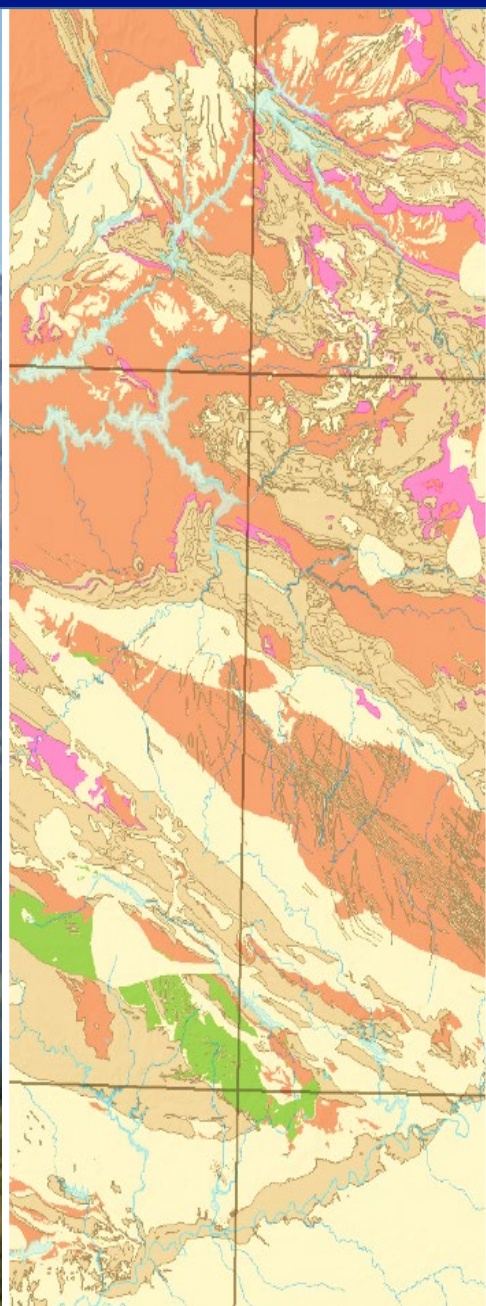


Cartografía del potencial de radón de España

CSN



**Colección
Informes Técnicos
51.2019**

Cartografía del potencial de radón de España

Autores: Marta García-Talavera San Miguel
Francisco Javier López Acevedo

Colección
Informes Técnicos
51.2019



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04.41

Agradecemos a las Áreas de Evaluación de Impacto Radiológico Ambiental y de Coordinación de Operaciones de Emergencia del CSN la información proporcionada. Asimismo, agradecemos la colaboración de las instituciones y laboratorios citados en este documento, y de las personas que desarrollan en ellos su labor, gracias a las cuales se dispone de los resultados publicados en este informe.

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

Depósito legal: M-24725-2019

Impreso en papel



Índice de figuras	5
Índice de tablas	7
Preámbulo	9
1. Introducción	11
2. Marco regulador	13
3. Campañas de medida de radón en viviendas.....	14
4. Definición de zonas de actuación prioritaria.....	19
5. Metodología para identificar las zonas de actuación prioritaria.....	23
5.1. Criterio estadístico de decisión	24
5.2. Península y Baleares	24
5.3. Islas Canarias	29
5.4. Ciudades autónomas	30
6. El mapa de potencial de radón de España	33
7. Mapas de zonificación por municipio	37
7.1. Zonificación por densidad de población	38
7.2. Zonificación por tejido urbano	39
8. Conclusiones	41
9. Agradecimientos	43
10. Referencias.....	45
Anexo. Mapas de potencial de radón por comunidad autónoma.....	49
Andalucía	50
Aragón	51
Principado de Asturias	52

Illes Balears	53	Galicia	61
Canarias	54	Comunidad de Madrid	62
Cantabria	55	Región de Murcia	63
Castilla-La Mancha	56	Comunidad Foral de Navarra	64
Castilla y León	57	País Vasco	65
Cataluña	58	La Rioja	66
Comunidad Valenciana	59	Ciudad autónoma de Ceuta	67
Extremadura	60	Ciudad autónoma de Melilla	68

Figura 1. Vías de entrada del radón al aire interior de una vivienda	12
Figura 2. Las cuevas turísticas son uno de los sectores sujetos al cumplimiento del RPSRI y de la Instrucción IS-33 del CSN	14
Figura 3. Cuadríptico de la Cartografía del potencial de radón de España (CSN, 2017) ..	21
Figura 4. Zonas de categoría 0, 1 y 2 para el territorio peninsular. Correspondientes a niveles de exposición a la radiación gamma < 7,5 microR/h, 7,5–14 microR/h y > 14 microR/h	25
Figura 5. Diagrama de cajas del logaritmo natural de las medidas geométricas de radón para los municipios correspondientes a los siguientes rangos de radiación gamma: 0) < 66 nGy/h; 1) 66–123 nGy/h; 2) < 123 nGy/h	26
Figura 6. (a) Mapa de correspondencias; (b) Gráfico de barras que representa la asociación entre R_γ y mg	27
Figura 7. Paisaje granítico de la sierra de Guadarrama (Comunidad de Madrid)	28
Figura 8. Depósitos sedimentarios del cuaternario en las Bardenas Reales (Navarra)	28
Figura 9. Vista de Villar de la Yegua (Salamanca), población asentada en materiales correspondientes a la unidad litoestratigráfica 43	29
Figura 10. Unidad 43 (según Mapa Litoestratigráfico del IGME). El conjunto montañoso marcado en marrón se clasifica como una unidad litoestratigráfica independiente	29
Figura 11. Resultados de las medidas de radón en viviendas de El Hierro, La Gomera y La Palma (izquierda) y de Fuerteventura y Lanzarote (derecha)	30

Figura 12. Diagrama TAS. Fuente: sandatlas.org.....	30	Figura 18. Mapa de municipios en los que más de un 75% de la población reside en zonas de actuación prioritaria (destacados en color caoba). En color beis, los municipios con población residente en zonas de actuación prioritaria	38
Figura 13. Mapas radiométricos de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla (valores expresados en tasa de exposición) ..	31	Figura 19. Distribución por población de los municipios en los que más de un 75% de los habitantes reside en zonas de actuación prioritaria	39
Figura 14. Mapa de potencial de radón de España, definido como la concentración de radón que superan (en planta baja o primera) el 10% de los edificios más expuestos de la zona	34	Figura 20. Detalle del tejido urbano de CartoCiudad, a escala 1:2.500, superpuesto al mapa base de imagen aérea (© ESRI). La sede principal del CSN aparece marcada en azul.....	39
Figura 15. Mapa de zonas de actuación prioritaria.....	35	Figura 21. Clasificación por municipio establecida en el Documento Básico HS Salubridad – Sección HS 6, “Protección frente a la exposición al radón” (apéndice C).....	40
Figura 16. Celdas con datos censales de la península ibérica (ETRS89 30N)	38		
Figura 17. Celdas con datos censales en las islas Canarias (ETRS89 28N)	38		

Índice de tablas

Tabla 1. Mortalidad acumulada (%) antes de los 75 años por exposición al radón. Tomada de Darby et ál. (2005)	12
Tabla 2. Criterios para definir zonas de actuación prioritaria en distintos países de la UE. Adaptada de Bossew (2017)	20
Tabla 3. Media aritmética de concentración de radón para las unidades de potencial de radón cartografiadas	34

El radón (^{222}Rn) representa la principal causa de exposición de la población a las radiaciones ionizantes. La directiva 2013/59/Euratom supone un hito en su regulación. En ella, la Comisión Europea requiere a los Estados miembro que pongan en marcha planes nacionales de actuación, con el fin último de reducir el número de cánceres en la población debidos a la exposición a este gas radiactivo.

Una herramienta fundamental para diseñar estrategias de protección radiológica eficaces contra el radón es cartografiar las zonas geográficas más expuestas. La cartografía del potencial de radón de España, desarrollada por el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN), categoriza las zonas del territorio estatal en función de sus niveles de radón y, en particular, identifica aquellas en las que un porcentaje significativo de los edificios residenciales presenta concentraciones superiores a 300 Bq/m^3 . Este es el nivel de referencia que establece el *Reglamento de protección de la salud contra los peligros derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes* (RPSRI).

La cartografía que se presenta en esta publicación recoge la mejor información disponible actualmente en España sobre niveles de radón en viviendas. La versión actual del Mapa de Potencial de Radón integra las más de 12.000 medidas de radón en viviendas recopiladas por el CSN con otras dos fuentes de información ambiental: el Mapa de Radiación Gamma Natural en España (MARNA, CSN, 2000) y el Mapa Litoestratigráfico de España (Instituto Geológico y Minero de España, IGME, 2009). El Mapa de Potencial de Radón sustituye al anterior Mapa Predictivo de Exposición al Radón publicado por el CSN en 2013, que estaba basado exclusivamente en el MARNA.

El potencial de radón se define como el nivel de radón que supera el 10% de los edificios con concentraciones más elevadas de una determinada zona geográfica. Está referido a los niveles de radón existentes en la planta baja o, cuando esta no se encuentre habitada, en el primer piso, a fin de

identificar de forma normalizada las zonas con mayor riesgo. Al interpretar el mapa, debe tenerse en cuenta que el riesgo asociado a las plantas subterráneas será mayor que el asignado, mientras que será inferior –disminuyendo en razón de un 20% por planta– en los pisos altos.

La cartografía, que se actualizará periódicamente para incluir los resultados de nuevas campañas de medida de radón, es un instrumento básico del Plan Nacional contra el Radón y tiene, además, implicaciones reglamentarias. Por un lado, constituye la base de la zonificación por municipio que establece el Código Técnico de la Edificación (CTE, Documento Básico HS, sección HS 6 de

“Protección frente a la exposición al Radón”) a fin de determinar qué tipos de soluciones constructivas contra el radón deben incorporar los edificios. Por otro lado, servirá para definir los municipios de actuación prioritaria en los que, de acuerdo con el RPSRI, deben llevarse a cabo medidas de radón en todos los lugares de trabajo situados en plantas bajas o bajo rasante.

En ningún caso la información proporcionada por los mapas debe considerarse sustitutiva de las mediciones directas de la concentración de radón en el aire de la vivienda o el lugar de trabajo, que son el indicador más fiable del riesgo al que está expuesto cada individuo.



Los efectos nocivos del radón para la salud se conocen desde hace décadas. Desde 1988 el radón está clasificado por el Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer como carcinógeno humano de primera categoría, y en muchos países representa actualmente la segunda causa de cáncer de pulmón, después del tabaco. Se estima que en Europa el 9% de las muertes por cáncer de pulmón se deben a la exposición a este gas (Darby et ál., 2005; Proyecto RADPAR, 2009–2012).

La primera observación de un exceso de mortalidad por cáncer de pulmón debido al radón fue descrita en 1879 en los trabajadores de las minas de uranio subterráneas del sureste de Alemania (Hurting y Hesse, 1879). Varias décadas más tarde, esa misma asociación se confirmó en un estudio referido a los mineros de Chequia (Arstein, 1913). Gran parte de la información sobre los efectos carcinogénicos del radón proviene de distintos estudios epidemiológicos puestos en marcha a partir de la II Guerra Mundial para valorar los riesgos de la exposición al radón en las minas subterráneas. Las principales cohortes de mineros en las que se fundamentan estos estudios se describen en el informe Beir IV (1988).

Desde la década de 1980, numerosos estudios se centraron en analizar si las exposiciones de radón más moderadas, como las que se encuentran habitualmente en las viviendas, pueden incrementar también la probabilidad de padecer cáncer de pulmón. Los estudios residenciales más relevantes se agruparon en tres metaanálisis independientes que analizaron los casos y controles obtenidos en, respectivamente, Europa, Norteamérica y China (Darby et ál., 2005, 2006; Krewski et ál., 2005, 2006; Lubin et ál., 2004). Los tres arrojan resultados concordantes en cuanto a los riesgos de cáncer de pulmón derivados de la exposición residencial al radón. También sugieren que no es posible descartar un aumento del riesgo de desarrollar cáncer de pulmón incluso a concentraciones inferiores a 100 Bq/m³.

Otra de las conclusiones de estos tres estudios es que el riesgo es mucho mayor en fumadores, como puede observarse en la tabla del estudio europeo

(tabla 1). La mayor parte de las muertes por cáncer de pulmón se deben al efecto sinérgico de radón y tabaco. El radón es, no obstante, la primera causa de muerte por cáncer de pulmón en no fumadores.

Tabla 1. Mortalidad acumulada (%) antes de los 75 años por exposición al radón. Tomada de Darby et ál. (2005)

	0 Bq/m ³	100 Bq/m ³	400 Bq/m ³
Fumadores	10	12	16
No fumadores	0,4	0,5	0,7

Ante esta evidencia epidemiológica, organismos internacionales como la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) o la OMS abogan por programas integrales a nivel nacional para reducir el riesgo que supone el radón para la salud. En esta línea, la directiva europea 2013/59/ Euratom insta a los Estados miembro a poner en marcha planes nacionales de actuación contra este agente cancerígeno.

De acuerdo con la directiva, el plan nacional debe tener un alcance integral, teniendo en cuenta todas las posibles vías de entrada de radón a los edificios. La principal fuente de radón al aire interior es el terreno subyacente, aunque en situaciones particulares el radón disuelto en el agua corriente o el exhalado por los materiales de construcción puede llegar a representar contribuciones importantes.

Figura 1. Vías de entrada del radón al aire interior de una vivienda





La primera recomendación europea para limitar la exposición de la población al radón (^{222}Rn) en ambientes interiores se publicó en 1990 (Recomendación 90/143/Euratom).

La anterior directiva de *Normas Básicas de Seguridad* (96/29/Euratom) excluía explícitamente la exposición al radón en las viviendas, aunque incorporaba el control de las exposiciones al radón asociadas a determinadas actividades laborales. El RPSRI, aprobado por Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, que transpuso esa norma europea, incluye en su título VII, de manera genérica, el control de actividades laborales con especial exposición a la radiación natural, y en particular al radón.

El título VII se desarrolló en 2011, mediante la Instrucción IS-33 del CSN. En ella se establece el nivel de referencia para la exposición ocupacional al radón; se especifican las medidas de control a las que debe quedar sujeta la actividad laboral en caso de que se supere ese límite; y se enumeran los tipos de lugar de trabajo en los que se deben acometer de manera obligatoria estudios de la exposición al radón de los trabajadores.

Los requisitos relativos al radón de la nueva directiva 2013/59/Euratom de *Normas Básicas*

de Seguridad suponen ampliar considerablemente el alcance y el nivel de protección del actual marco regulador. Para la exposición ocupacional, la directiva reduce el nivel de referencia a 300 Bq/m^3 . Además incluye por primera vez la exposición doméstica al radón, y exige a los Estados miembro que tomen medidas activas y habiliten instrumentos, en forma de planes nacionales de actuación, para proteger a la población contra los efectos adversos del gas.

Por otro lado, la directiva 2013/59/Euratom ha impulsado el desarrollo de un nuevo Documento Básico del Código Técnico de la Edificación relativo a la protección contra el radón. Este constituye una nueva sección del documento de *Salubridad*, DB-HS6, que exige, a nivel reglamentario, que la concentración de radón en los recintos habitables de los edificios no supere el nivel de referencia de 300 Bq/m^3 . El DB-HS6 define, además, las soluciones constructivas que, para los edificios de nueva planta, permiten cumplir la exigencia reglamentaria, en función del riesgo asociado al terreno de construcción. Asimismo, detalla las posibles obras de mitigación para los edificios a rehabilitar que presenten valores elevados del gas.

Figura 2. Las cuevas turísticas son uno de los sectores sujetos al cumplimiento del RPSRI y de la Instrucción IS-33 del CSN





Desde finales de los años ochenta, el CSN viene promoviendo campañas de medida de radón en el aire interior de las viviendas. Los resultados obtenidos a partir de estas campañas, una vez filtrados por criterios de metodología y calidad, se han integrado en la base de datos de medidas de radón en viviendas del CSN, de la que se nutre la cartografía del potencial de radón de España. Para elaborar el mapa se han utilizado únicamente las medidas tomadas en plantas bajas o en primeros pisos a lo largo de un periodo mínimo de tres meses consecutivos fuera de la época estival.

A continuación se describen las campañas de medida más relevantes.

Periodo 1989–2000

Ante la carencia en nuestro país de datos sobre las concentraciones de ^{222}Rn en el interior de las viviendas, el CSN, en virtud de sus funciones de control y vigilancia de la calidad radiológica del medio ambiente de todo el territorio nacional, apoyó, mediante acuerdos de colaboración, los programas que distintos laboratorios españoles habían iniciado en relación con la medida de concentraciones de radón en el aire interior. En concreto, se suscribieron acuerdos con la Universidad de Cantabria (1990 y 1992), con la Universitat de València (1993 y 1994), con el Ciemat (1991) y con la Universitat Autònoma de Barcelona (1992). Los resultados de estos acuerdos de colaboración proporcionaron una primera visión de los niveles de radón existentes en España.

Posteriormente, también en colaboración con el CSN, la Universidad de Cantabria llevó a cabo un estudio específico en poblaciones de la sierra de Guadarrama y del oeste de la provincia de Salamanca, donde se habían detectado los valores de concentración de ^{222}Rn más elevados de la muestra estudiada. Además, en 1997, se firmó un acuerdo entre el CSN y la Universidad de Cantabria para evaluar las dosis que debido a la radiación natural recibe la población del entorno de las centrales nucleares y de las instalaciones del ciclo del combustible nuclear.

También en este periodo, el CSN firmó un acuerdo con la Universidad de la Laguna para medir concentraciones de ^{222}Rn en viviendas de las islas Canarias.

Adicionalmente, las Universidades de Oviedo (Pérez-Iglesias et ál., 1996) y Extremadura-Cáceres (Baeza y Navarro, 2003), llevaron a cabo, con financiación autonómica, en el periodo indicado campañas de medida de radón en viviendas de sus respectivas regiones.

Periodo 2001–2009

En octubre de 2001, el CSN aprobó un plan de actuación sobre radiación natural con objeto de facilitar el cumplimiento en nuestro país de los requisitos de protección radiológica ocupacional para las exposiciones a la radiación natural incluidos en la directiva 96/29/ Euratom y de mejorar el conocimiento sobre la exposición de la población en general.

Como parte de este plan, en 2003, se firmaron nuevos acuerdos de colaboración: con la Universidad de Cantabria, para estudiar la relación de la radiación gamma con los niveles de radón en poblaciones rurales de Galicia (Quindós et ál., 2008); y con la Universitat Autònoma de Barcelona, con el fin de investigar la existencia de fallas activas como factor de riesgo en cuanto a la inmisión de radón en los edificios, a partir de un estudio llevado a cabo en diversos lugares de trabajo de la comarca volcánica de La Garrotxa, en Girona, próximos a la falla de Amer (Moreno et ál., 2008).

En noviembre de 2005 entró en vigor, por un período de tres años, la subvención concedida a la Universidad de Santiago de Compostela, Área de Medicina Preventiva y Salud Pública, para medir concentraciones de radón en viviendas de Galicia. Mediante este proyecto se hicieron medidas en unas 2.700 viviendas. El grupo investigador ya había hecho un primer estudio financiado por la Consejería de Medio Ambiente y la Secretaría General de Investigación y Desarrollo de la Xunta

de Galicia en el que se midieron alrededor de un millar de domicilios del territorio gallego.

En diciembre de 2007 se firmó un nuevo acuerdo entre el CSN y la Universidad de Cantabria para realizar nuevas medidas de radón en el marco del *Estudio epidemiológico del posible impacto de las instalaciones nucleares y radiactivas del ciclo de combustible nuclear españolas sobre la salud de la población que reside en su proximidad*.

Finalmente, mediante las subvenciones de I+D concedidas por el CSN en 2009, se llevaron a cabo dos proyectos en las islas Canarias, entre cuyos objetivos estaba el de medir concentraciones de radón en viviendas. Estos proyectos fueron ejecutados por el Departamento de Edafología y Geología de la Facultad de Biología de la Universidad de La Laguna y por el Grupo de Investigación Interacción-Materia de la Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Proyecto *Radón 10 × 10* (2009–2014)

El CSN, reconociendo que los mapas de radón son un instrumento básico para desarrollar un plan nacional de protección contra este gas, impulsó en 2009 una nueva campaña de medidas a nivel estatal. Esta fue diseñada para ampliar el mapa existente de la manera más eficiente posible, atendiendo para la selección de puntos de muestreo

a criterios de población y de riesgo de exposición al radón. Como base para el muestreo se utilizó una rejilla de 10 km × 10 km, coincidente con la utilizada por el Centro Común de Investigación (JRC) de la Comisión Europea para el Atlas Europeo de Radiación Natural (JRC, 2018), en cuya elaboración participa el CSN.

Así, el 25 de noviembre de 2009 se firmó la primera fase del proyecto *Radón 10 × 10* mediante acuerdo entre el CSN y la Universidad de Cantabria, la Universitat Autònoma de Barcelona y la Universidade de Santiago de Compostela (2009). En esta primera fase se obtuvieron unas 5.500 nuevas medidas de radón.

En la segunda fase del proyecto, firmada el 30 de julio de 2013, se obtuvieron unas 1.300 medidas adicionales de zonas de riesgo medio (de las que no se disponía de una caracterización adecuada), de poblaciones de más de 200.000 habitantes y de áreas de especial interés litoestratigráfico.

En el marco del Plan Nacional contra el Radón, de próxima aprobación, el CSN tiene atribuido el papel de responsable en el desarrollo y actualización de mapas de radón. Dentro de esta línea de actuación está prevista la ejecución de nuevas campañas de medida de radón en viviendas, tanto subvencionadas de manera directa por el CSN como de financiación autonómica o local.



Desde hace décadas, distintos países utilizan el concepto de “zonas propensas al radón” (*radon-prone areas*) como un instrumento eficaz para optimizar la exposición al radón de su población. Sin embargo, no existe una definición unívoca de estas zonas. Por ejemplo, la ICRP, en su *Publicación 65*, las define como aquellas en las que “más de un 1% de las viviendas presenta concentraciones diez veces superiores al promedio nacional”, mientras que la Directiva 2013/59/Euratom establece, de forma más genérica, que son zonas donde “el promedio anual de concentración de radón en un número significativo de edificios supera el nivel de referencia nacional correspondiente”.

La directiva 2013/59/Euratom contiene disposiciones específicas para estas zonas, si bien en su articulado se evita expresamente el término *radón-prone* por sus posibles connotaciones negativas. Diversos países europeos han optado, en su lugar, por el término “zonas de actuación prioritaria”, puesto que, en base al riesgo y a la mayor eficacia de las actuaciones de prevención, a ellas deberían dedicarse recursos prioritariamente. Esta es la denominación adoptada en España en el contexto del Plan Nacional contra el Radón y en el *Reglamento de protección de la salud contra los peligros derivados de la exposición a las radiaciones ionizantes*, y la que se utilizará a lo largo de esta publicación.

A efectos jurídicos, la directiva requiere a los Estados miembro identificar estas zonas (artículo 103, apartado 2) y establece que en ellas los empleadores de todos los lugares de trabajo situados en plantas bajas o sótanos deben llevar a cabo mediciones de radón (artículo 54, apartado 2).

En la Península existe un acusado contraste de niveles de radón, marcado por la geología. En general, los edificios presentan concentraciones de radón más elevadas en las zonas del dominio hercínico, al igual que ocurre en el resto de Europa (por ejemplo, la Bretaña francesa o el macizo de Bohemia son representaciones de la orogenia hercínica), mientras que los valores más bajos se suelen dar en las cuencas cenozoicas o terciarias.

No obstante, es necesario definir las zonas de actuación prioritaria sobre la base de un criterio cuantitativo. En España, el CSN considera como zonas de actuación prioritaria aquellas en las que más de un 10% de los edificios presenta, en la planta baja o en la primera planta, concentraciones de radón superiores al nivel de referencia de 300 Bq/m³. Este criterio es coherente con los establecidos en otros países de nuestro entorno socioeconómico (ver tabla 2), y asumible teniendo en cuenta la distribución de concentraciones de radón en el parque residencial de España.

Tabla 2. Criterios para definir zonas de actuación prioritaria en distintos países de la UE. Adaptada de Bossew (2017)

País	Probabilidad CR _n > 300 Bq/m ³
Austria	30% – 40%
Suiza	18%
Alemania, España, Finlandia, Grecia	10%
Bélgica	5%
Irlanda	3%
Reino Unido	0,2%

Independientemente del criterio elegido, las zonas de actuación prioritaria pueden identificarse mediante tres estrategias: (i) de manera directa, a partir de mediciones de la concentración de radón en las viviendas; (ii) mediante métodos indirectos, basados en variables correlacionadas con el radón, como, por ejemplo, el radón en el gas del suelo (Alemania: Kemske et ál., 2001; Chequia: Barnet et ál., 2008), la radiación gamma (España: CSN, 2013) o el contenido de uranio en las rocas (Ielsch et ál., 2010); o (iii) utilizando métodos híbridos, que combinan datos de radón en viviendas con información geológica, variables radiológicas auxiliares, o ambas cosas (Reino Unido: Miles y Appleton, 2005; Alemania: Kemske et ál., 2009; Bélgica: Cinelli et ál., 2010).

En el caso de España, la densidad de medidas de radón es insuficiente para delimitar estas zonas de manera directa; actualmente, según se describe en el apartado 3, el CSN cuenta con unas 12.000

medidas de radón en viviendas. Aunque la cobertura espacial del territorio que proporcionan estas medidas es aceptable, su densidad resulta insuficiente para delinear con fiabilidad las zonas geográficas con niveles más altos de radón.

Por ello, el CSN ha desarrollado un método híbrido (García-Talavera et ál., 2013), cuya

fiabilidad y precisión es muy superior a la aproximación basada solo en la radiación gamma (en la que se basaba el Mapa Predictivo de Exposición al Radón, publicado por el CSN en 2013) o a la que se obtendría de manera directa a partir de las medidas de radón. Este método híbrido combina las medidas de radón en viviendas con otra información radiológica –la tasa de

Figura 3. Cuadríplico de la Cartografía del potencial de radón de España (CSN, 2017)



exposición a la radiación gamma terrestre— y con el Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidades e Hidrogeológico de España, de 2009, del IGME). De este modo se elaboró el Mapa de Potencial de Radón de España (figura 2).

El potencial de radón de una zona geográfica se define como el nivel de radón, en planta baja o primera, que se supera en el 10% de los edificios con niveles más elevados en esa zona geográfica; esto es, el percentil 90 de la distribución de niveles de radón en el aire interior de los edificios de esa zona geográfica (cuadro 1).

Se consideran zonas de actuación prioritaria aquellas en las que el potencial de radón es superior a 300 Bq/m³, y se representan por separado en un mapa de zonas de actuación prioritaria. A partir de este mapa, de base

geológica, es posible generar mapas por municipio utilizando distintos criterios de población o de distribución del tejido urbano, como se describe en los apartados 7.1 y 7.2.

Cuadro 1. ¿Qué es el potencial de radón de una zona?

Es el percentil 90 de la distribución de niveles de radón en los edificios de esa zona (referido a la concentración de radón medida en la planta baja, o, cuando esta no está habitada, en la planta primera).

Por ejemplo, un potencial de radón de '300 Bq/m³' significa que:

- El 90% de los edificios presenta concentraciones inferiores a 300 Bq/m³.
- El 10% presenta concentraciones superiores a este nivel.

El potencial de radón depende de:

- La capacidad del terreno para generar y transportar el radón
- Las características constructivas del parque residencial



En este apartado se expone la metodología desarrollada por el CSN para identificar con un criterio homogéneo en todo el territorio nacional las zonas más expuestas al radón o zonas de actuación.

Las fuentes de información utilizadas para ello son las siguientes:

- La base de datos de medidas de radón en viviendas del CSN.
- El MARNA (CSN, 2000).
- El Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidades de España (IGME, 2009).

Los análisis estadísticos se han hecho con R y el geoprocésamiento de datos con ArcGIS.

5.1. Criterio estadístico de decisión

El criterio fijado para identificar una zona como de actuación prioritaria es que más de un 10% de sus edificios presente concentraciones superiores al nivel de referencia. En términos estadísticos, esto puede formalizarse mediante un test de hipótesis, en el que la hipótesis nula $H_0: X_{0,9} \geq 300 \text{ Bq/m}^3$ se contrasta frente a la hipótesis alternativa $H_1: X_{0,9} < 300 \text{ Bq/m}^3$, siendo $X_{0,9}$ el 90 percentil de la distribución, X , de concentraciones de radón. El valor crítico para rechazar H_0 es $\tilde{X}_{0,9}$, la cota superior de $X_{0,9}$ con un nivel de significación α .

Como ocurre con muchas otras variables ambientales, las medidas de radón en una determinada zona, X , siguen una distribución lognormal, siendo m_g la media geométrica de la muestra, y s_g la desviación estándar geométrica. En consecuencia, la variable $Y = \log X$ sigue una distribución normal con media μ_y y desviación estándar σ_y . Dada una muestra aleatoria, $\{x_i\}$, la cota superior del percentil 90 de Y , $Y_{0,9}$, puede obtenerse de acuerdo con la siguiente expresión (Hahn y Meeker, 2011):

$$\tilde{Y}_p = \bar{y} + g'_{(1-\alpha; p; n)} S_y,$$

donde $\bar{y}$ es la media de la muestra $\{y_i\} = \{\log x_i\}$,

$$S_y = \sqrt{\frac{n}{n-1}} s_y, \text{ siendo } n \text{ el tamaño muestral,}$$

y s_y la desviación estándar de $\{y_i\}$, y donde los factores $g'_{(y; p; n)}$ son los definidos en la tabla 1 de Odeh y Owen (1980).

Dada la relación entre los percentiles teóricos de X y Y : $P\{Y < Y_{0,9}\} = 0,9 \leftrightarrow P\{X < e^{Y_{0,9}}\} = 0,9$, la cota superior del 90 percentil de X es:

$$\begin{aligned} \tilde{X}_{0,9} &= \text{EXP}\{\tilde{Y}_p\} = \text{EXP}\{\bar{y} + g'_{(1-\alpha; 0,9; n)} S_y\} = \\ &= \text{EXP}\{\bar{y}\} \text{EXP}\{g'_{(1-\alpha; 0,9; n)} S_y\} = \\ &= m_g s_g \text{EXP}\{g'_{(1-\alpha; 0,9; n)} \sqrt{\frac{n}{n-1}}\} \end{aligned}$$

Para un nivel de significación α , la hipótesis nula puede rechazarse (lo que supone que la zona en cuestión no se considera de actuación prioritaria) si y solo si $\tilde{X}_{0,9} < 300 \text{ Bq/m}^3$.

En particular, se ha establecido $\alpha = 0,10$ (probabilidad de error tipo I), lo que implica admitir una probabilidad de un 10% de que una zona de actuación prioritaria quede sin identificar. Por otro lado, para controlar el error de tipo II, se establece un tamaño muestral mínimo $n = 27$ para aplicar el test de hipótesis.

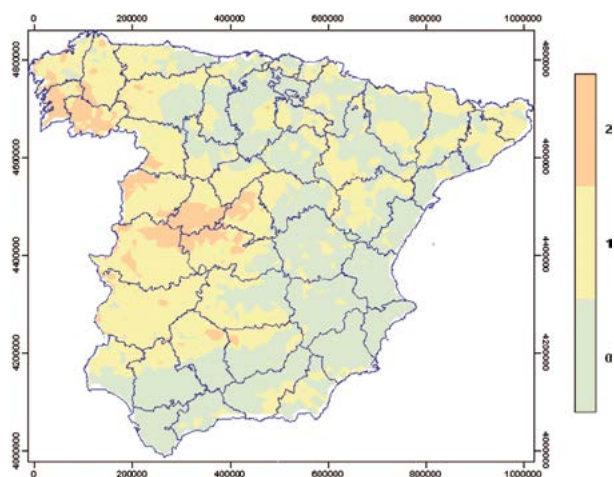
5.2. Península y Baleares

En este apartado se describe la metodología desarrollada por el CSN para identificar las zonas de actuación prioritarias en el territorio peninsular y en Baleares.

Relación entre el radón en viviendas y la radiación gamma

La primera aproximación a la identificación de las zonas geográficas más expuestas al radón fue el Mapa Predictivo de Exposición al Radón, que el CSN publicó en 2013. Este mapa divide el territorio en tres categorías en función de sus niveles de radiación gamma (figura 4).

Figura 4. Zonas de categoría 0, 1 y 2 para el territorio peninsular. Correspondientes a niveles de exposición a la radiación gamma < 7,5 microR/h, 7,5–14 microR/h y > 14 microR/h



El mapa se basa en la relación lineal que presenta la tasa de kerma en aire con el contenido en ^{226}Ra del suelo (Cascón et ál., 2002), el cual, a su vez, está correlacionado con la concentración del radón en las viviendas (Nason y Cohen 1980).

Los valores de corte de 66 nGy/h ($\approx 7,5$ microR/h) y 123 nGy/h ($\approx 14,0$ microR/h) para la tasa de kerma en aire proporcionan una adecuada representación de los distintos dominios geológicos (la superficie > 66 nGy/h corresponde, a grandes rasgos, a la geología premesozoica de la península ibérica, mientras que la línea de contorno de 123 nGy/h rodea zonas de afloramientos graníticos y las áreas metamórficas más occidentales del Macizo Ibérico).

La utilidad de la radiación gamma para predecir los niveles de radón fue evaluada directamente en un proyecto del CSN llevado a cabo en Galicia por la Universidad de Cantabria. En este se definieron tres zonas con distintos niveles de radiación gamma:

- Zona 1: < 65 nGy/h – 87 nGy/h
- Zona 2: 65 nGy/h – 130 nGy/h
- Zona 3: 87 nGy/h – 130 nGy/h

En las tres zonas se hicieron medidas de radón en viviendas. A partir de los principales parámetros

estadísticos obtenidos para las tres distribuciones de radón se concluyó que la tasa de radiación gamma puede ser un indicador cualitativo, pero no es un buen estimador cuantitativo que permita hacer predicciones (Quindós et ál., 2008).

Para contrastar esta conclusión a nivel nacional se analizó la relación entre la concentración de radón en viviendas y la tasa de dosis gamma en aire a 1 m del suelo utilizando datos de toda España (excluidas Canarias y las ciudades autónomas). En particular, para cada municipio se consideró la media geométrica y la desviación estándar geométrica de las medidas de concentración de radón, restringiendo el análisis a municipios en los que se hubieran tomado al menos 6 medidas de radón¹. El valor promedio de exposición a la radiación gamma para cada municipio se obtuvo a partir del MARNA por interpolación utilizando el programa Surfer 7. El valor de exposición se convirtió a tasa de kerma en aire (dosis absorbida en aire) utilizando la relación $1\text{R} = 0,00876\text{ Gy}$.

Como resultado del análisis, se encontró una correlación débil pero significativa entre la media geométrica de las concentraciones de radón (m_g) y la tasa de dosis γ (R_γ): r de Pearson = 0,30, $p = 0,001$; ρ de Spearman = 0,65, $p = 0,000$. La desviación estándar geométrica (DEG), por otro lado, no está correlacionada con m_g ($r = 0,087$; $p = 0,082$) ni con R_γ ($r = -0,060$; $p = 0,229$), aunque muestra una pequeña correlación por rangos con esta última variable ($\rho = 0,108$, $p = 0,030$). La distribución formada por las DEG de todos los municipios con $n > 6$ presenta un valor medio de 2,05, y un rango entre 1,13 y 6,93.

En particular, la mejor correlación se obtuvo para el logaritmo neperiano de m_g y R_γ ($r = 0,61$; $p = 0,000$).

Ninguno de los modelos anteriores permite construir un mapa de radón con un grado suficiente de precisión. No obstante, la información relevante para clasificar una zona como de actuación

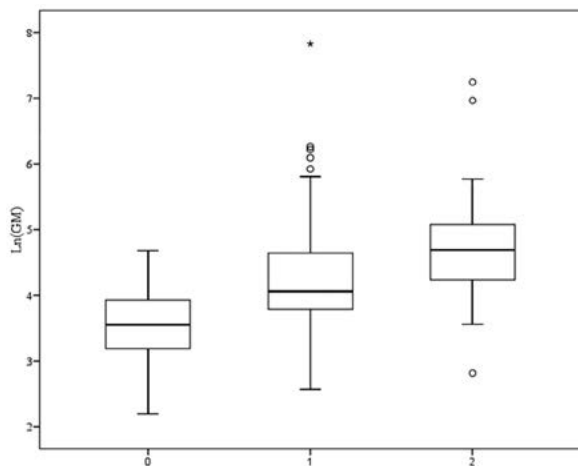
¹ Para $n = 6$, el error asociado a la media geométrica muestral está en torno a un 50% (Hewett 1995).

prioritaria no es su media geométrica, ni un percentil alto de la distribución, sino la probabilidad de que estos estadísticos excedan determinados valores. Esto implica que, a efectos de la identificación de zonas, el radón puede representarse como una variable categórica en lugar de cuantitativa, como se expone en la siguiente sección.

Correspondencia entre variables categóricas

Para investigar la utilidad de la radiación gamma como variable categórica se definieron tres grupos de municipios en función de los valores de corte establecidos anteriormente. Para cada grupo se analizó la distribución de las medias geométricas de radón municipales (figura 5).

Figura 5. Diagrama de cajas del logaritmo natural de las medidas geométricas de radón para los municipios correspondientes a los siguientes rangos de radiación gamma: 0) < 66 nGy/h; 1) $66-123$ nGy/h; 2) > 123 nGy/h



Las tres distribuciones se ajustan a una lognormal (test de Kolmogorov-Smirnov: $Z_0 = 0,514$; $p_0 = 0,954$; $Z_1 = 1,161$; $p_1 = 0,135$; $Z_2 = 1,089$; $p_2 = 0,186$). El test de Levene, aplicado a los datos transformados, muestra que las varianzas de los tres grupos son heterogéneas ($W = 5,303$; $p = 0,005$). Por tanto, se utilizó el test de Kruskal-Wallis, que indica que los tres grupos difieren significativamente ($\chi^2 = 151,4$; $p < 0,05$).

Por otra parte, el análisis de correspondencias permite explorar el grado de asociación entre las siguientes categorías de radiación gamma y la exposición al radón (expresada en términos de m_g):

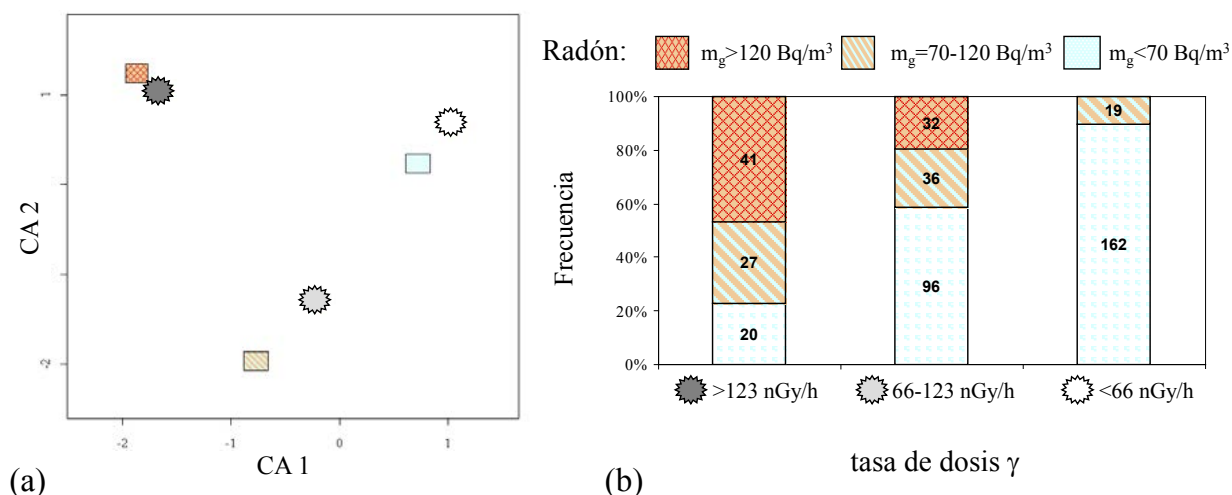
- $[< 66 \text{ nGy/h}]$ y $[< 70 \text{ Bq/m}^3]$
- $[66 \text{ nGy/h} - 123 \text{ nGy/h}]$ y $[70 \text{ Bq/m}^3 - 120 \text{ Bq/m}^3]$
- $[> 123 \text{ nGy/h}]$ y $[> 120 \text{ Bq/m}^3]$

Este análisis pone de manifiesto una buena asociación entre los tres pares analizados, como puede observarse en la figura 3a. La figura 3b muestra una representación gráfica de la correspondiente tabla de contingencia.

De los 181 municipios con una tasa de dosis de < 66 nGy/h, casi el 90% [95% IC = (0,85, 0,94)] tiene medias geométricas de radón inferiores a 70 Bq/m^3 . Una proporción mayor, en concreto el 97% [95% IC = (0,93, 0,99)], tiene percentiles 90 inferiores a 300 Bq/m^3 .

Esto quiere decir que un nivel de radiación gamma inferior al valor de corte de 66 nGy/h es un indicador muy fiable de que el municipio no constituye una zona de actuación prioritaria, por lo que es viable establecer un test de cribado basado en la radiación gamma. En concreto, el NPV, valor predictivo negativo del test (es decir, probabilidad de que el percentil 90 sea inferior a 300 Bq/m^3 si el resultado del test es negativo), es de 0,97. Por el contrario, un nivel de radiación gamma superior a este valor de corte no permite concluir con fiabilidad que el municipio sea o no zona de actuación prioritaria, como muestra el bajo poder predictivo positivo del test de cribado (0,54 para $m_g \geq 70 \text{ Bq/m}^3$, y 0,25 para $X_{90} \geq 300 \text{ Bq/m}^3$).

En vista del alto valor del NPV, se consideró directamente que ninguno de los municipios con niveles de radiación gamma inferiores a 66 nGy/h era de actuación prioritaria. Para el resto, fue necesario incorporar información adicional que permitiese hacer una clasificación fiable.

Figura 6. (a) Mapa de correspondencias; (b) Gráfico de barras que representa la asociación entre R_γ y m_g 

Integración de la geología

Uno de los factores que más influye en los niveles de radón de las viviendas es la geología (Miles y Ball, 1996; Mikšová y Barnet, 2002; Friedmann y Gröller, 2010).

Para aquellas zonas de la Península y Baleares con una tasa de kerma en aire superior a 66 nGy/h , se incluyó información geológica en el análisis. En particular, se utilizó el Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidades de España del IGME, a escala 1:200.000, del año 2009. De acuerdo con la *Guía Estratigráfica Internacional* (SICE, 1980), se define como unidad litoestratigráfica el “conjunto de estratos que constituyen una unidad por estar compuestos predominantemente por cierto tipo litológico, o por poseer otras características litológicas importantes en común, que sirvan para agrupar los estratos”. El requisito crítico indispensable de una unidad litoestratigráfica es que, en conjunto, presente un grado importante de homogeneidad.

Se seleccionaron, en primer lugar, todas aquellas unidades litoestratigráficas que intersectaban con áreas de tasa de dosis $> 66 \text{ nGy/h}$.

Las unidades litoestratigráficas para las que no se disponía de suficientes medidas de radón se

reagruparon en categorías más amplias siguiendo criterios de composición, edad y permeabilidad. Por otro lado, cuando alguna de las unidades presentaba áreas con niveles de radiación gamma inferiores al criterio de corte, estas áreas se excluyeron del análisis.

El siguiente paso fue verificar que las unidades de clasificación así definidas presentaban niveles de radón espacialmente aleatorios, dado que la existencia de gradientes o *clusters* espaciales invalidarían el test de hipótesis planteado en la sección 5.1.

La falta de estructura espacial puede confirmarse estadísticamente para las dos unidades más extensas de las analizadas: las rocas ácidas plutónicas hercínicas (APH) y los materiales sedimentarios del cuaternario (Q). En las figuras 7 y 8 pueden apreciarse paisajes característicos de este tipo de geologías.

En primer lugar, los variogramas obtenidos para las unidades APH y Q se corresponden con un efecto pepita (o *nugget*) puro. Ello responde a un modelo completamente aleatorio, en el que no hay correlación espacial, al menos a distancias superiores a los intervalos de distancia considerados. Estos mismos resultados se confirmaron mediante la *I* de Moran.

Figura 7. Paisaje granítico de la sierra de Guadarrama (Comunidad de Madrid)



Figura 8. Depósitos sedimentarios del cuaternario en las Bárdenas Reales (Navarra)



La aleatoriedad espacial (sin gradientes o grandes *clusters*) sugiere que los regímenes de precipitación o de temperatura, que muestran marcadas variaciones en dirección N-S/SE a través de estas extensas unidades, no ejercen una influencia significativa en los niveles de radón en las viviendas, o que, de ser así, se compensan con otras variables.

Para el resto de unidades de clasificación, en aquellos casos en que se observaron estructuras espaciales, se llevaron a cabo los pertinentes análisis estadísticos. Como resultado de ellos, tres unidades (o agrupaciones) se dividieron en secciones de estructura homogénea, que se clasificaron por separado. Estas son, de acuerdo con la leyenda del Mapa Litoestratigráfico y de Permeabilidades de España (IGME, 2009):

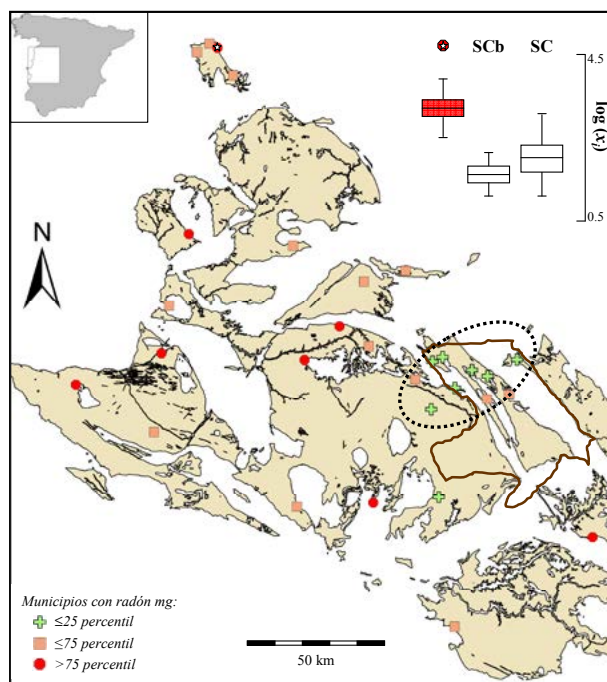
- Unidad 43. Pizarras y esquistos del complejo esquisto grauváquico (Ver figura 9). Esta unidad se caracteriza por la abundante presencia de minerales secundarios de uranio asociados a estas pizarras, conocida desde los años cincuenta. En la figura 10 puede apreciarse dentro de la unidad 43 una subunidad caracterizada por niveles de radón muy inferiores al resto, que se clasificó separadamente utilizando un criterio morfológico para su delimitación precisa.
- Materiales del terciario de la cuenca del Duero (316–321). Se clasificó separadamente del resto la unidad 316 (areniscas, limos y conglomerados ocre; paleógeno) por presentar concentraciones de radón significativamente más elevadas que el resto. Esta unidad se corresponde con el borde oeste de la cuenca del Duero, en el que el aporte de los depósitos procede del Complejo Esquisto Grauváquico y de los granitos hercínicos.
- Materiales paleozoicos (principalmente de tipo esquisto o pizarra) de Pirineos y la cuenca catalana. Se dividieron, geográficamente, en dos subunidades que presentan entre sí niveles dispares de radón: la primera correspondiente al Pirineo y Prepirineo; y la segunda, a las cordilleras costeras catalanas.

Figura 9. Vista de Villar de la Yegua (Salamanca), población asentada en materiales correspondientes a la unidad litoestratigráfica 43



Por último, se agruparon las medidas de radón individuales de cada unidad, m . Para cada uno de estos conjuntos de datos, $\{x_i\}_m$, se aplicó un test de normalidad sobre los datos log-transformados: si el tamaño de muestra era superior a 50, el test de Kolmogorov-Smirnov; en caso contrario, el test de Shapiro-Wilk. En todos los casos, las medidas siguen una distribución lognormal, por lo que se utilizó la fórmula propuesta en 5.1 para estimar $\tilde{X}_{0.9}$. A partir de los valores obtenidos para las distintas unidades de clasificación, se generó el mapa de potencial de radón que se presenta en el apartado 6 de resultados (figura 14).

Figura 10. Unidad 43 (según Mapa Litoestratigráfico del IGME). El conjunto montañoso marcado en marrón se clasifica como una unidad litoestratigráfica independiente



5.3. Islas Canarias

Desde el punto de vista geológico, las islas Canarias no guardan ninguna relación con la península ibérica y su evolución. Se trata de islas de origen volcánico, constituidas por edificios de diferente e independiente historia geológica; por tanto, la composición de los magmas es muy variada, aunque normalmente es básica, y dentro del campo alcalino.

Radiológicamente los suelos y rocas de las islas presentan proporciones torio-232/uranio-238 y potasio-40/uranio-238 superiores a las de la península. Por consiguiente, no es esperable que las conclusiones alcanzadas para la península sobre la relación entre el radón en las viviendas y la tasa de radiación gamma sean directamente extrapolables al archipiélago.

Por otro lado, la densidad de medidas de radón es mucho mayor que para la península, por lo que puede obviarse la primera parte del análisis (en términos de la radiación gamma) y procederse a clasificar directamente los datos por unidad litoestratigráfica.

El análisis se restringió a las islas de Tenerife y Gran Canaria. En el resto, las medidas de radón disponibles muestran un patrón de variabilidad espacial aleatorio y con valores bien inferiores al nivel de referencia (ninguna de las medidas es superior a 300 Bq/m³), como puede observarse en la figura 11. En consecuencia, se clasificaron directamente como zonas de actuación no prioritaria.

Como criterio de agrupación, para las unidades litoestratigráficas de Gran Canaria y Tenerife se utilizó la composición química de las rocas –según la relación entre el contenido de minerales alcalinos (Na₂O y K₂O) y el contenido de silicatos (SiO₂)– haciendo uso del diagrama TAS (*total alkali-silica*), como muestra la figura 12. Un magma básico presenta contenidos de SiO₂ entre 45%–52%. Por el contrario, un magma ácido tiene valores por encima de 63% de SiO₂.

Figura 11. Resultados de las medidas de radón en viviendas de El Hierro, La Gomera y La Palma (izquierda) y de Fuerteventura y Lanzarote (derecha)

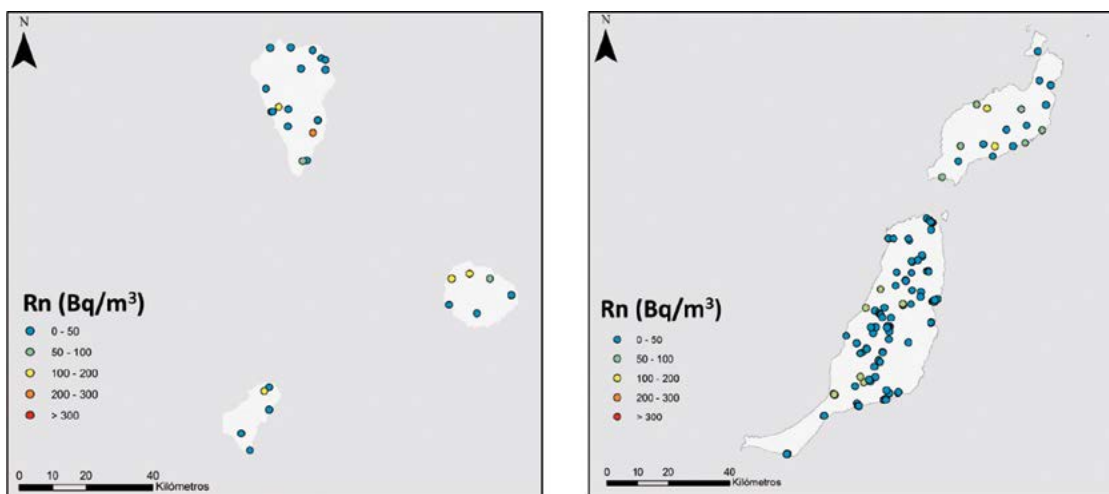
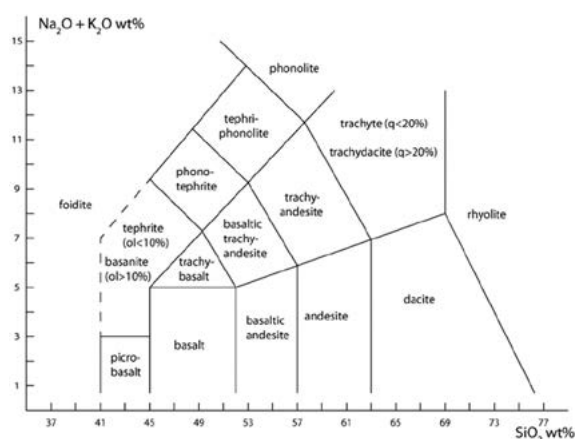


Figura 12. Diagrama TAS



Fuente: sandatlas.org.

Atendiendo a lo anterior, las unidades litoestratigráficas se agrupan como:

- Ácidas
- Intermedias
- Básicas
- Ultrabásicas
- Sedimentarias (diferenciando en estas últimas entre brechas y depósitos, ya que estas dos

formaciones muestran niveles de radón diferenciados).

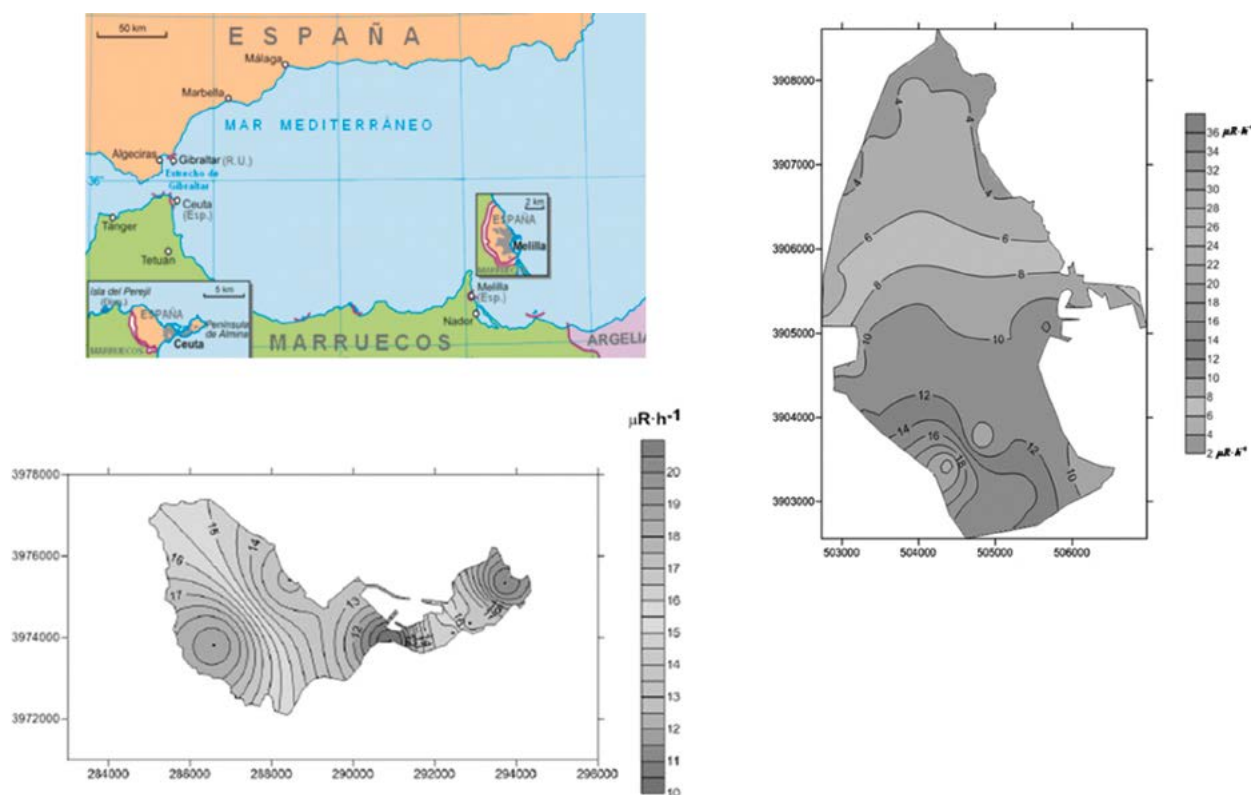
Una vez establecidas estas agrupaciones, cada una de ellas se clasificó en función del valor obtenido para $\bar{X}_{0.9}$. A partir de los valores resultantes se elaboró el mapa de potencial de radón que se presenta en el apartado 6 de resultados (figura 14).

5.4. Ciudades autónomas

Para las ciudades autónomas no se dispone de medidas directas de radón en viviendas, aunque sí de mapas radiométricos. El mapa de radiación gamma de Melilla fue cedido al CSN por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria; el mapa de Ceuta fue obtenido en el Acuerdo Específico de ampliación del MARN, suscrito con la Universidad de La Laguna. En la figura 13 se muestran ambos mapas.

Atendiendo a la radiación gamma y estableciendo el criterio fijado para la península, toda Ceuta y la parte sur de Melilla son potencialmente zonas de actuación prioritaria.

Figura 13. Mapas radiométricos de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla (valores expresados en tasa de exposición)



Dada la falta de medidas directas de radón, la clasificación se llevó a cabo exclusivamente de acuerdo con la geología.

Ceuta está asentada sobre la complicada geología del arco bético-rifeño, zona de convergencia de las placas tectónicas euroasiática y africana, donde se han descrito diferentes unidades estructurales, entre las que dominan las de origen metamórfico.

Melilla, por su parte, se encuentra dentro de la cuenca neógena de Melilla-Nador, una de las cuencas post-orogénicas del noreste de la región del Rif. En Melilla aflora un complejo carbonático

marino somero, de edad entre Tortoniense y Messiniense, que se dispone sobre la vertiente sur de un alto estructural (cabo de las Tres Forcas) compuesto por rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias. En particular, en el Gurugú, donde se registran las tasas más elevadas de radiación gamma, aparecen andesitas, traquiandesitas, dacitas, y en su base basaltos.

La clasificación de las unidades litoestratigráficas que aparecen en las ciudades autónomas se llevó a cabo extrapolando los resultados obtenidos para estas mismas unidades en la península.



En este apartado se presentan los mapas de potencial de radón (figura 14) y de zonas de actuación prioritaria (figura 15) generados siguiendo la metodología descrita en el apartado 5 de esta publicación. Además, en el anexo se presenta el mapa de potencial de radón por comunidad autónoma.

La siguiente tabla muestra la media aritmética de concentración de radón de cada una de las unidades de potencial de radón cartografiadas en la figura 14.

Tabla 3. Media aritmética de concentración de radón para las unidades de potencial de radón cartografiadas

P90 (Bq/m ³)	CRn (media aritmética)
< 100	38 Bq/m ³
101–200	67 Bq/m ³
201–300	93 Bq/m ³
301–400	117 Bq/m ³
> 400	219 Bq/m ³

A partir del mapa de potencial de radón se generó el mapa de zonas de actuación prioritaria (figura 15), seleccionando aquellas en las que $P90 > 300$ Bq/m³. Estas son, además, las zonas en las que la media aritmética de la concentración de radón en los edificios supera (en planta baja o primera) el nivel de 100 Bq/m³ recomendado por la OMS.

Las zonas de actuación prioritaria se extienden por las siguientes comunidades autónomas: Andalucía, Aragón, Asturias, Canarias, Castilla y León, Castilla-La Mancha, Canarias, Cataluña, Extremadura, Navarra y País Vasco. La superficie ocupada por estas es de 88.314 km² frente a los 504.944 km² del territorio del Estado.

Figura 14. Mapa de potencial de radón de España, definido como la concentración de radón que superan (en planta baja o primera) el 10% de los edificios más expuestos de la zona

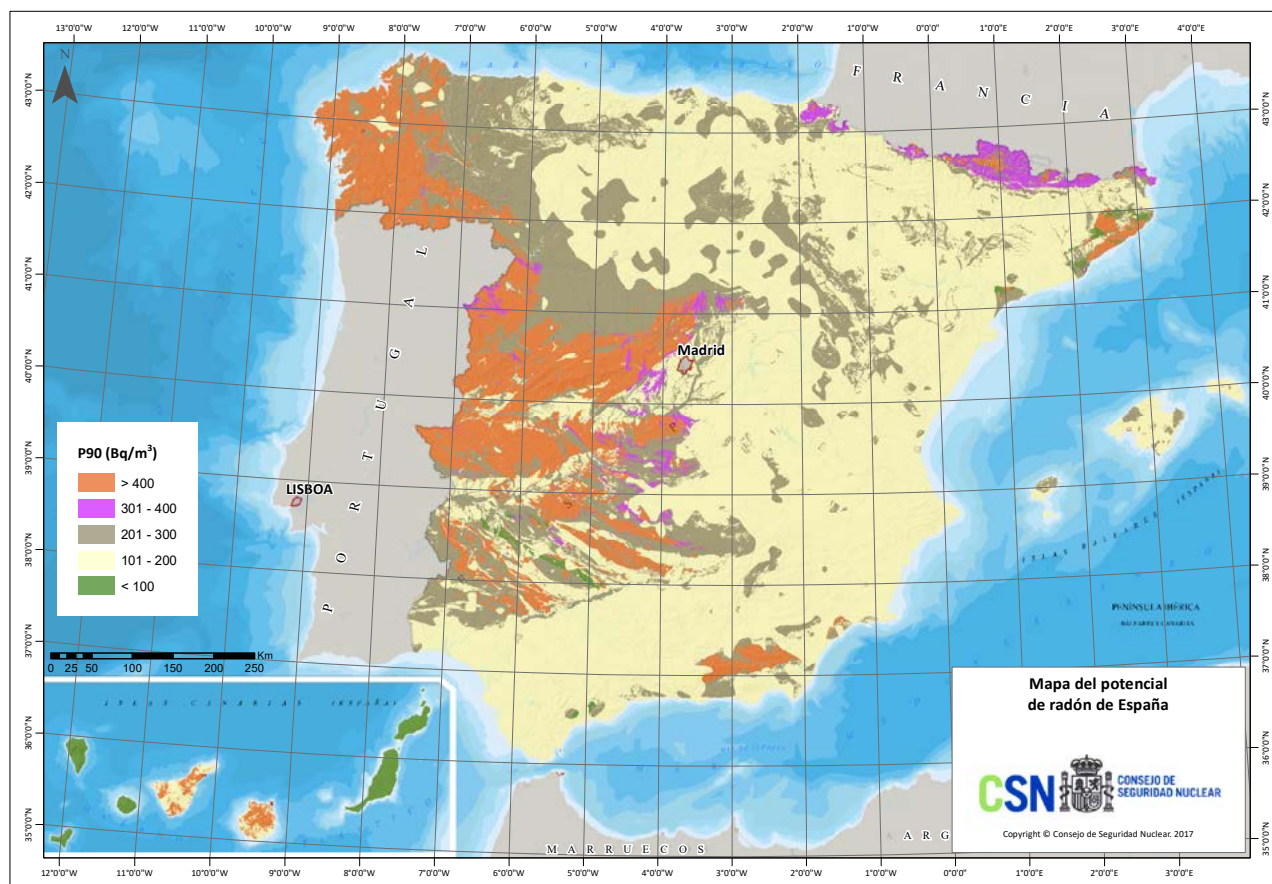
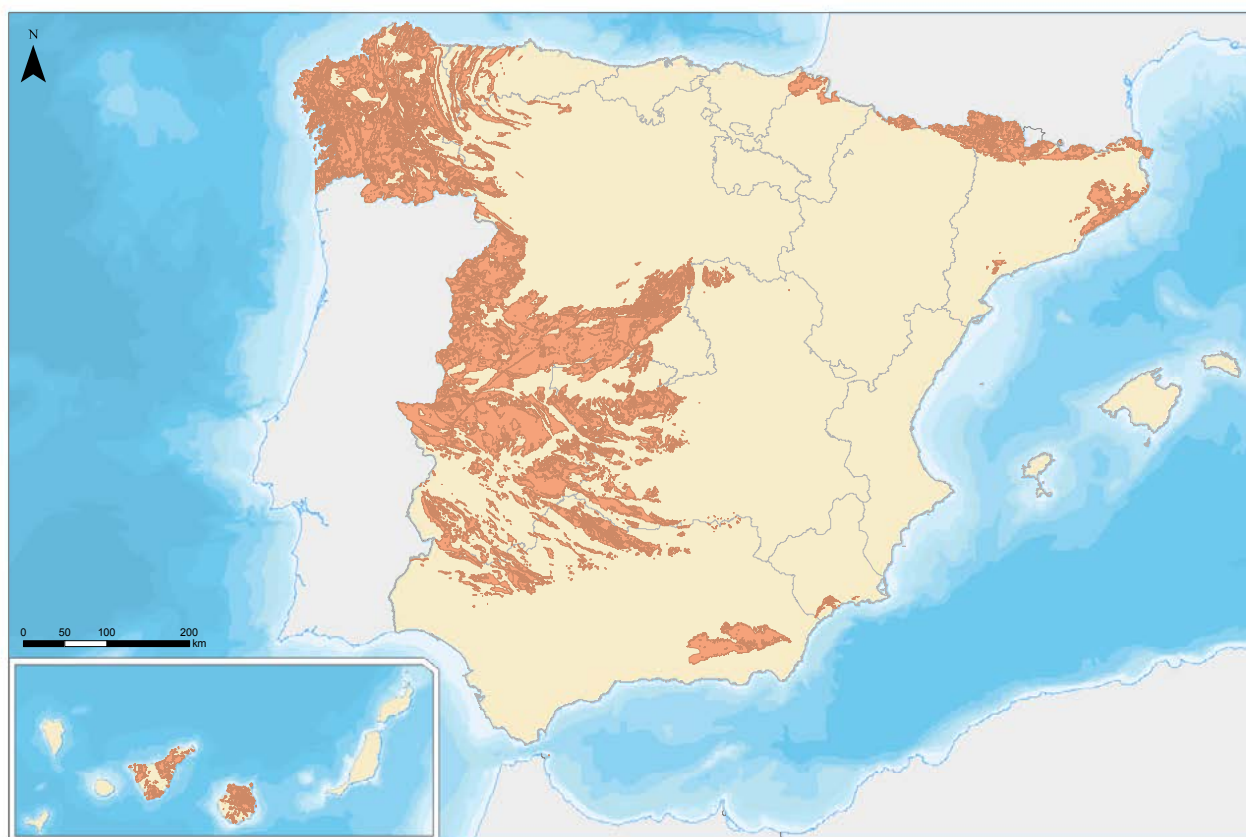


Figura 15. Mapa de zonas de actuación prioritaria





A efectos de cumplimiento reglamentario o de desarrollo de estrategias es útil delinear las zonas de actuación prioritaria a nivel municipal (por ser los municipios las entidades básicas de organización territorial del Estado). En esta sección se presenta un mapa de zonificación por municipio basado en criterios de densidad de población (apartado 7.1) y otro mapa definido en función del grado de solapamiento de las distintas unidades de potencial de radón con el tejido urbano del municipio (apartado 7.2).

7.1. Zonificación por densidad de población

Para generar mapas de municipios a partir de las unidades de potencial de radón cartografiadas y de

Figura 16. Celdas con datos censales de la península ibérica (ETRS89 30N)



Figura 17. Celdas con datos censales de las islas Canarias (ETRS89 28N)

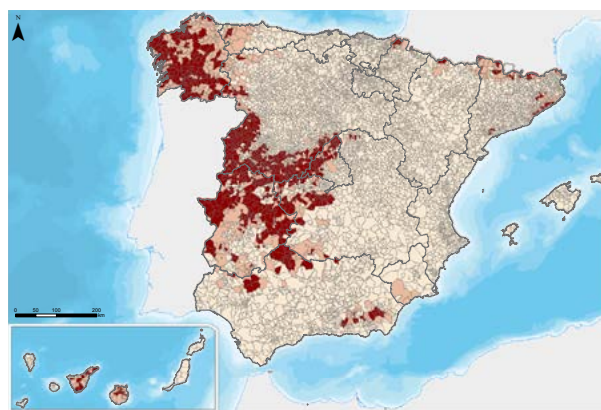


la densidad de población se utiliza el censo a 1 de noviembre 2011 proporcionado por el Instituto Nacional de Estadística (INE). La información censal se aplica haciendo uso de la rejilla de 1 km² establecida por la Oficina Europea de Estadística (Eurostat) para difundir información estadística. La rejilla facilita información para aquellas celdas de 1 km² que contengan al menos una vivienda (principal).

A partir de la rejilla se obtienen, para todos los municipios que intersectan con unidades de potencial de radón definidas como zonas de actuación prioritaria, los porcentajes de población que reside directamente sobre dichas unidades.

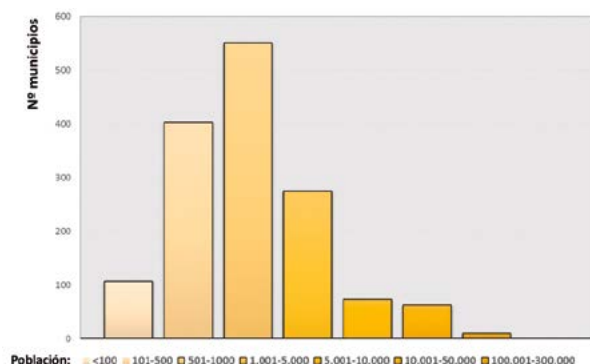
Esta información puede cartografiarse, como se muestra en la figura 18. En el mapa se representan en código destacado los municipios con población residente en zonas de actuación prioritaria, así como, a modo de ejemplo, en color más oscuro, aquellos en los que más de un 75% de su población reside en estas zonas.

Figura 18. Mapa de municipios en los que más de un 75% de la población reside en zonas de actuación prioritaria (destacados en color caoba). En color beis, los municipios con población residente en zonas de actuación prioritaria



La población de los municipios en los que más de un 75% de la población reside en zonas de actuación prioritaria supone menos de un 8% de la población española. En su mayoría se trata de municipios de menos de 1.000 habitantes, y solo tres superan los 100.000 habitantes (figura 19).

Figura 19. Distribución por población de los municipios en los que más de un 75% de los habitantes reside en zonas de actuación prioritaria



7.2. Zonificación por tejido urbano

Una segunda posibilidad para hacer una zonificación por municipio a partir del Mapa de Potencial de Radón es atender a la distribución del tejido urbano. En este caso, el tejido urbano se obtuvo del producto CartoCiudad, creado y mantenido por el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

CartoCiudad es un conjunto de datos de direcciones y de red viaria urbana e interurbana continua de ámbito nacional, con estructura topológica de sistema de información geográfica, y generado a partir de datos oficiales. Su fuente de datos principal es la red viaria procedente de la Información Geográfica de Referencia de Redes de Transporte (RT) del IGN, la cual se complementa con la denominación de las poblaciones procedentes de la Información Geográfica de Referencia de Poblaciones del IGN, los códigos postales de correos y la denominación oficial de las unidades administrativas del Registro Central de Cartografía. Esta red viaria, que discurre sobre un fondo cartográfico basado en el parcelario catastral, se estructura según las divisiones administrativas. En el ámbito urbano, los datos tienen un denominador de escala 1.000, y en el ámbito interurbano, de 25.000.

A efectos de la zonificación, el tejido urbano se define como el espacio conformado por manzanas urbanas (estas son, las edificaciones y zonas verdes

delimitadas por calles por todos los lados). El tejido urbano obtenido de CartoCiudad lo componen un total de 1.357.427 polígonos, repartidos por toda la geografía española.

Figura 20. Detalle del tejido urbano de CartoCiudad, a escala 1:2.500, superpuesto al mapa base de imagen aérea (© ESRI). La sede principal del CSN aparece marcada en azul



El cálculo de la intersección de estos polígonos con las unidades de potencial de radón se obtuvo mediante ArcGIS. Se consideraron, por un lado, conjuntamente, las dos unidades con potencial de radón $> 300 \text{ Bq/m}^3$, y por otro, la unidad con potencial de radón en el intervalo $200\text{--}300 \text{ Bq/m}^3$.

Debido al gran volumen de polígonos necesarios para analizar el tejido urbano afectado, fue preciso desarrollar herramientas que hicieran los cálculos de forma automática. Así se desarrolló un programa utilizando la API (interfaz de programación de aplicaciones) de Python para ArcGIS, ArcPy, y, en paralelo, se desarrolló la misma herramienta en lenguaje C# mediante la API de Microsoft .NET a fin de comprobar la validez del análisis.

La primera parte del análisis consistió en preparar las entidades a utilizar. Por un lado, del contenido total de CartoCiudad, se exportaron a la base de datos del estudio los polígonos correspondientes a manzanas urbanas, y por otro las unidades de potencial de radón “ $200\text{--}300 \text{ Bq/m}^3$ ” y “ $> 300 \text{ Bq/m}^3$ ”.

A continuación, para cada municipio se intersectaron las manzanas urbanas con las unidades de potencial de radón de interés, eliminando aquellos polígonos (o partes de polígonos) cuya intersección es el conjunto vacío, y se calculó el porcentaje del tejido urbano total del municipio que representan los polígonos restantes.

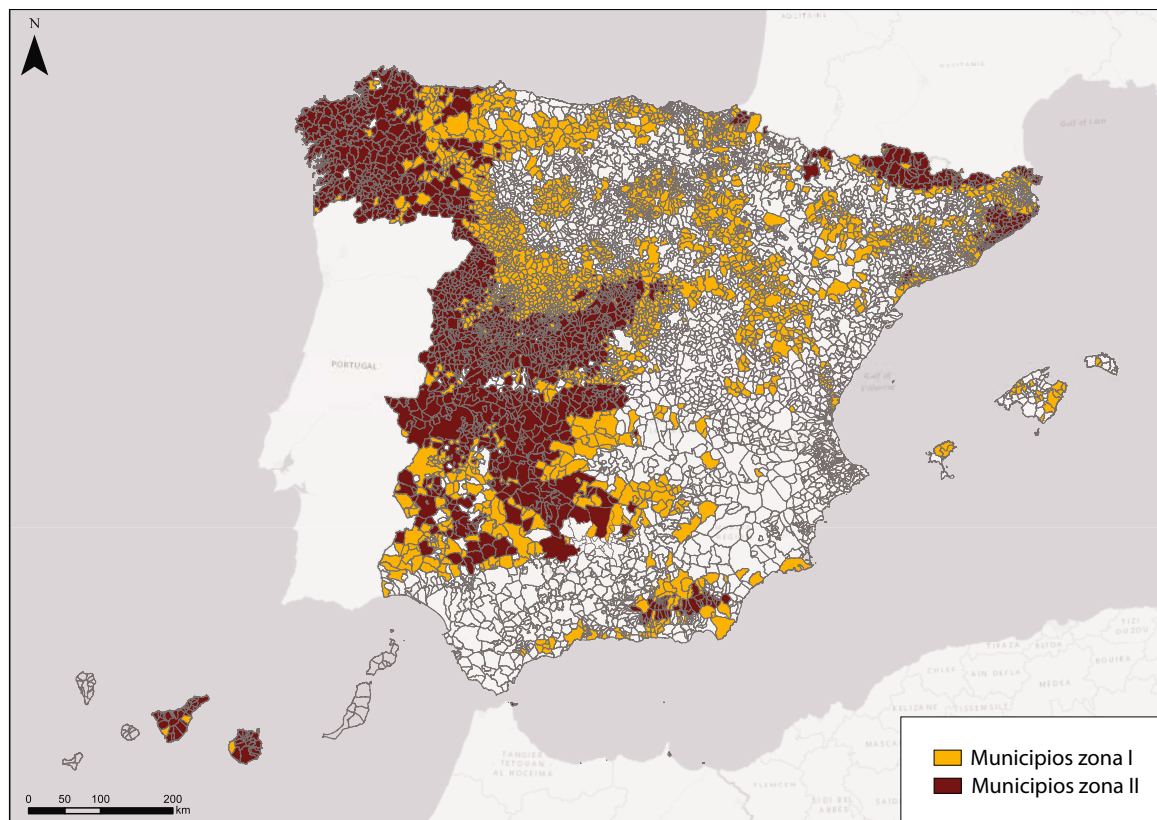
De este modo, se obtuvo la zonificación por municipio establecida en el Apéndice C del *Documento Básico HS Salubridad, sección HS 6, "Protección frente a la exposición al radón"* (DB-HS6), de acuerdo con los siguientes criterios:

- Municipios de zona II: aquellos en los que más de un 5% del tejido urbano se encuentra en áreas con potencial de radón superior a 300 Bq/m³.
- Municipios de zona I: aquellos que, no siendo de zona II, cumplen alguna de las siguientes condiciones:

- Hasta un 5% del tejido urbano se encuentra en áreas con potencial de radón superior a 300 Bq/m³.
- Más de un 5% del tejido urbano se encuentra en áreas con potencial de radón en el rango 200–300 Bq/m³.

El mapa resultante puede verse en la figura 21. El DB-HS6 requiere que, en municipios de nueva planta situados en zona II, todas las edificaciones cuenten con barrera de protección frente al radón y, o bien un espacio de contención ventilado de forma natural o con ventilación forzada, o bien un sistema de despresurización del terreno. Para la zona I se exige que las nuevas edificaciones cuenten con una barrera de protección contra el radón o un espacio ventilado.

Figura 21. Clasificación por municipio establecida en el Documento Básico HS Salubridad – Sección HS 6, "Protección frente a la exposición al radón" (apéndice C)





El Mapa de Potencial de Radón de España identifica, con un criterio homogéneo a lo largo del territorio nacional, las zonas geográficas más expuestas a este gas. La identificación se hace a nivel de formación geológica (a escala 1:200.000). A partir del Mapa de Potencial de Radón, se pueden generar, además, mapas a nivel municipal con el fin de facilitar su aplicación normativa.

La identificación de zonas de actuación prioritaria es necesaria para dar cumplimiento a los artículos

103 y 54 de la directiva 2013/59/Euratom, y se ha utilizado también en el Documento Básico HS Salubridad, sección HS 6 del CTE, para establecer el grado de protección necesario contra el radón en la edificación.

Los mapas generados son una herramienta básica del Plan Nacional contra el Radón y se han puesto a disposición de las Consejerías de Sanidad de las comunidades autónomas, puesto que pueden servir de base para desarrollar sus políticas de prevención y protección contra a este agente cancerígeno.



Los autores de este documento quieren expresar su reconocimiento a las universidades que desde principios de los años 90 han llevado a cabo, mediante acuerdos con el CSN, las campañas de medida de radón en viviendas en las que se basa el Mapa de Potencial de Radón:

- Universidad de Cantabria
- Universidade de Santiago de Compostela
- Universitat Autònoma de Barcelona
- Universidad de Las Palmas de Gran Canaria

- Universitat de València
- Universidad de La Laguna
- Universidad de Extremadura

Asimismo agradecen la valiosa colaboración de Alfonso García Pérez, Catedrático de Universidad de Estadística e Investigación Operativa de la UNED, que supervisó la metodología estadística utilizada en la elaboración del mapa.

Los mapas autonómicos de potencial de radón presentados en el anexo han sido elaborados por la empresa Geomnía.



Arnstein A. (1913). “Über den sogenannten Schneeberger Lungenkrebs”. *Verh Dtsch Ges Pathol*, 16:332–342.

Baeza A., Navarro E. (2003). “Indoor radon levels in buildings in the Autonomous Community of Extremadura (Spain)”. *Rad. Prot. Dosim.*, vol. 103, 3: 263–268.

Barnet I., Pacheroová P., & Neznal M. (2008). “Radon in geological environment – Czech experience”, *Czech Geological Survey Special Papers*, 19:19–28.

Beir IV. (1988). *Health Risks of Radon and Other Internally Deposited Alpha-Emitters: BEIR IV*. The National Academies Press. Washington, DC.

Bossew, P. (2017). “Determination of radon priority areas – a classification problem”. IWEANR 2017. *Second International Workshop on the European Atlas of Natural Radiation*. Verbania.

Cascón M. C., Suárez E., Quindós L., Villaseca C., García D. and Fernández J. A. (2002). “Estimación de la concentración de radón: Proyecto MARNA”. Reunion del Proyecto ERICCA. Suances.

Centro Común de Investigación (JRC) Atlas Europeo de Radiación Natural. Disponible en: <https://remap.jrc.ec.europa.eu/Consent/Atlas.aspx> [10 de mayo de 2019].

Cinelli G., Tondeur F., Dehandschutter B. (2010). “Development of an indoor risk map of the Wallon region of Belgium, integrating geological information”. *Environ. Earth Sci.*, 62:809–819

Consejo de Seguridad Nuclear (2000). “Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural”. *Colección Informes Técnicos*, 5.2000. INT–04–02. Madrid.

Consejo de Seguridad Nuclear (2011). “Instrucción IS-33, de 21 de diciembre de 2011, sobre criterios radiológicos para la protección frente a la exposición a la radiación natural”. *BOE*, n.º 22, 26/01/2012.

Consejo de Seguridad Nuclear (2012). *Guía de Seguridad 11.4: Metodología para la evaluación de la exposición al radón en los lugares de trabajo*, GSG–11.04.

Consejo de Seguridad Nuclear (2013). “El Mapa Predictivo de Exposición al Radón en España”. *Colección Informes Técnicos*. INT–04.31. Madrid.

Darby S., Hill D., Auvinen A., Barros-Dios J. M., Baysson H., Bochicchio F., Deo H., Falk R., Forastiere F., Hakama M., Heid I., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruano-Ravina A., Ruosteenoja E., Schaffrath Rosario A., Tirmarche M., Tomásek L., Whitley E., Wichmann H. E., Doll R. (2005). “Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control”. *BMJ*, 330:223–235.

Darby S., Hill D., Deo H., Auvinen A., Barros-Dios J. M., Baysson H., Bochicchio F., Falk R., Farchi S., Figueiras A., Hakama M., Heid I., Hunter N., Kreienbrock L., Kreuzer M., Lagarde F., Mäkeläinen I., Muirhead C., Oberaigner W., Pershagen G., Ruosteenoja E., Rosario A. S., Tirmarche M., Tomásek L., Whitley E., Wichmann H. E., Doll R. (2006). “Residential radon and lung cancer—detailed results of a collaborative analysis of individual data on 7148 persons with lung cancer and 14,208 persons without lung cancer from 13 epidemiologic studies in Europe”. *Scand J Work Environ Health*, 32, Suppl 1:1–83.

Comisión Europea. Recomendación 90/143/Euratom (1990). “Recomendación de la Comisión de las Comunidades Europeas, de 21 de febrero de 1990, relativa a la protección de la población contra los peligros de una exposición al radón en el interior de edificios”. *Diario Oficial*, n.º L 080, 27/03/1990, pp. 26–28.

Friedmann H., Gröller J. (2010). “An approach to improve the Austrian Radon Potential Map by Bayesian statistics”. *J. Environ. Radioact.* 101: 804–8.

- García-Talavera M., García-Pérez A., Rey C., Ramos L. (2013). "Mapping radon-prone areas using γ -radiation dose rate and geological information". *J. Radiol. Prot.*, 33: 605–620.
- Hahn G. J., Meeker W. K. (2011). "Statistical Intervals: A Guide for Practitioners". Wiley. Nueva York.
- Hewett P. (1995). "Sample size formulae for estimating the true arithmetic or geometric mean of lognormal exposure". *American Industrial Association Journal*, 56(3): 219–225.
- Hurting F. H., Hesse W. (1879). "Der Lungenkrebs, die Bergkrankheit in den Schneeberger Gruben". *Vierteljahrsschr Gerichtl Med Offentl Gesundheitswesen* 30:296-307, 31:102-132, 31:313–337.
- Ielsch G., Cushing M. E., Combes P., Cuney M. (2010). "Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne". *J Environ Radioact*, 101(10):813–20.
- Instituto Geológico y Minero de España (2009). *Mapa Litoestratigráfico, de Permeabilidades e Hidrogeológico de España a escala 1:200.000*.
- Kemski J., Siehl A., Stegemann R., Valdivia-Manchego M. (2001). "Mapping the geogenic radon potential in Germany". *Sci Total Environ*. 272(1–3):217–30.
- Kemski J., Klingel R., Siehl A., Valdivia-Manchego M. (2009). "From radon hazard to risk prediction-based on geological maps, soil gas and indoor measurements in Germany". *Environmental Geology*, 56(7): 1269–1279.
- Krewski D., Lubin J. H., Zielinski J. M., Alavanja M., Catalan V. S., Field R. W., Klotz J. B., Létourneau E. G., Lynch C. F., Lyon J. L., Sandler D. P., Schoenberg J. B., Steck D. J., Stolwijk J. A., Weinberg C., Wilcox H. B. (2005). "Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies". *Epidemiology*, 16: 137–145.
- Krewski D., Lubin J. H., Zielinski J. M., Alavanja M., Catalan V. S., Field R. W., Klotz J. B., Létourneau E. G., Lynch C. F., Lyon J. L., Sandler D. P., Schoenberg J. B., Steck D. J., Stolwijk J. A., Weinberg C., Wilcox H. B. (2006). "A combined analysis of North American case-control studies of residential radon and lung cancer". *J Toxicol Environ Health A*, 69(7):533–97.
- Lubin J. H., Wang Z. Y., Boice J. D. Jr, Xu Z. Y., Blot W. J., De Wang L., Kleinerman R. A. (2004). "Risk of lung cancer and residential radon in China: pooled results of two studies". *Int J Cancer*, 109(1):132–7.
- Miles J. C., Appleton J. (2005). "Mapping variation in radon potential both between and within geological units". *Journal of Radiological Protection*, 25(3):257–76.
- Miles J., Ball K. (1996). "Mapping radon-prone areas using house radon data and geological boundaries". *Environ. Int.* 22: S779–82.
- Mikšová J., Barnet I. (2002). "Geological support to the national radon programme (Czech Republic)". *Bull Geosci.* 77: 13–22.
- Moreno V., Baixeras C., Font Ll., Bach J. (2008). "Indoor radon levels and their dynamics in relation with the geological characteristics of La Garrotxa, Spain". *Radiat. Meas.*, 43, 9–10: 1532–40.
- Nason R., Cohen B. L. (1980). "Correlation between ^{226}Ra in soil, ^{222}Rn in soil gas, and ^{222}Rn inside adjacent houses". *Health Phys.* 52: 73–4.
- Odeh R. E., Owen D. B. (1980). "Tables for Normal Tolerance Limits, Sampling Plans and Screening". Marcel Dekker. Nueva York.
- Organización Mundial de la Salud (2009). "Manual de la OMS sobre el radón en interiores. Una perspectiva de salud pública". Ginebra.

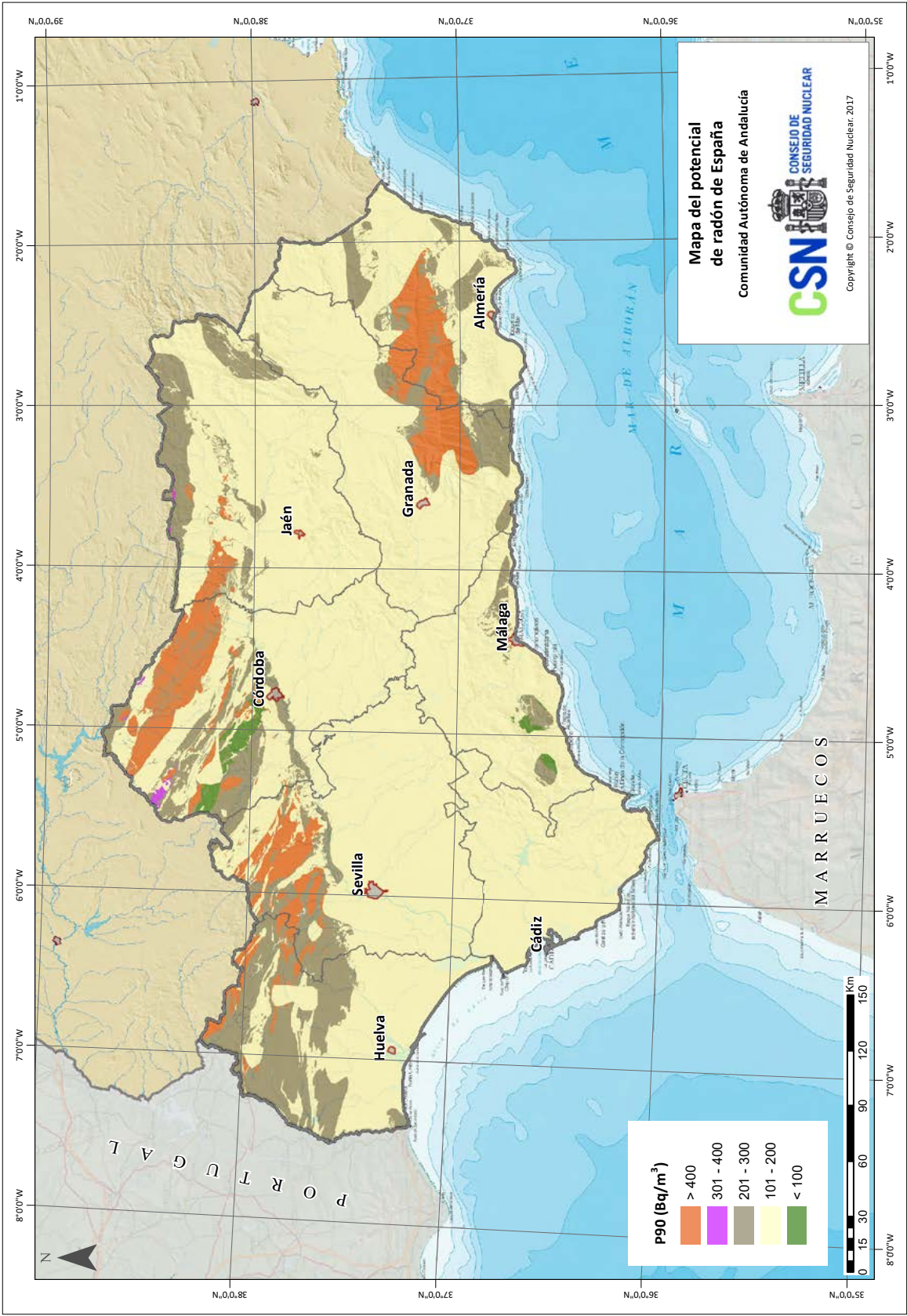
Pérez-Iglesias J. M., Álvarez M. C., Dopico M. T., Garzón L. (1996). “Indoor ^{222}Rn concentrations in Central Asturias”. *Health Physics*, 70 (5): 689–694.

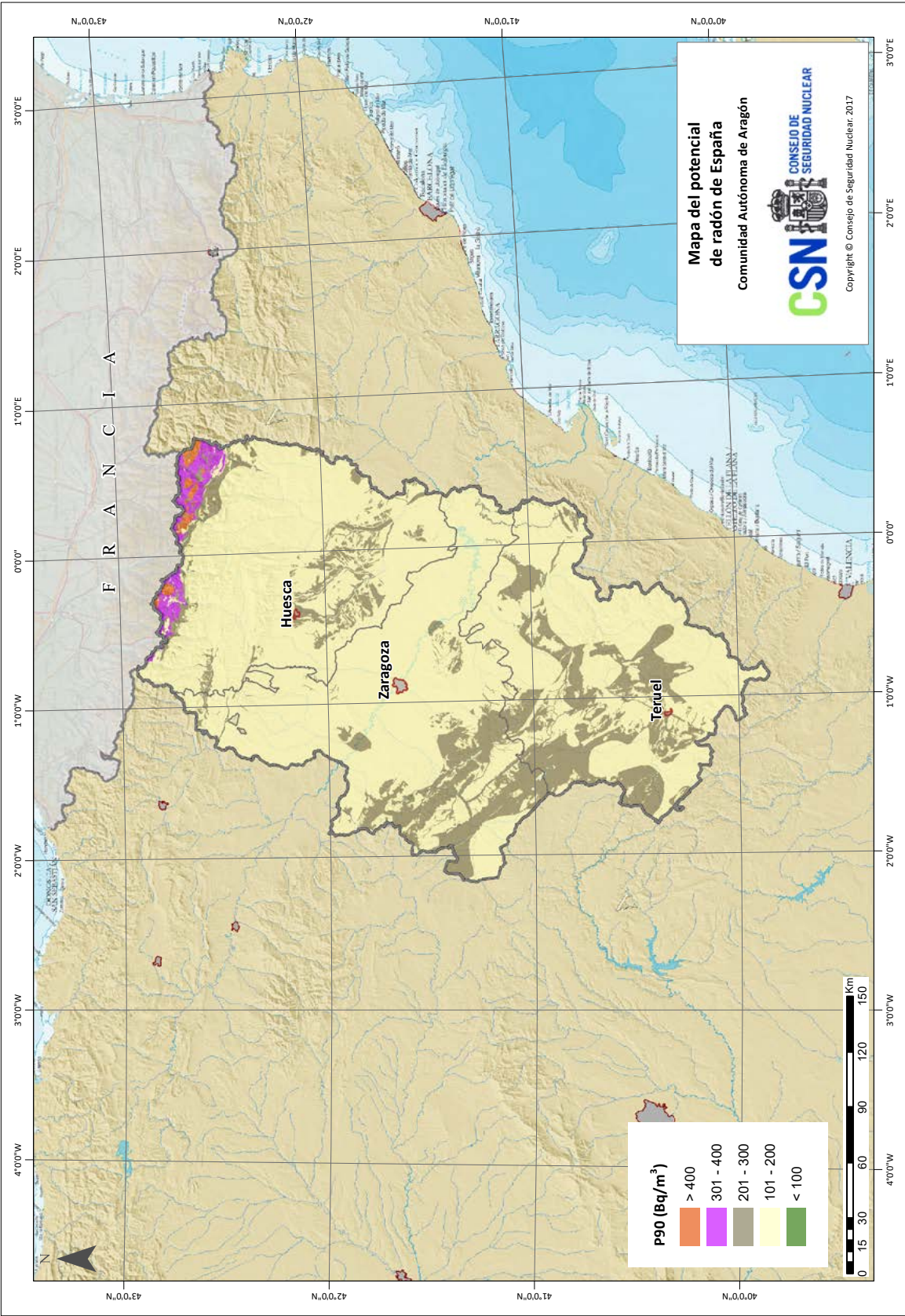
Quindós L. S., Fernández P. L., Sainz C., Fuente I., Nicolás J., Quindós L., Arteché J. (2008) “Indoor radon in a Spanish region with different gamma exposure levels”. *J Environ Radioact*, 99: 1544–47.

RADPAR: Radon Prevention and Remediation Project. Executive Agency for Health and Consumers (EAHC) of DG SANCO (2009 – 2012). Disponible en: <http://web.jrc.ec.europa.eu/radpar/index.cfm> [10 de enero de 2017].

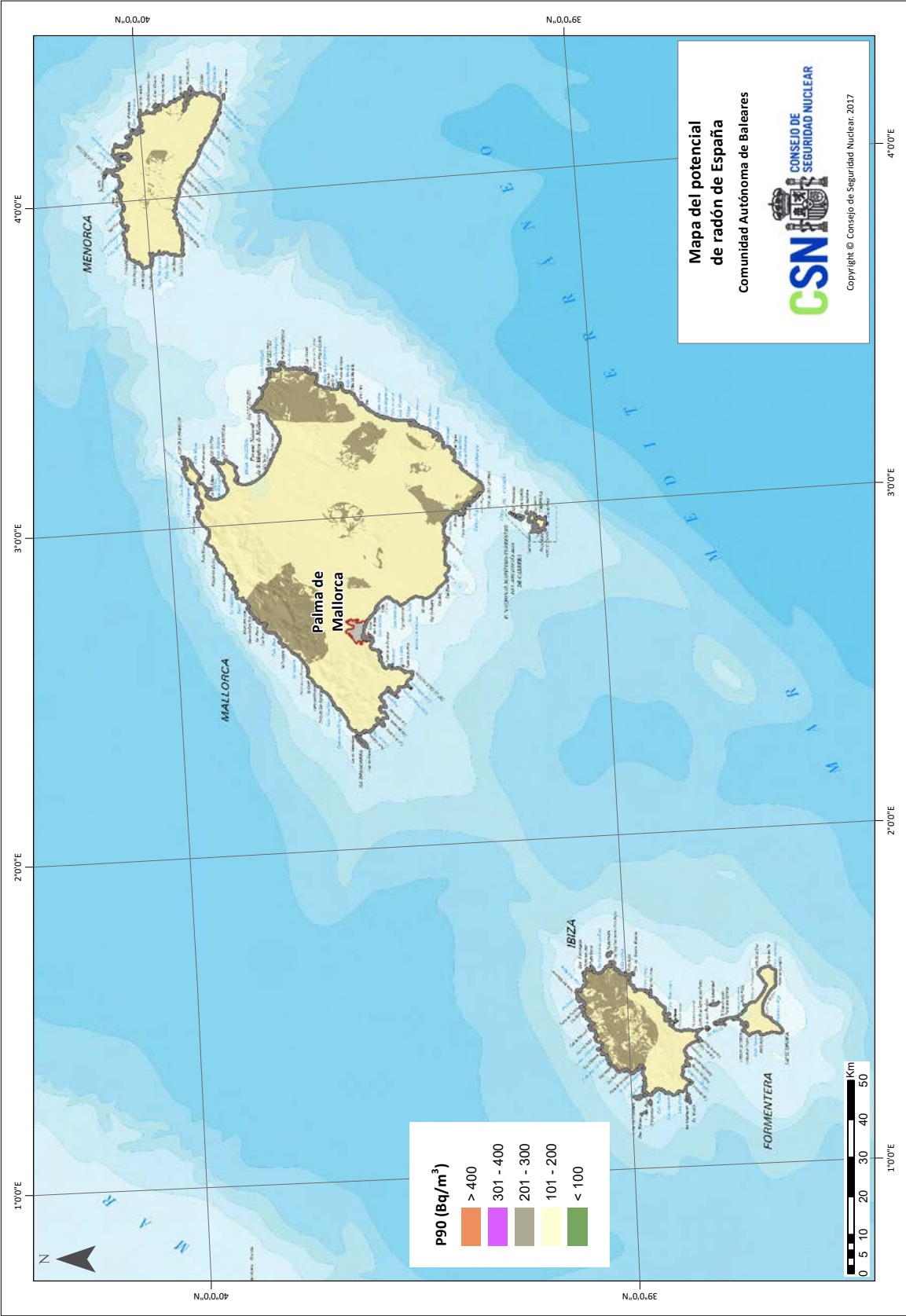
SICE (1980). “Guía estratigráfica internacional: Guía para la clasificación, terminología y procedimientos estratigráficos” Hedberg H. D. Reverté. Barcelona.

