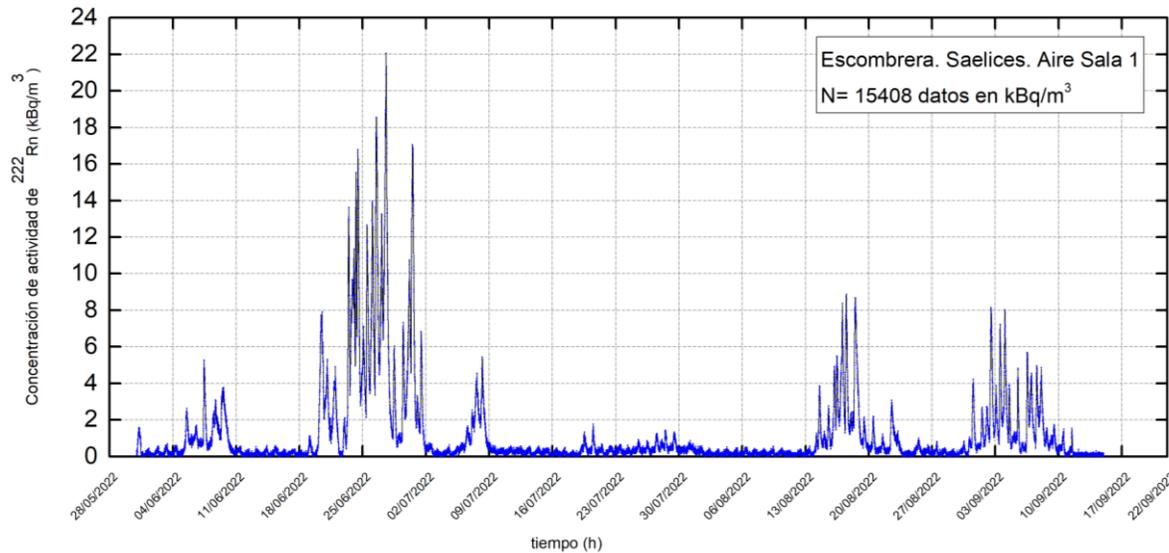
WP6 Monitorización de los terrenos circundantes a la escombrera del emplazamiento de Saelices. UC.

Emplazamiento 1. Saelices.

Objetivo: caracterizar el caso de un terreno contaminado que en el que se han realizado acciones de remedio

Monitorización del terreno durante 6 meses con un equipo Barasol. Serie de 6 meses.

Datos de concentración de radón indoor y outdoor. Monitorización en continuo.



WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Definición de parámetros para la simulación. Emplazamiento 2. Valsequillo.

Tasas de ventilación de los espacios según escenarios de simulación (dato estimado):

- Patio: 200 h^{-1} . Se trata de un espacio abierto por su parte superior.
- Cocina con ventana y puerta abierta: 15 h^{-1}
- Cocina con apertura esporádica de puerta y ventana: 5 h^{-1}
- Dormitorios abiertos: 4 h^{-1}
- Dormitorios cerrados: $0,015 \text{ h}^{-1}$

Los modelos plantean la siguiente hipótesis de comunicación entre ambientes:

- Terreno-Vivienda: A través de la solera y sus juntas.
- Pozo-Patio: Comunicación aérea directa con flujo ascendente.
- Patio-Cocina: Comunicación a través de puerta y ventana abierta.
- Cocina-Habitaciones-Dormitorio: A través de pasos de puertas interiores.

WP7 Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos. UAB, IETcc-CSIC.

Definición de parámetros para la simulación. Emplazamiento 2. Valsequillo.

- Concentración de radón en terreno a un metro de profundidad (dato medido): 23800 Bq/m³
- Contenido de radio (dato medido): 24,8 Bq/kg (18,94 ± 1,12 – 32,87 ± 1,66)
- Concentración de radón en la bodega en periodo 1, con la vivienda deshabitada (dato medido): 34871 Bq/m³ (12353,5-46814,8) Bq/m³
- Concentración de radón en la bodega en periodo 2, con la vivienda habitada y ventilada (dato medido): 14020,5 Bq/m³ (3276,1-29104,4) Bq/m³
- Concentración en el exterior: 0 Bq/m³
- Velocidad de salida de aire desde el pozo (dato medido): 0,19 m/s (0 – 0,76)
- Presiones de los espacios con respecto al terreno (dato estimado):
- Patio y terreno exterior: 0 Pa
- Cocina con ventana y puerta abierta: -0,5 Pa
- Cocina con apertura esporádica de puerta y ventana: -0,5 Pa
- Dormitorio abierto: - 3 Pa
- Dormitorio cerrado: -10 Pa

Para obtener una calibración inicial de los modelos e intercompararlos, en condiciones de laboratorio se realizó un experimento de exhalación de radón a través de una losa de hormigón por parte del equipo de la ULPGC.

Para llevarlo a cabo se construyó una losa de geometría rectangular situada en una caja hermética de metacrilato sobre una muestra de suelo cuya concentración de ^{226}Ra y otros parámetros físicos (porosidad, composición, etc..) se determinaron experimentalmente.

Caso 1: Caja de acumulación con base de grava fonolítica sin losa.