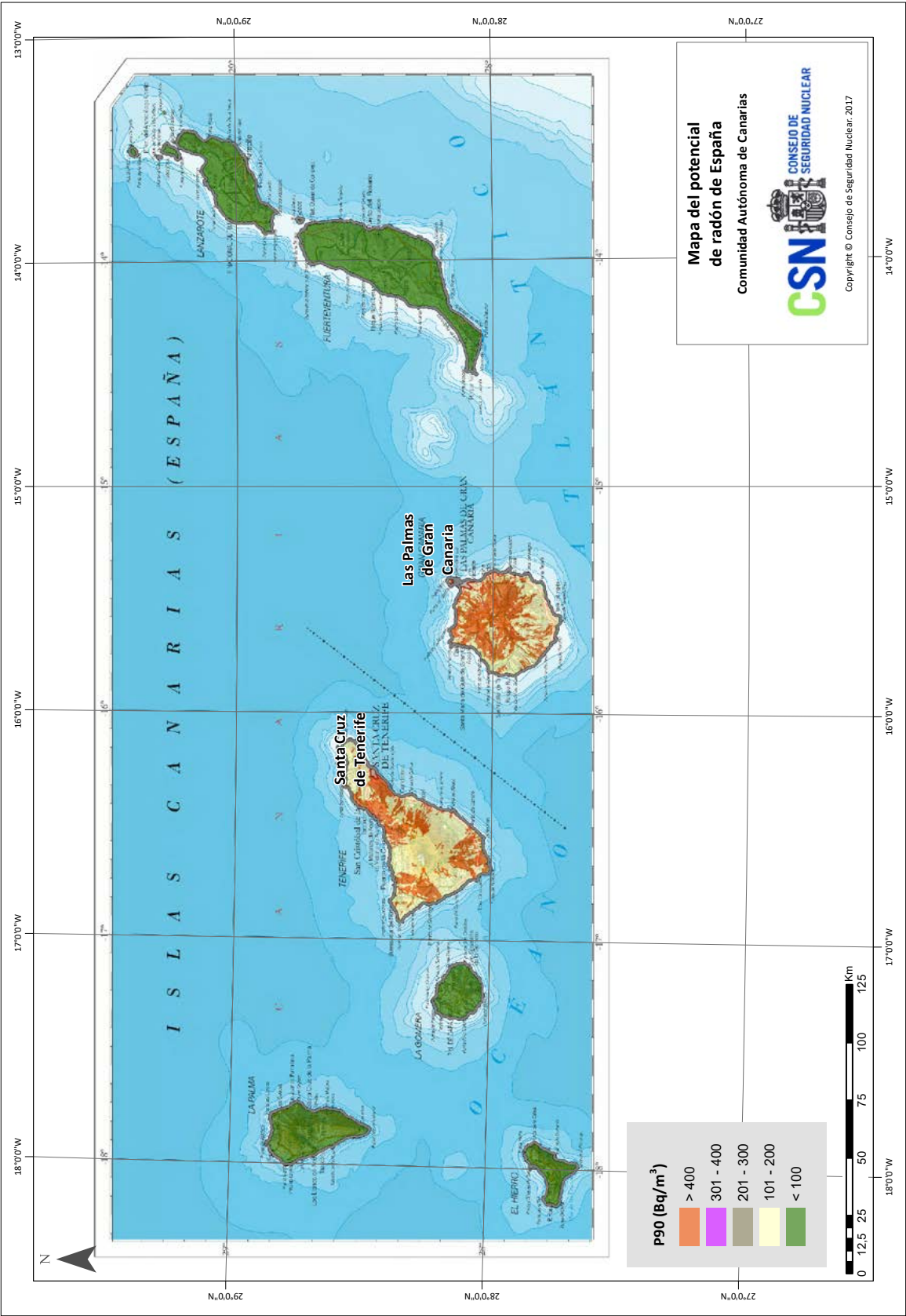


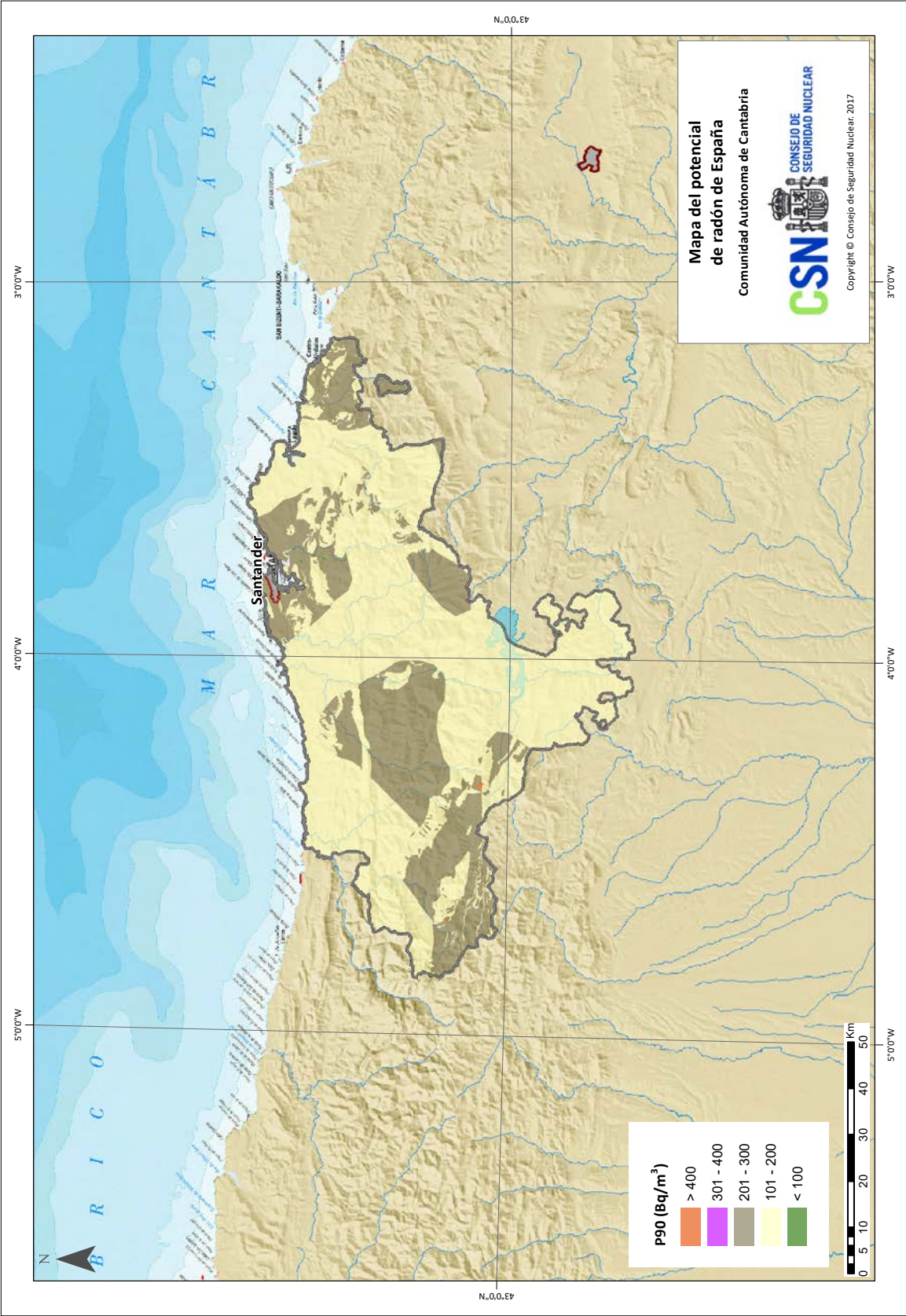


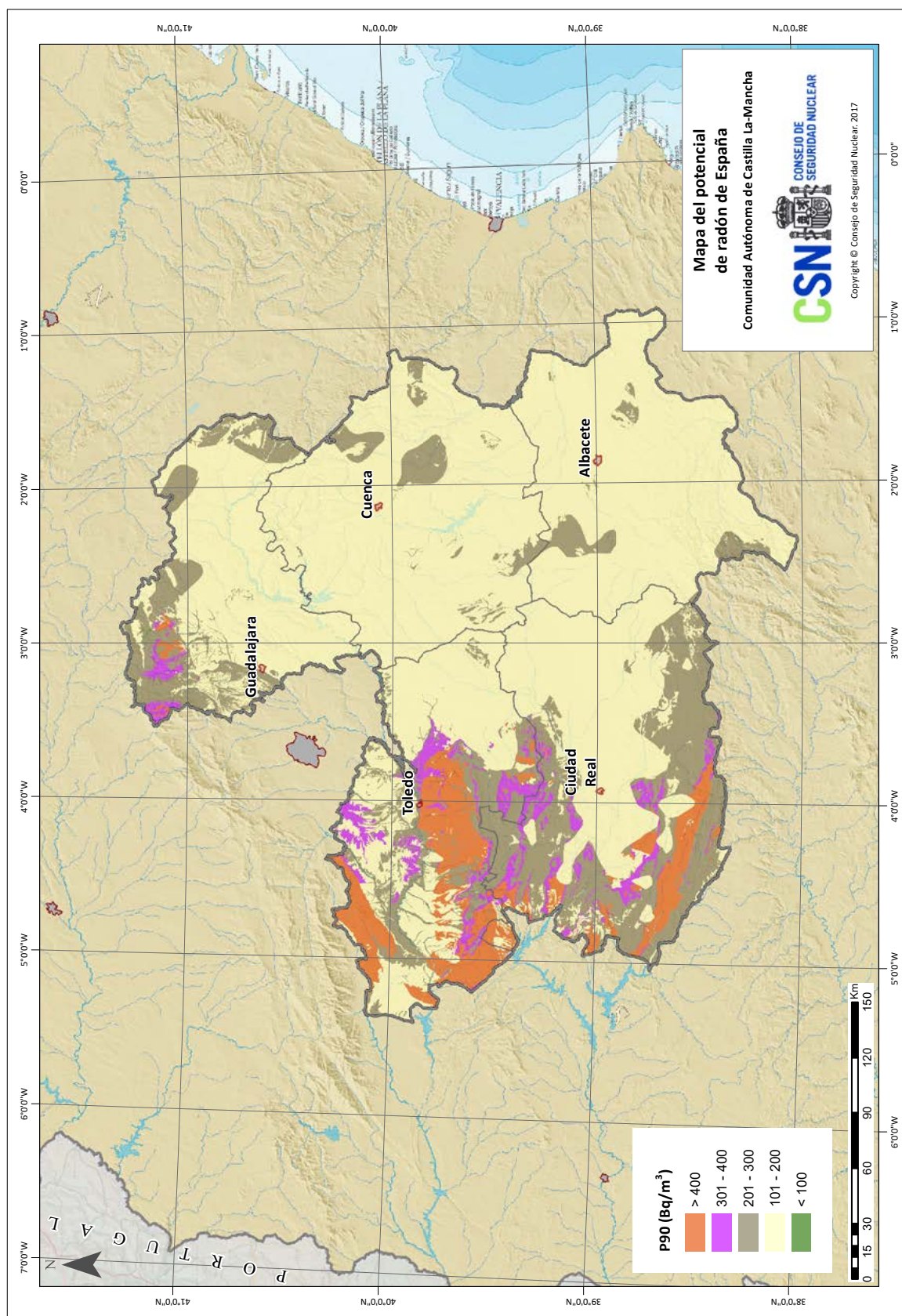


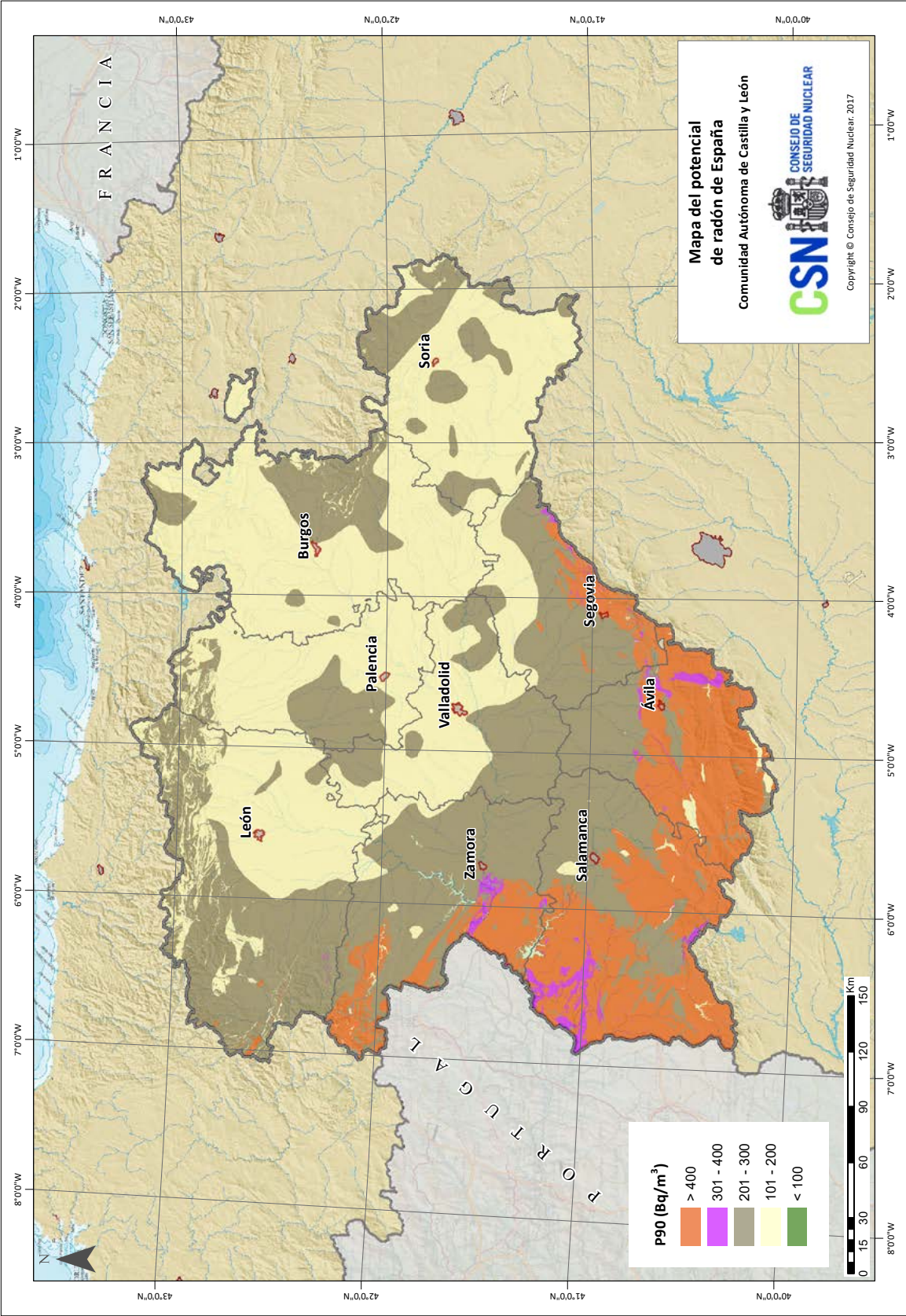


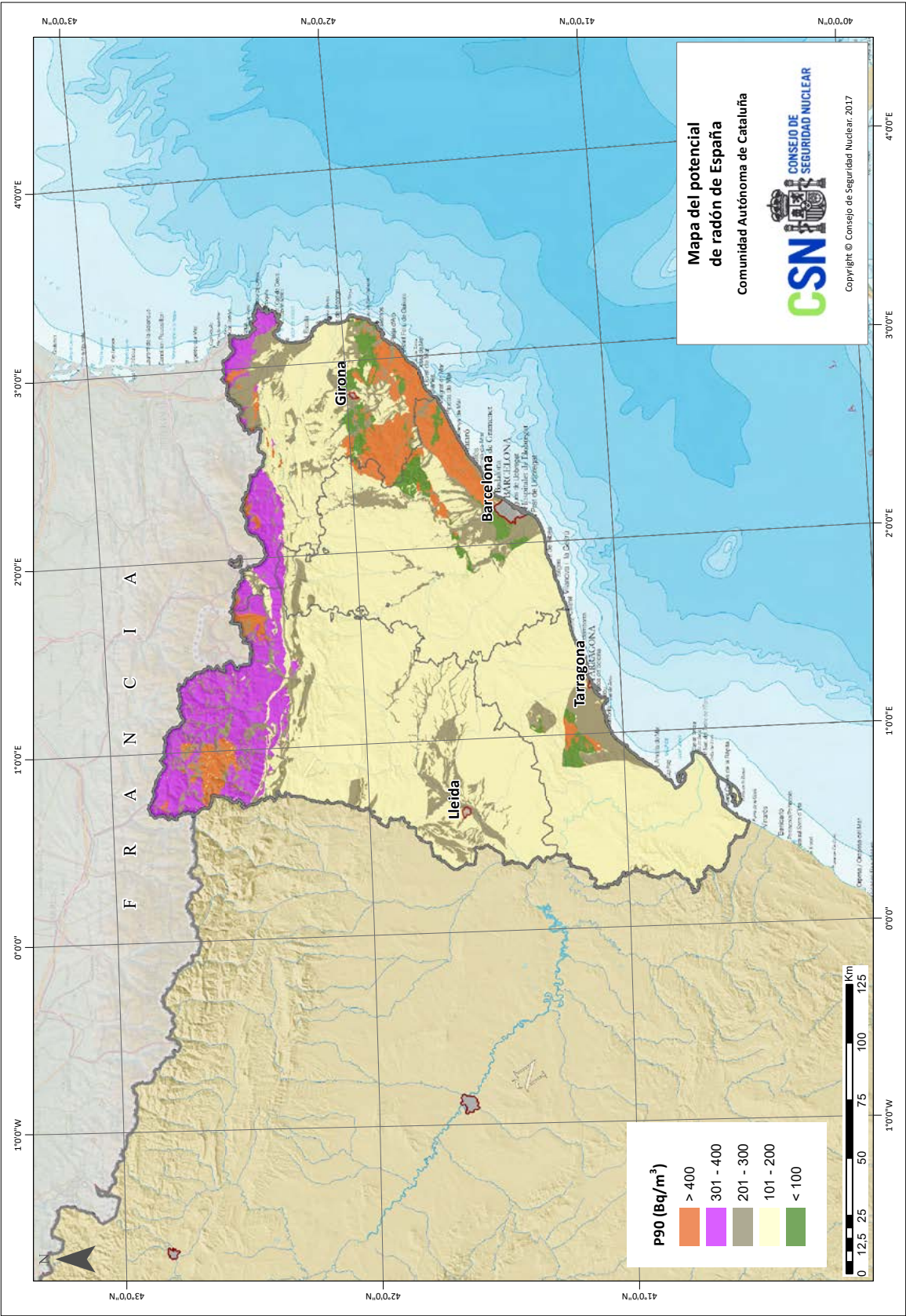


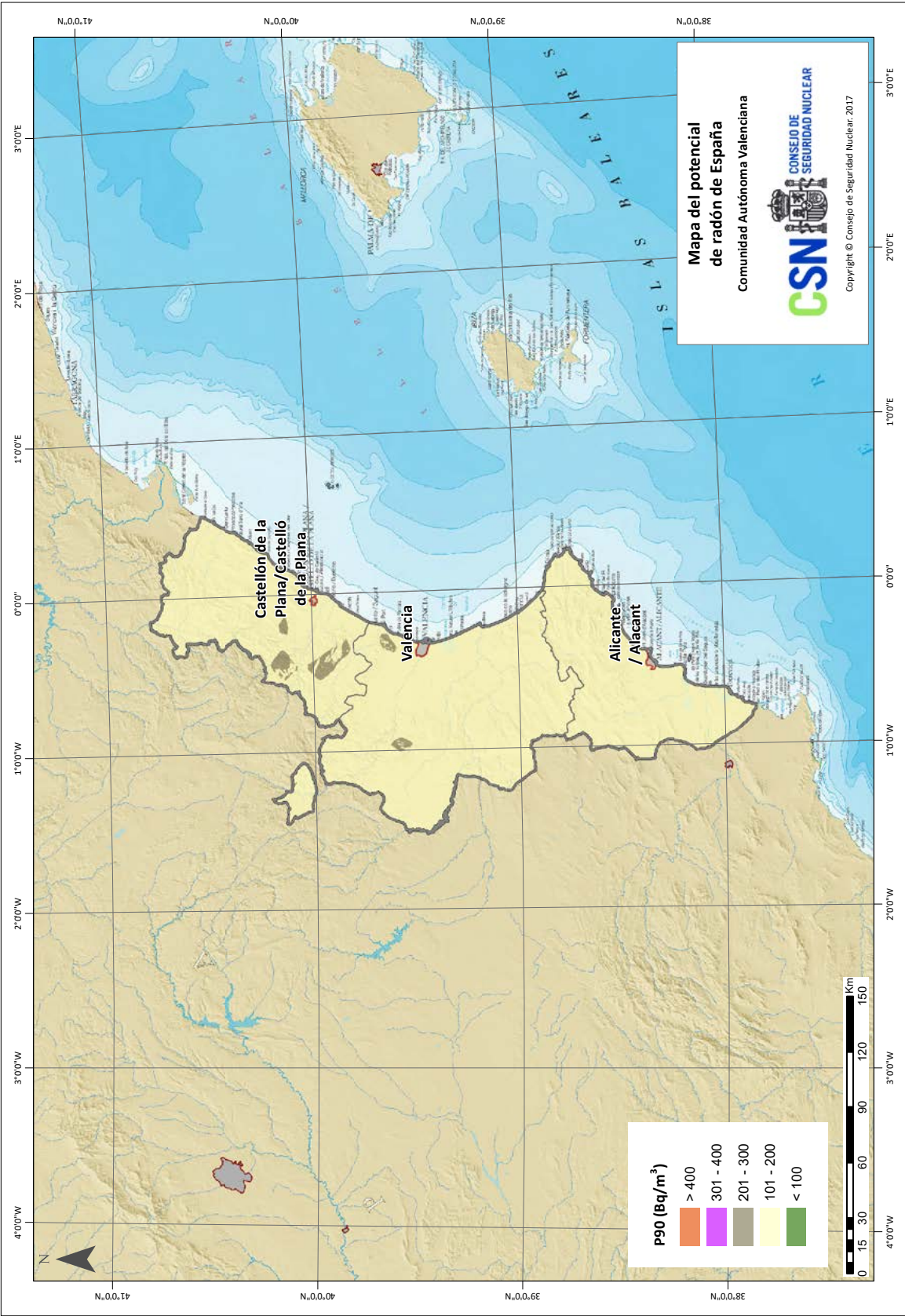






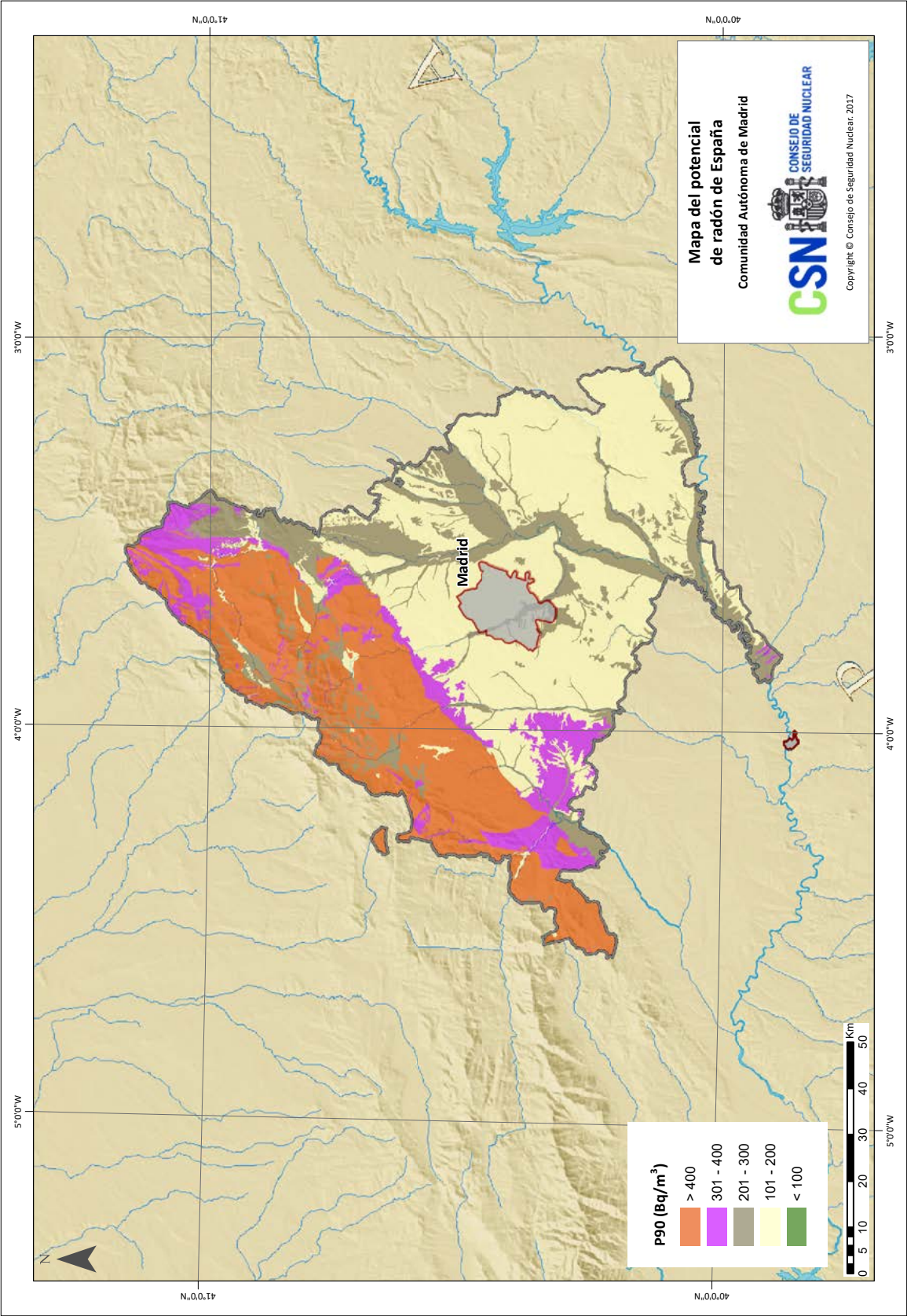


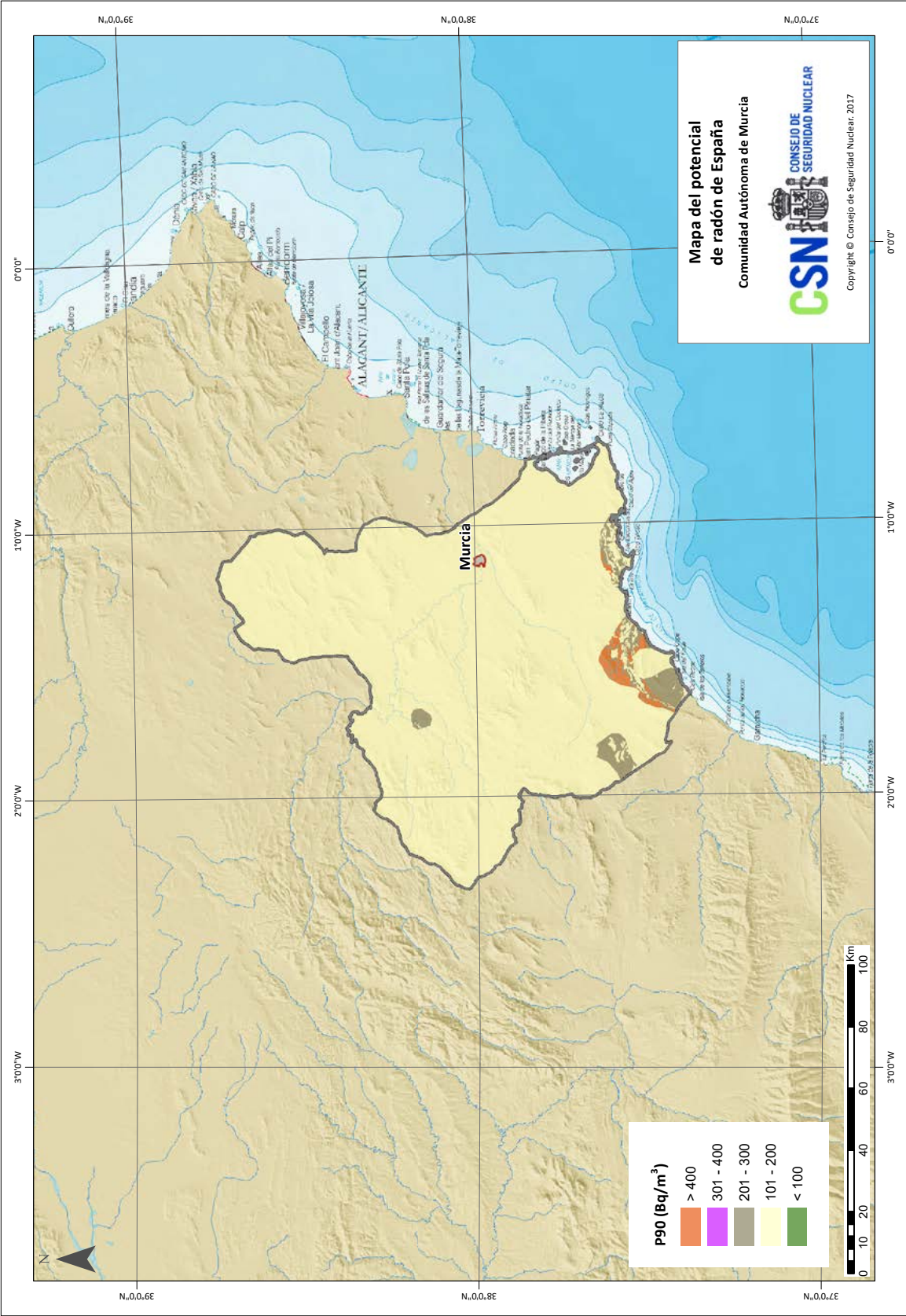


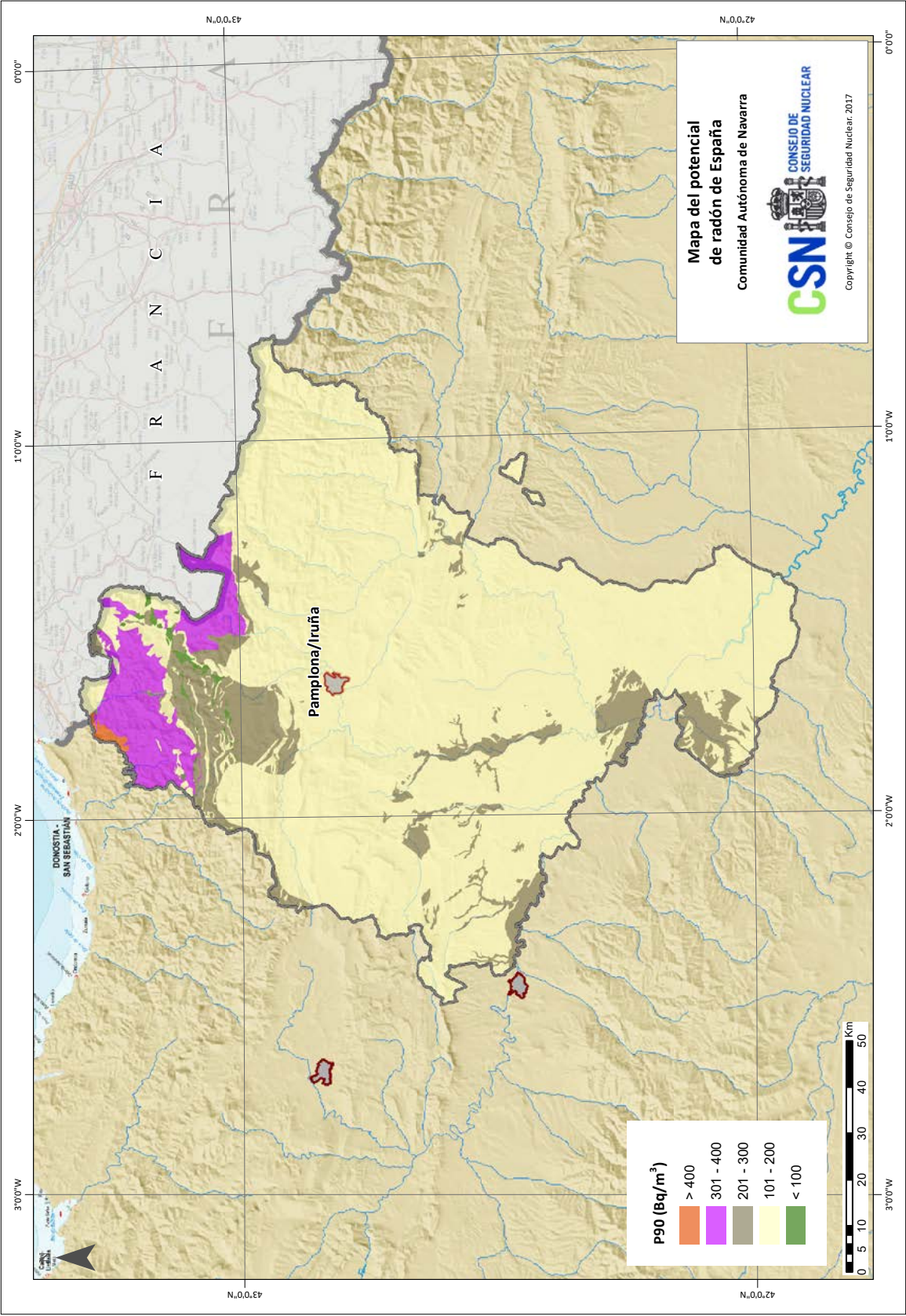




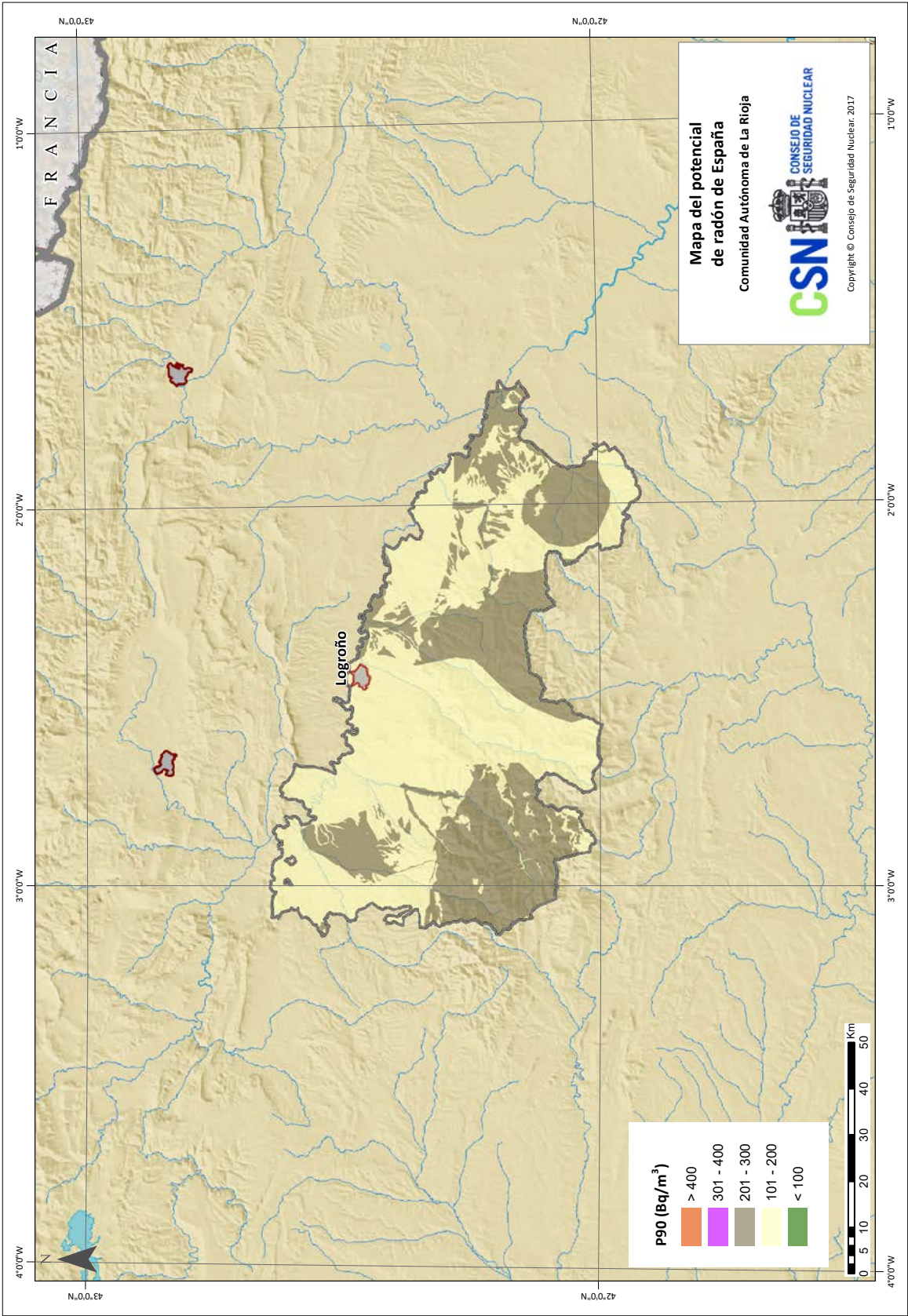
















Cartografía del potencial de radón de España

Colección Informes Técnicos
51.2019