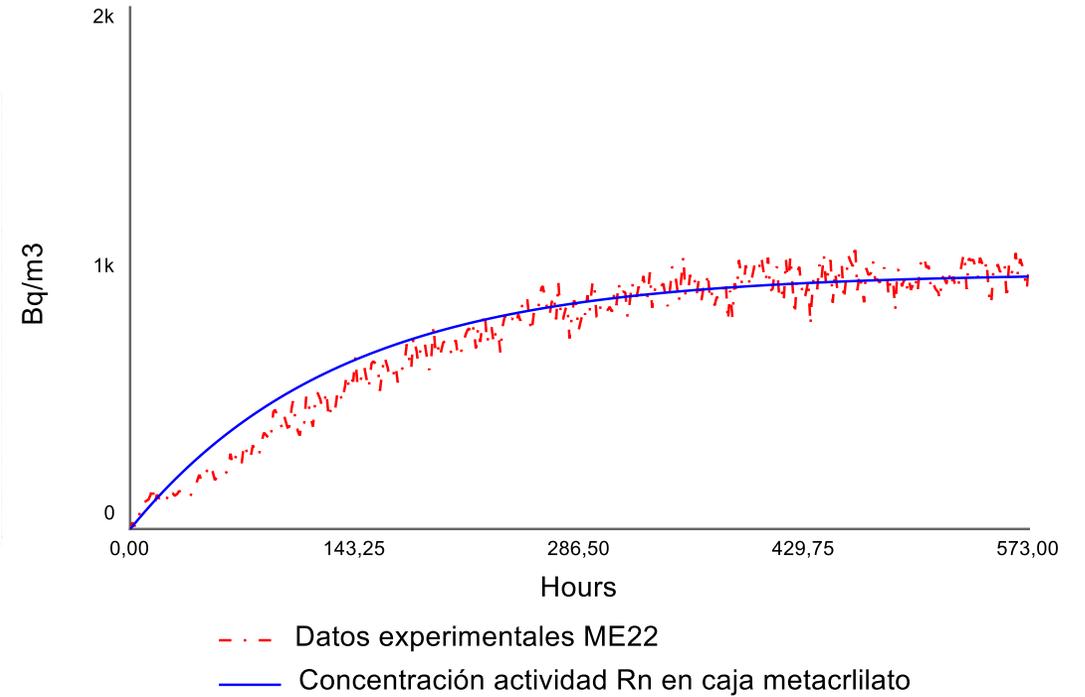
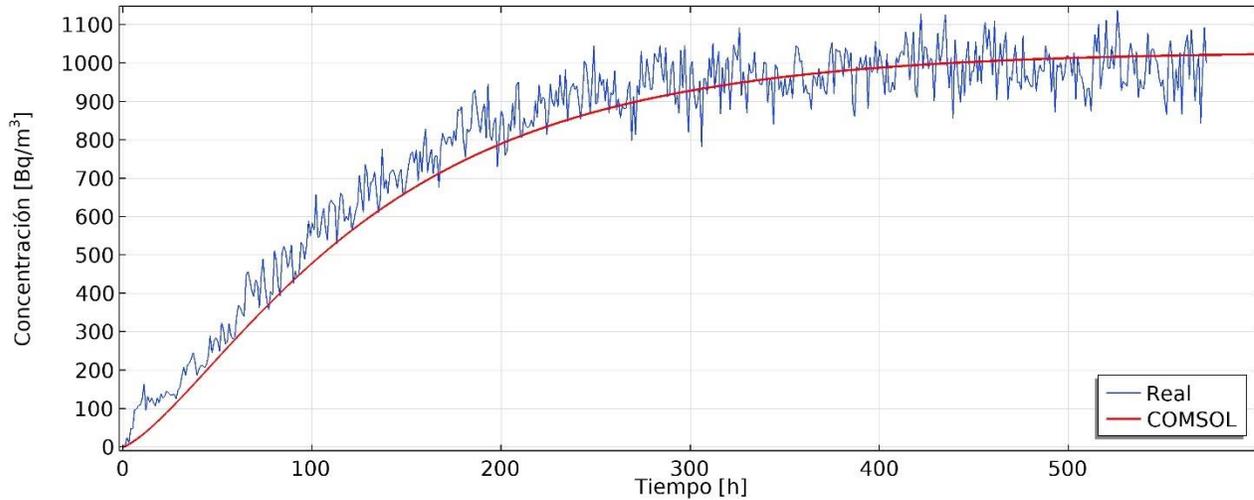
Caso 2: Caja de acumulación con losa sin la grava fonolítica.

Caso 3: Caja de acumulación con losa sobre la grava fonolítica. Sin sellado perimetral entre losa y urna.

Caso 4: Urna con losa sobre la grava fonolítica. Con sellado perimetral entre losa y urna.



WP8: Validación de los modelos de simulación. UAB, IETcc-CSIC



Cronograma

| Paquetes de trabajo (WP) | Primer año | | | | | | | | | | | | Segundo año | | | | | | | | | | | | Tercer año | | | | | | | | | | | | |
|---|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|-------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|--|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | |
| WP1: Selección de los casos de estudio para la validación de los modelos. | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WP2: Caracterización tipológica sobre las características constructivas de los emplazamientos seleccionados. | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| WP3: Caracterización radiológica de los espacios interiores y del terreno de asiento. | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| WP4: Caracterización de la permeabilidad al gas del terreno de asiento en los casos de estudio. | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| WP5: Monitorización en continuo de $\Delta P_{interior/exterior}$, T y $P_{atmof.}$ durante 6 meses en cada emplazamiento (en Canarias se realizará si es posible) | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | |
| WP6: Monitorización de los terrenos circundantes a la escombrera del emplazamiento de Saelices para caracterizar el caso de un terreno contaminado que en el que se han realizado acciones de remedio. | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | |
| WP7: Desarrollo de los modelos de simulación de los niveles de radón en recintos cerrados, adaptados a los emplazamientos | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | |
| WP8: Validación de los modelos de simulación. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | |
| WP9: Aplicación de los modelos a la valoración de la efectividad de medidas de mitigación. | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | |
| WP10: Coordinación e informes (ULPGC) | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | |