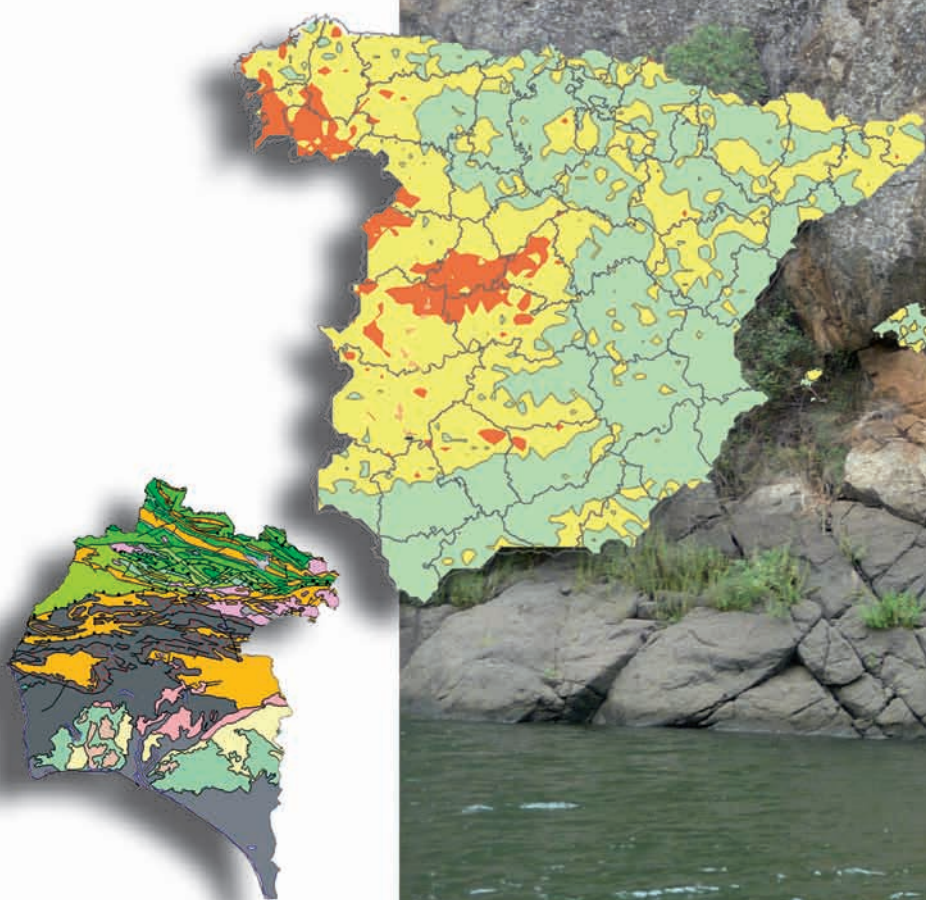


El mapa predictivo de exposición al radón en España

CSN



Colección
Informes Técnicos
38.2013

El mapa predictivo de exposición
al radón en España

El mapa predictivo de exposición al radón en España

Autores: Marta García-Talavera San Miguel
José Luis Martín Matarranz
Roberto Gil de Mingo
Juan Pedro García Cadierno
Enrique Suárez Mahou

Colección
Informes Técnicos
38.2013



Colección Informes Técnicos
Referencia INT-04.31


Los autores agradecen a Carmen Rey del Castillo su disponibilidad y su ayuda con el manejo del programa ArcGis.

© Copyright 2013, Consejo de Seguridad Nuclear

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

Maquetación: base 12 diseño y comunicación, s.l.
Impresión: Grafo, S.A.

Depósito legal: M-1014-2013

Impreso en papel  FSC

Los efectos nocivos del radón para la salud aumentan proporcionalmente a la exposición a este gas. Al dirigir los recursos disponibles prioritariamente a la población más expuesta se consigue no solo proteger a los individuos sometidos a un mayor riesgo sino, en términos globales, una mayor reducción de las dosis por radón que recibe el conjunto de la población (puesto que las concentraciones de radón en viviendas siguen una distribución lognormal).

Para conseguir este objetivo de máxima reducción de dosis es fundamental identificar las zonas o regiones geográficas con mayor probabilidad de albergar viviendas que presenten concentraciones elevadas. Dicha probabilidad se encuentra estrechamente ligada a las características geológicas del terreno.

Con la finalidad de identificar esas zonas se ha desarrollado el mapa predictivo de exposición al radón, que, a partir de la tasa de dosis de radiación gamma ambiental, divide el territorio nacional en tres categorías. Cada una de ellas representa la probabilidad de que los niveles de radón en las viviendas superen un determinado valor. Al tratarse de un mapa predictivo —pese a que su validez se haya contrastado experimentalmente— tiene utilidad para planificar las estrategias de protección a nivel nacional, regional o local, pero no sustituye en ningún caso a las mediciones directas en las viviendas, que son el único indicador fiable del riesgo para la salud de cada individuo.

Sumario

Preámbulo	5
Introducción	9
Bases epidemiológicas de la protección contra la exposición al radón	11
Desarrollo normativo	13
Identificación de zonas con mayor exposición al radón	17
El mapa predictivo de exposición al radón en España	21
Validación experimental del mapa predictivo ..	31
Otros factores correlacionados con el radón en viviendas	35
Referencias bibliográficas	39
Anexo. Mapas provinciales	43

INTRODUCCIÓN



1

El radón (radón-222) es un gas radiactivo natural procedente de la cadena de desintegración del uranio-238 y, por tanto, ubicuo en la naturaleza. La inhalación de radón y de sus descendientes de vida corta constituye la principal fuente de radiación ionizante para la población en general, tres órdenes de magnitud superior a la que representan las centrales nucleares para los habitantes que residen en su entorno (Jiménez *et al.*, 2011). Mientras que el radón no suele presentar niveles altos al aire libre, en las viviendas tiende a acumularse y puede dar lugar a concentraciones muy elevadas, especialmente en zonas con suelos muy permeables o con

un alto contenido de radio-226. Determinadas actividades laborales (como la minería subterránea o la explotación de las aguas termales) pueden conllevar, además, un riesgo significativo de exposición a este gas.

Puesto que la exposición prolongada a niveles elevados de radón implica un grave riesgo para la salud, diversos organismos internacionales, así como un buen número de países, han emitido recomendaciones o normativa de carácter obligatorio con el fin de controlar las exposiciones al radón tanto en las viviendas como en los lugares de trabajo.

BASES EPIDEMIOLÓGICAS DE LA PROTECCIÓN
CONTRA LA EXPOSICIÓN AL RADÓN



2

La vinculación entre la exposición a altas concentraciones de radón y la incidencia de cáncer de pulmón se conoce desde hace décadas. Los primeros datos disponibles en relación con este hecho provenían de los estudios epidemiológicos realizados sobre los mineros del uranio. Posteriormente se identificó que existía también riesgo asociado a concentraciones de radón inferiores, como las que a menudo se encuentran en las viviendas.

A falta de datos suficientes, las estimaciones del riesgo asociado a la exposición doméstica al radón se basaron inicialmente en la extrapolación de los resultados obtenidos para los mineros. Esta extrapolación tenía una serie de limitaciones, entre las que destacan las siguientes:

- La ausencia de datos referentes a mujeres y niños en la cohorte de mineros.
- Las incertidumbres en el efecto sobre la salud de la tasa de dosis.
- La falta de datos sobre hábitos de tabaquismo en la mayoría de los estudios.
- El control inadecuado de otras variables que inducen a confusión (como la exposición a la radiación gamma o a los aerosoles en suspensión).

Por tanto, con el objeto de evaluar específicamente el riesgo de cáncer asociado a la exposición al radón en las viviendas, a partir de los años ochenta se emprendieron diversos estudios epidemiológicos de distinto

alcance. En ellos se ha puesto de manifiesto que el riesgo asociado a las exposiciones domésticas es más elevado que el predicho por extrapolación a partir de la cohorte de mineros.

En definitiva, desde 1998 el radón y sus productos de desintegración están reconocidos como carcinógenos humanos del Grupo 1 por la Agencia Internacional de Investigación del Cáncer (IARC) de la Organización Mundial de la Salud (OMS). El modelo vigente de riesgo carcinogénico adoptado internacionalmente para el radón es, al igual que para la exposición a radiaciones ionizantes en general, el *modelo lineal sin umbral*. Según las principales referencias en este campo —los metanálisis (*pooled studies*) de Europa (Darby *et al.*, 2005), China (Lubin *et al.*, 2005) y Norteamérica (Krewski *et al.*, 2005)—, un incremento de 100 Bq m⁻³ en la concentración media de radón en una vivienda conlleva un aumento del 10% en la probabilidad de padecer cáncer de pulmón.

Por otro lado, hay indicios, aún no suficientemente contrastados, de otros posibles efectos del radón (aumento del riesgo cardiovascular, alteraciones del sistema inmune, etc.) y de la particular susceptibilidad de determinados grupos de población.

Aunque no se han realizado suficientes estudios en niños, no puede descartarse que estos sean más sensibles que los adultos en cuanto a la exposición al radón. Varios estudios epidemiológicos de tipo ecológico han encontrado asociaciones entre la concentración de radón y la leucemia infantil (Raaschou-Nielsen, 2008).

DESARROLLO NORMATIVO



3

En este capítulo se resume la situación normativa actual, tanto internacional como nacional, con respecto al control de la exposición al radón.

1. Las nuevas recomendaciones internacionales

Motivada por las nuevas evidencias epidemiológicas sobre la exposición doméstica al radón, la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) emitió en noviembre de 2009 un comunicado (*ICRP Statement on Radon*) que recogía sus nuevas recomendaciones al respecto. Según estas, el coeficiente de riesgo se incrementa en un factor de aproximadamente dos con respecto al propuesto en la Publicación 65 (ICRP, 1993). En consecuencia, la ICRP propone sustituir el antiguo valor de 600 Bq m^{-3} de concentración media anual, establecido como límite superior del intervalo de concentración para fijar niveles de referencia en viviendas, por un nuevo valor de 300 Bq m^{-3} (correspondiente, de acuerdo con las estimaciones más recientes, a una dosis de 18 mSv). Suponiendo un factor de permanencia en los lugares de trabajo igual a 1/3 del de las viviendas, la ICRP sugiere un valor de 1.000 Bq m^{-3} para definir aquellas exposiciones laborales al radón que deben considerarse dentro del sistema de protección radiológica ocupacional.

Además, es importante destacar que el concepto de “nivel de referencia”, que ya se introdujo en las recomendaciones de la ICRP de 2007 (Publicación 103), difiere del “nivel de actuación” utilizado en la Publicación 65: el “nivel de referencia” representa un valor de dosis o de riesgo por encima del cual se considera inadecuado permitir ninguna exposición, y por debajo del cual debe aplicarse el principio de optimización. Antes, en cambio, solo se instaba a emprender acciones cuando se superaba el “nivel de actuación”.

Los nuevos *Basic Safety Standards* (BSS) del OIEA (OIEA, 2011) y el proyecto final de los BSS de la Unión Europea (EC, 2011) adoptan el nuevo enfoque de la ICRP, tanto en el concepto de nivel de referencia como en los valores numéricos propuestos para viviendas (300 Bq m^{-3}) y puestos de trabajo (1.000 Bq m^{-3}).

También a partir de los recientes descubrimientos acerca de los efectos sobre la salud de este agente cancerígeno, la OMS lanzó un proyecto internacional que culminó con la publicación de un documento (*WHO Handbook on indoor radon*, 2009). Entre sus principales conclusiones, recomienda fijar niveles de referencia nacionales de 100 Bq m^{-3} o, en caso de que este valor no se considere factible por las particularidades del país, de 300 Bq m^{-3} .

2. Desarrollo normativo en España

La protección contra las exposiciones a la radiación natural no vinculadas con el ciclo del combustible nuclear se incluyó por primera vez en la legislación española mediante el Real Decreto 783/2001, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes (RPSRI), modificado por el Real Decreto 1439/2010, de 5 de noviembre. En concreto, el título VII del Real Decreto 783/2001 trata la exposición de los trabajadores a las fuentes naturales de radiación, destacando específicamente las exposiciones al radón (radón-222) y a sus productos de desintegración.

El artículo 62 del título VII establece lo siguiente:

Los titulares de las actividades laborales, no reguladas en el artículo 2.1, en las que existan fuentes naturales de radiación, deberán declarar estas actividades ante los órganos competentes en materia de industria de las comunidades autónomas en cuyo territorio se realizan estas actividades laborales y realizar los estudios necesarios a fin de determinar si existe un incremento significativo de la exposición de los trabajadores o de los miembros del público que no pueda considerarse despreciable desde el punto de vista de la protección radiológica.

Las disposiciones del RPSRI se complementan con la Instrucción 33 (IS-33) del CSN, que recoge un nivel de referencia de 600 Bq m^{-3} de concentración media

anual de radón-222 en aire para lugares de trabajo, así como una relación de las prácticas y actividades laborales que deben llevar a cabo, de manera obligatoria, estudios radiológicos sobre las exposiciones al radón a las que dan lugar. Estas prácticas laborales son, en concreto, las que se desarrollan en:

- Lugares de trabajo subterráneos (incluidos aparcamientos públicos, metro, minas en explotación, minas-museo y cuevas turísticas, etc.).
- Lugares de trabajo en los que se exploten o traten aguas de origen subterráneo (como las plantas potabilizadoras de aguas de este origen o los establecimientos termales).
- Todos los lugares de trabajo situados en zonas identificadas. Estas zonas, que definirá en un futuro el CSN, son a priori aquellas que por sus características geológicas puedan generar cantidades elevadas de radón o favorecer su transporte al interior de lugares cerrados; por ejemplo, las zonas graníticas, volcánicas o de fallas activas.

El nivel de referencia para puestos de trabajo se interpreta, además, como un nivel de entrada al sistema de protección radiológica ocupacional. Para aquellos lugares de trabajo en los que se demuestre que no es razonablemente posible reducir las concentraciones de radón por debajo del nivel de referencia, las exposiciones al radón se tratarán como exposiciones ocupacionales y, por tanto, se les aplicarán los límites de dosis del Reglamento de Protección Sanitaria contra Radiaciones Ionizantes.

La protección contra el radón en viviendas se aborda asimismo en la Guía de Seguridad 11.02 del CSN. En ella se recomienda un nivel de referencia nacional de 300 Bq m^{-3} de concentración media anual de radón, y un nivel objetivo de diseño para edificios de nueva planta o para viviendas en las que vayan a acometerse acciones de mitigación de 100 Bq m^{-3} . A los edificios de uso público de larga estancia (como hospitales, residencias, etc.) les aplica el mismo nivel de referencia que a las viviendas, al igual que a los centros de educación infantil, primaria y secundaria (IS-33), con la finalidad de proteger especialmente a los niños.

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS
CON MAYOR EXPOSICIÓN AL RADÓN



Las concentraciones de radón (radón-222) en una vivienda, o en un edificio en general, varían de manera sustancial con la situación geográfica. Dado el gran número de factores implicados, es muy difícil predecir si los niveles de este gas serán elevados en una vivienda concreta; en cambio, sí es posible hacer predicciones fiables sobre las zonas en las que hay mayor probabilidad de encontrar viviendas con concentraciones altas de radón.

Sin duda, el método más directo y fiable para identificar estas zonas es la elaboración de mapas a partir de mediciones de la concentración de radón en el aire interior de las viviendas. No obstante, con independencia del parámetro estadístico que se represente localmente (media geométrica, percentil 75, etc.), este método requiere una densidad considerable de medidas en todo el territorio, de manera que se consiga una cuadrícula suficientemente fina y un número de datos en cada casilla suficiente para que el error muestral no supere un valor prefijado.

Por esta razón se han desarrollado métodos indirectos que utilizan otras magnitudes correlacionadas con la concentración de radón en las viviendas. Puesto que la principal fuente de radón en un edificio es, por lo general¹, el terreno sobre el que este se asienta, la concentración de radón en la fase gaseosa del suelo constituye un buen indicador. Esta variable depende a su vez de los contenidos en radio-226 del suelo y de la roca subyacente, así como del grado de fracturación o de meteorización de la formación rocosa y de la permeabilidad del suelo. No obstante, también está influida por factores ambientales, como la presión barométrica o la humedad que, por su variabilidad, no suelen incluirse como indicadores.

¹ Los materiales de construcción o el radón disuelto en el agua corriente pueden constituir en ocasiones fuentes importantes de radón en el aire interior de una vivienda, pero en España estas situaciones son muy improbables (J.L.M. Matarranz, 2004).

La mayor parte de los métodos indirectos para identificar las zonas propensas a presentar viviendas con valores de radón elevados utilizan precisamente la concentración de radón en el suelo, a veces combinada con otros parámetros.

Figura 4.1. Instrumentación para medir la concentración de ²²²Rn en la fase gaseosa del suelo



En particular, Suecia ha desarrollado mapas basados en la medida del denominado *potencial geogénico de radón* (que indica el nivel de riesgo de los edificios, estimado a partir de la concentración de radón-222 en el terreno a 1 m de profundidad). Los terrenos con valores inferiores a 10 kBq m⁻³ se consideran de bajo riesgo; los que arrojan valores comprendidos entre 10 y 50 kBq m⁻³, de riesgo intermedio; y los que tienen más de 50 kBq m⁻³, de riesgo alto (Duval 1991; Tanner 1991). La baja permeabilidad del suelo puede rebajar en un nivel la categoría de riesgo asociada, mientras que lo opuesto ocurre con suelos muy permeables.

El mapa alemán (Kemski, *et al.*, 2001) también se ha elaborado utilizando el potencial geogénico de radón,

calculado a partir del contenido de radón-222 a 1 m de profundidad y de la permeabilidad del terreno (tabla 4.1).

Tabla 4.1. Clasificación alemana del potencial geogénico de radón en función de la concentración de ^{222}Rn (CRn) a 1 m de profundidad en el terreno y de la permeabilidad de este

Permeabilidad (m^2)	CRn* (kBq m^{-3})				
	≤ 10	10–30	30–100	100–500	>500
$10^{-16} < k \leq 10^{-14}$	1	1	2	3	6
$10^{-14} < k \leq 10^{-12}$	1	2	3	4	6
$10^{-12} < k \leq 10^{-10}$	1	3	4	5	6

* CRn se obtiene como la media aritmética de tres medidas adyacentes.

En estas mismas variables se fundamenta el método checo (tabla 4.2) para determinar el riesgo de radón (denominado índice de radón, *IR*) asociado a los terrenos en los que se pretende edificar (Neznal, *et al.*, 2004).

Asimismo se ha comprobado la utilidad de métodos basados en otras variables, como la concentración de radio-226 en el suelo o el equivalente de uranio (*eU*). En el caso de Francia, por ejemplo, el mapa nacional se ha elaborado a partir de mapas geológicos y del contenido medio en uranio de cada unidad geológica (Ielsch, *et al.*, 2010)

Tabla 4.2. Método aplicado en la República Checa para la determinación de la categoría de un terreno en función de la concentración de ^{222}Rn en el suelo medida a 0,8 m de profundidad (CRn) y de la permeabilidad

CRn* (kBq m^{-3})				Categoría riesgo
Permeabilidad baja < $4 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$	Permeabilidad media $4 \cdot 10^{-13}$ - $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$	Permeabilidad alta > $4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$		
<30	<20	<10		Baja
30–100	20–70	10–30		Media
>100	>70	>30		Alta

* CRn se obtiene como el percentil 75 de los valores medidos.

EL MAPA PREDICTIVO DE EXPOSICIÓN
AL RADÓN EN ESPAÑA



Una de las más valiosas fuentes de información radiológica ambiental que existen en España es el mapa Marna (Suárez, *et al.*, 2000). El Marna evalúa la tasa de exposición a la radiación gamma terrestre de origen natural referida a 1 metro de altura sobre el nivel del suelo. El número de medidas que integran el mapa se ha ido ampliando a lo largo de diversas fases, llevadas a cabo entre los años 1991 y 2004. Aunque existen mapas más detallados de algunas zonas del país, el actual mapa a escala nacional se ha obtenido sobre valores promediados en cuadrículas de 7 x 5 kilómetros. La última fase de este proyecto, ahora en marcha, es una ampliación que incluye las islas Baleares y Canarias, así como las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, y se ha ido acometiendo mediante acuerdos de colaboración con distintas universidades.

Puesto que la red de medidas de radón en viviendas con la que se cuenta en este momento en España no es lo suficientemente densa, el Marna ofrece una buena alternativa para elaborar un mapa predictivo de exposición al radón, ya que, como se expondrá en los siguientes apartados, las tasas de radiación gamma ambiental pueden correlacionarse con el contenido de ^{226}Ra en el suelo, y este, a su vez, con la concentración máxima de radón en los edificios.

1. Correlación de la tasa de radiación gamma con la concentración de radio-226

Para el desarrollo del mapa predictivo de radón, se calculó, en primer lugar, la tasa de exposición (T_{Ra}) que produce, a una distancia de 1 m sobre el suelo; un suelo infinito con una concentración homogénea de 1 Bq kg⁻¹ de radio-226 (CRa). La relación obtenida, utilizando el código Microshield 5.0.5 es la siguiente:

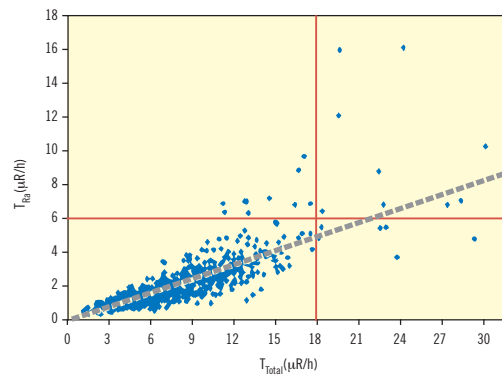
$$T_{Ra} = 0,051 CRa \quad (5.1)$$

donde T_{Ra} se mide en $\mu\text{R h}^{-1}$ y 0,051 es el factor de conversión de actividad a tasa de exposición ($\mu\text{R h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}$).

Por otra parte, se determinó a partir de medidas experimentales tomadas en la península, la relación entre la tasa de exposición gamma total (T_{Total}) medida a 1 m sobre el nivel del suelo con la tasa de exposición gamma debida únicamente al radio-226, ambas en $\mu\text{R h}^{-1}$. Existe entre ellas una relación lineal ($R^2=0,74$) —ver figura 5.1— de acuerdo con la siguiente expresión:

$$T_{Ra} = 0,2703 T_{total} - 0,1219 \quad (5.2)$$

Figura 5.1. Regresión lineal entre la tasa de exposición gamma total y la tasa de exposición debida únicamente al ^{226}Ra



Según las ecuaciones 5.1 y 5.2, la concentración de radio-226 del suelo puede estimarse a partir de la tasa de exposición gamma total (representada en el Marna) según la siguiente expresión:

$$CRa = 5,3 T_{total} - 2,39 \quad (5.3)$$

2. Predicción de la concentración de radón máxima esperable en viviendas

La aplicabilidad de un modelo teórico para simular el transporte de radón depende en gran medida de las características geomorfológicas del terreno. El transporte difusivo describe adecuadamente la migración de radón de un suelo insaturado a la atmósfera.

En razón de este mecanismo, los átomos de radón se desplazan en función de los gradientes de concentración hacia los lugares donde la concentración es más baja. Por otro lado, los gradientes de presión creados en los fluidos —fases acuosa o gaseosa— que rellenan los poros y fisuras de un terreno dan lugar a flujos convectivos (verticales) y advectivos (laterales).

La presencia de un edificio genera pequeños gradientes de presión que hacen de la convección y la advección los principales mecanismos de entrada cuando los materiales del terreno son muy permeables, mientras que la difusión predomina en los limosos y arcillosos, poco permeables (el valor de corte para la permeabilidad está situado en torno a 10^{-11} m² según Nazaroff y Sextro, 1989).

No obstante, diversos modelos que suelen aplicarse con fines reguladores (como el del código RESRAD o el de la publicación RP-122) no consideran la convección/advección —ver tabla 5.1— por lo que, al aplicar un código, debe verificarse que tanto los parámetros de entrada como el modelo describan adecuadamente la situación experimental.

Tabla 5.1. Valores calculados de la concentración de ²²⁶Ra en un suelo que daría lugar a una concentración de radón en viviendas de 300 Bq m⁻³

	RESRAD 2.6	RP-122	UNSCEAR (2000)
C_{Ra} (Bq kg ⁻¹)	143	254	200

Se han aplicado distintos modelos, utilizando los valores por defecto para todos los parámetros que intervienen en el cálculo. El modelo de la publicación RP-122 es idéntico al del UNSCEAR (2000), pero sin considerar la contribución por advección/convección.

En este caso, para relacionar las concentraciones de radio-226 en el suelo con las concentraciones potenciales de gas radón-222 en las viviendas se ha utilizado el mismo modelo matemático que aplica RESRAD (Yu *et al.*, 2001), cuyos fundamentos se exponen a continuación.

Suponiendo un sólido horizontalmente infinito y homogéneo, y despreciando el transporte convectivo,

el flujo unidireccional de un gas en un medio poroso se relaciona con el gradiente de la concentración de dicho gas en los poros del medio mediante la ley de Fick:

$$J = nD \frac{dC}{dz} \quad (5.4)$$

siendo J la tasa de emanación del gas (Bq m⁻² s⁻¹), n la porosidad del medio, D el coeficiente de difusión del gas en el sólido (m² s⁻¹), C la concentración del gas en los poros (Bq m⁻³) y z la distancia en la dirección de la difusión (m).

Teniendo en cuenta que el radón-222 es un gas radiactivo, que se desintegra con una constante de desintegración λ (s⁻¹), la concentración de radón-222 en un suelo se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$\frac{d(nC)}{dt} = -\frac{dJ}{dz} - n\lambda C + nQ \quad (5.5)$$

donde Q es el término fuente de ²²²Rn dentro de los poros del suelo por unidad de volumen y unidad de tiempo (Bq m⁻³ s⁻¹) y t el tiempo (s).

Utilizando la ecuación 5.4 obtenemos:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{dC}{dz} \right) - \lambda C + Q \quad (5.6)$$

En un estado estacionario, la ecuación (5.6) se puede expresar de la siguiente forma:

$$-\frac{d}{dz} \left(D \frac{dC}{dz} \right) + \lambda C = Q \quad (5.7)$$

La tasa de generación de ²²²Rn en la fase gaseosa del terreno depende de la concentración de su padre, el ²²⁶Ra, (CRa) y puede calcularse a partir de la siguiente expresión:

$$Q = \frac{E \rho CRa \lambda}{n} \quad (5.8)$$

siendo E el coeficiente de emanación del radón (adimensional) y ρ la densidad seca del suelo (kg m^{-3}).

El coeficiente de emanación E representa la fracción de radón-222 que escapa del suelo. Este coeficiente depende de muchos factores entre los que se encuentran la especiación del radio-226, la distribución del tamaño de las partículas del suelo, su permeabilidad y su contenido de humedad.

Para resolver la ecuación (5.7) se consideran las siguientes condiciones de contorno:

- La concentración de radón-222 en la interfase aire-suelo es cero: $C(z_a) = 0$.
- El flujo de radón-222 en la interfase roca-suelo es cero: $J(0)=0$.

La solución analítica de la tasa de emanación de gas ^{222}Rn en la interfase suelo-atmósfera (z_a) es la siguiente:

$$J(z_a) = E \rho R \sqrt{\lambda D} \tanh\left(z_a \sqrt{\frac{\lambda}{D}}\right) \quad (5.9)$$

Suponiendo que el espesor de la capa de suelo es lo suficientemente grande, se obtiene la siguiente expresión para la tasa de emanación máxima de radón-222:

$$J_0 = \lim_{z_a \rightarrow \infty} J(z_a) = E \rho R \sqrt{\lambda D} \quad (5.10)$$

La concentración de radón-222 en una vivienda de superficie A y altura H se calcula a partir de la ecuación de conservación de la masa dentro de un elemento de volumen dV .

La variación de la masa del elemento de volumen dV es igual a la masa que entra menos la masa que sale de este. Despreciando la concentración de radón-222 en el exterior (ya que esta suele ser mucho menor que la concentración en el interior), la ecuación de conservación, en términos de actividad, viene dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{dQ}{dt} = J_0 A - (\lambda + t_v) Q \quad (5.11)$$

donde Q es la actividad de radón-222 en el interior de la vivienda (Bq), A su superficie (m^2) y t_v la tasa de renovación del aire dentro de la vivienda (s^{-1}).

Teniendo en cuenta que $Q = CR_n V$, la ecuación 5.11 se puede escribir como:

$$\frac{dCR_n}{dt} = J_0 \frac{A}{V} - (\lambda + t_v) CR_n \quad (5.12)$$

En un estado estacionario, $dCR_n/dt = 0$; y por tanto la ecuación (5.12) se reduce a la siguiente expresión:

$$CR_n = \frac{J_0}{(\lambda + t_v) H} \quad (5.13)$$

Combinando las ecuaciones 5.10 y 5.13 se obtiene una expresión matemática que relaciona la concentración de radón-222 en el interior de las viviendas con el contenido de actividad de radio-226 por unidad de masa del suelo. Dicha expresión es la siguiente:

$$CRA = \frac{H(\lambda + t_v)}{E \rho \sqrt{\lambda D}} CR_n \quad (5.14)$$

Por tanto, utilizando las ecuaciones 5.14, 5.1 y 5.3 se obtiene una ecuación matemática que relaciona la concentración de radón en el interior de viviendas con la tasa de exposición gamma debida a la radiación natural de la siguiente forma:

$$T_{total} = 0,1887 \frac{CR_n H(\lambda + t_v)}{E \rho \sqrt{\lambda D}} + 0,4510 \quad (5.15)$$

En la tabla 5.2 se recogen los valores asignados a los distintos parámetros que intervienen en la ecuación 5.15 para realizar los cálculos:

Tabla 5.2. Parámetros de entrada utilizados en el modelo

Parámetro	Valor numérico	Referencia
Coefficiente de emanación (E)	0,25	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
Tasa de renovación del aire (t_r)	$0,000138889 \text{ s}^{-1}$	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
Densidad del suelo (ρ)	1600 kg m^{-3}	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
Humedad del suelo (H)	0,05	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
Porosidad (n)	0,396226415	NRC R.G.-3.64 (ec. 2.15)
Coefficiente de difusión (D)	$5,91391 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$	NRC R.G.-3.64 (ec. 2.16)
Constante de desintegración del ^{222}Rn (λ)	$2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$	
Superficie de la vivienda (A)	100 m^2	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
Altura de la vivienda (H)	2,5 m	RESRAD 6.2 (valor por defecto)
FCD de actividad de ^{226}Ra	$0,051 \text{ } \mu\text{R h}^{-1} \text{ Bq}^{-1} \text{ kg}$	Calculado con MICROSHIELD 5.05

Para el cálculo de la porosidad y del coeficiente de difusión se han aplicado las siguientes ecuaciones:

$$v = 1 - \frac{\rho}{2,65\rho_a} \quad (5.16)$$

$$D = 7,10^{-6} \exp\left[-4\left(w - wn^2 + w^5\right)\right] \quad (5.17)$$

siendo ρ_a la densidad del agua (en kg m^{-3}) y w la fracción de agua contenida en el suelo o humedad del suelo (adimensional).

En lo relativo al valor de la porosidad, el valor calculado coincide con el valor por defecto utilizado en el código RESRAD 6.2, mientras que el valor por defecto del coeficiente de difusión del código RESRAD 6.2 es de $2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, menos conservador que el introducido en el cálculo.

3. Definición de las categorías de exposición

Utilizando el modelo anterior, los valores de tasa de radiación gamma natural que aparecen en la tabla 5.3 corresponden a concentraciones de radón en viviendas de 150, 200 y 300 Bq m^{-3} .

Tabla 5.3. Actividades de ^{226}Ra en el suelo y de ^{222}Rn en viviendas que, con el modelo del apartado 2, corresponden a distintos niveles de radiación gamma

Tasa de radiación gamma natural ($\mu\text{R h}^{-1}$)	7,5	14,4
Concentración de ^{222}Rn en viviendas (Bq m^{-3})	150	300

Puesto que en los cálculos se han utilizado parámetros conservadores, y como conceptualmente el modelo estima el máximo de radón que puede penetrar en una vivienda, los valores resultantes de concentración deben asociarse, no a un valor medio, sino más bien a un percentil alto de la distribución de concentraciones de radón que cabría esperar en las viviendas del entorno.

Además, se han adoptado una serie de aproximaciones de mayor o menor exactitud que no siempre describen adecuadamente el comportamiento general (por ejemplo, la relación lineal entre T_{Total} y T_{Ra} explica solo un 74% de la variabilidad asociada a T_{Ra} o, y, por otro lado, el modelo teórico de entrada de radón, al no considerar la advección, no es apropiado para determinados tipos de suelo). Tampoco se ha tenido en cuenta el efecto de algunos factores que pueden ser relevantes, como las variaciones en la permeabilidad asociada a los distintos tipos de suelo o la sismicidad de la zona. Por todo ello, es más acertado interpretar la concentración

de radón resultante como un indicador categórico en lugar de como una variable cuantitativa.

De acuerdo con el valor de ese indicador se han definido tres categorías de exposición potencial: *baja* (categoría 0), para concentraciones inferiores a 150 Bq m^{-3} ; *media* (categoría 1) para concentraciones entre 150 y 300 Bq m^{-3} ; y *alta* (categoría 2), para concentraciones superiores a 300 Bq m^{-3} (el nivel de referencia propuesto para viviendas en la Guía 11.02 del CSN). Las equivalencias aproximadas entre estos valores y las tasas de exposición a la radiación gamma a las que corresponden mediante la aplicación del modelo se recogen en la tabla 5.4. La tasa de dosis asociada al nivel de 300 Bq m^{-3} se ha aproximado a 14 en lugar de a 14,4 ya que con el primer valor se consigue una correspondencia más acertada con las unidades geológicas y una mejor clasificación de los datos experimentales.

En la figura 5.1, se representa el mapa predictivo de exposición doméstica al radón de España, obtenido a partir del Mapa aplicando la clasificación de la tabla 5.4.

Tabla 5.4. Clasificación de las zonas geográficas en categorías de exposición potencial al radón según su nivel de radiación gamma natural

Categoría	Exposición potencial	Tasa de exposición gamma ($\mu\text{R h}^{-1}$)
0	Baja	< 7,5
1	Media	7,5 – 14
2	Alta	> 14

Cabe mencionar que los análisis de isótopos naturales en suelos realizados por el Grupo de Investigación en Interacción Radiación-Materia (Girma) de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria en las Canarias orientales muestran una gran variabilidad en la concentración de radio-226 y torio-232. En la isla de Gran Canaria se registran valores en promedio más altos de torio-232 y potasio-40 que en la península, y en Ajuy (Fuerteventura)

se detectan valores particularmente elevados de torio-232 (66 ppm). No obstante, para la obtención del mapa de radón se ha aplicado el mismo modelo que en la península puesto que las medidas preliminares de radón en edificios parecen confirmar la validez de este.

4. Relación del mapa predictivo con la Geología

Desde el punto de vista geológico, el principal factor que gobierna la concentración del radón en el terreno es la distribución geoquímica del uranio en los distintos tipos de rocas. Las rocas ricas en uranio presentan mayores concentraciones del gas, aunque también pueden encontrarse valores elevados en materiales que, a pesar de no cumplir esa característica, presenten una intensa fracturación, lo cual favorece la migración del radón desde formaciones geológicas adyacentes o más profundas, ricas en uranio.

La relación con la geología del mapa predictivo de exposición al radón en España es muy marcada. A las distintas formaciones graníticas situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central), en el arco hercínico gallego, y en el oeste de las provincias de Salamanca y Zamora, les corresponden las medias de radiación gamma más altas ($17,5 \mu\text{R/h}$), con lo que quedan clasificadas en la categoría de exposición alta (2) en cuanto a su potencial de radón. También algunos granitos de Cataluña, Badajoz, Córdoba y Sevilla, con una radiometría media similar, se engloban en esta categoría.

Asimismo, se aprecian zonas de categoría 2, con tasas de dosis de unos $15 \mu\text{R/h}$, en las zonas metamórficas del oeste peninsular (macizo hespérico) y del sistema Ibérico y en los afloramientos pirenaicos y formaciones filábride, nevádide y maláguide de la zona mediterránea meridional. Entre los metasedimentos paleozoicos merece la pena resaltar las anomalías radiactivas que presenta de forma bastante sistemática la cuarcita armoricana, tanto en Ciudad Real como en otras provincias en las que aparece. Las formaciones triásicas del Buntsanstein, en sus facies de areniscas rojas,

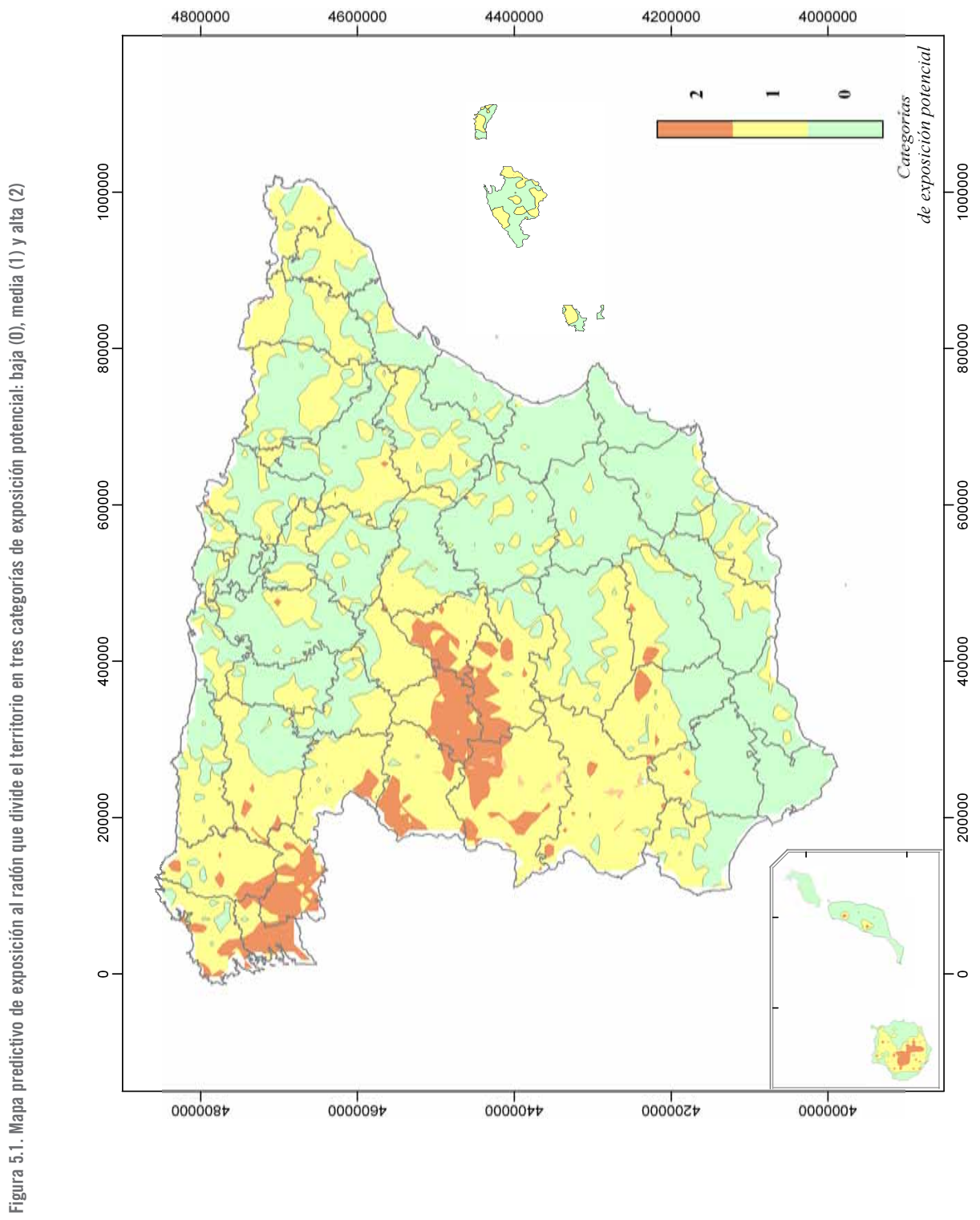


Figura 5.1. Mapa predictivo de exposición al radón que divide el territorio en tres categorías de exposición potencial: baja (0), media (1) y alta (2)

En el momento de editar este mapa no se dispone de información suficiente de las islas Canarias occidentales ni de las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, que serán incluidas en la próxima actualización.

también presentan fondos radiométricos medios del orden de $15 \mu\text{R/h}$.

Los materiales del Lías (Jurásico inferior), predominantemente calcáreos y dolomíticos, presentan fondos bajos ($5 \mu\text{R/h}$) y por tanto pertenecen a la categoría de exposición baja (0) al igual que ocurre con los materiales del Cretácico, salvo en las facies detríticas del Albense² (Teruel, Soria, Cuenca, Guadalajara, etc.).

Los materiales terciarios que rellenan las cuencas de los ríos Ebro, Tajo, Duero y Guadalquivir pueden dividirse, a efectos radiométricos y por su composición y extensión, en varias subzonas:

- Calizas lacustres, con fondos bajos ($5 \mu\text{R/h}$) aunque pueden presentar mayor radiometría debido al aumento de su contenido de arcilla y a la presencia de ambientes reducidos con materia orgánica.
- Facies evaporíticas, con fondos también bajos, aunque no tanto como los anteriores. Eventualmente presentan anomalías radiométricas debido a pequeñas concentraciones locales de uranio en forma de vanadatos.
- Terciarios detríticos, en general más radiactivos. En algunas zonas (Terciario del valle del Tiétar) sus fondos son francamente elevados, llegando a confundirse con las rocas graníticas circunvecinas de las que proceden (arcosas de la cuenca terciaria de Ciudad Rodrigo).

Los materiales cuaternarios en general presentan fondos bajos, tanto en las rañas pliocuaternarias, como en las terrazas y otras formaciones aluviales y diluviales, que corresponden a la categoría 0. No obstante, estos fondos pueden ser altos cuando derivan de rocas graníticas o meta-sedimentarias.

² Hay que tener en cuenta que la alteración de este tipo de rocas puede dar lugar a niveles arcillosos ricos en elementos radiactivos y, por tanto, altos valores de radón, aunque la roca no alterada presente bajo contenido en uranio

En cuanto a las islas, las Baleares constituyen la prolongación hacia el NE de la cordillera Bética. La semejanza entre las rocas y estructuras geológicas de las Baleares con otras de la cordillera Bética permiten considerarlas como partes adyacentes del segmento occidental del Orogéno Alpino Premediterráneo. Por su radiometría corresponden a categorías 0 y 1.

Las Canarias, por otra parte, son islas de origen volcánico. El vulcanismo predominante se alimenta de magmas básicos alcalinos que se generan en el manto superior a unos 70 km de profundidad. Si los magmas alcanzan rápidamente la superficie dan lugar a rocas volcánicas poco evolucionadas, como son los basaltos alcalinos, las basanitas y, en menor cantidad, las nefelinitas olivínicas, las melilitas olivínicas y los basaltos toleíticos. Cuando el ascenso es más lento, los magmas experimentan modificaciones que dan origen a rocas de evolución intermedia (traquibasaltos, traquiandesitas, refritas, tefritas fonolíticas, etc.). Por último, las rocas más evolucionadas que afloran en las Canarias son las fonolitas, las traquitas y las riolitas.

En Gran Canaria se han dado condiciones favorables para que los magmas primarios evolucionen al detenerse temporalmente en cámaras magmáticas emplazadas a pocos kilómetros de la superficie. Esta evolución geoquímica da lugar a magmas enriquecidos en gases y de composición félsica (traquitas y fonolitas). Precisamente, las zonas con mayor tasa de exposición a la radiación gamma de esta isla (correspondientes a la categoría 2) se han detectado en la caldera de Tejeda y en la mitad suroccidental de la isla, donde afloran las grandes estructuras relacionadas con los primeros ciclos de construcción, durante los cuales se emitió un importante volumen de materiales ácidos —fonolitas, traquitas y riolitas—. Las fonolitas y riolitas presentan radiometrías altas y similares, aunque el potencial de radón de las riolitas es mucho más elevado (ULPGC, 2011).

Niveles de exposición análogos (categoría 2) se encuentran en Fuerteventura en el macizo de Betancuría,

donde afloran los materiales del complejo basal —en relación con los complejos basales aflorantes en esta isla se han cartografiado piroxenitas, gabros, alcalinos, monzonitas alcalinas y sienitas— y en la montaña de Tindaya, un “pitón” o subvolcán formado por rocas traquíticas y fonolíticas.

En el anexo I se presentan, para cada provincia española, el mapa predictivo de exposición al radón con los límites de las demarcaciones municipales y el correspondiente mapa geológico (obtenido a partir del mapa geológico de España a escala 1:1.000.000 del Instituto Geológico y Minero de España).

VALIDACIÓN EXPERIMENTAL
DEL MAPA PREDICTIVO



En este capítulo se analizan los datos experimentales disponibles con el fin de corroborar la utilidad del mapa predictivo de exposición al radón.

1. Comparación del mapa predictivo con medidas en viviendas

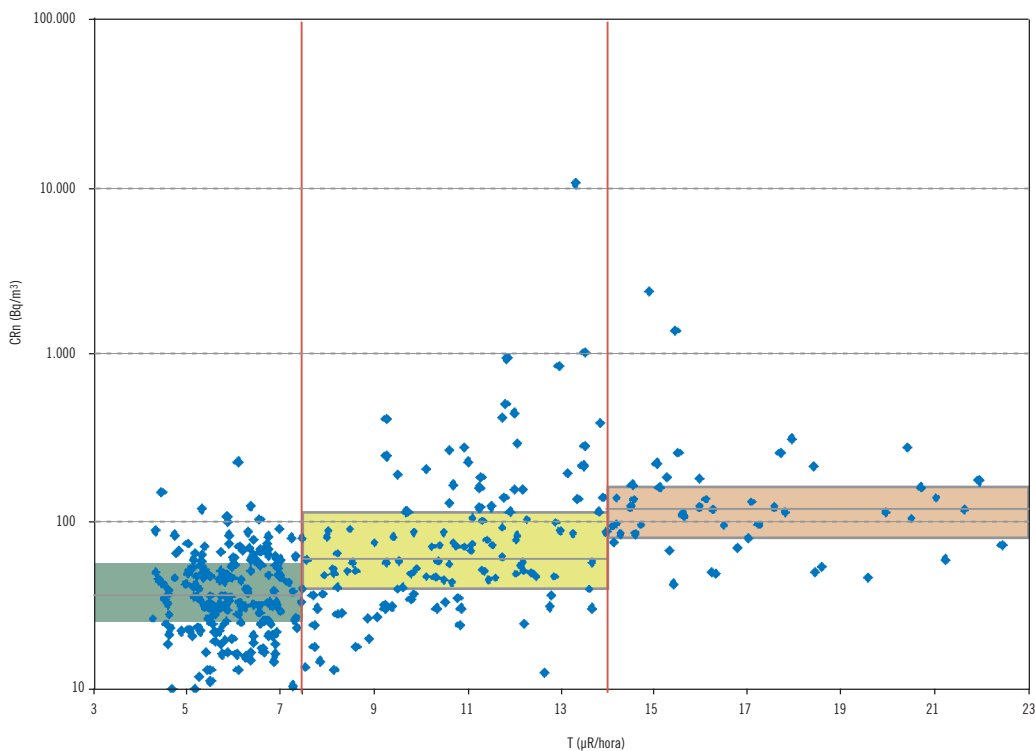
En el año 2010, la base de datos de radón del CSN contaba con unas 8.000 medidas en viviendas. De estas, se seleccionaron las realizadas en plantas bajas o en primeros pisos por ser más representativas para la identificación de zonas de riesgo (la concentración de radón en un edificio, en general, disminuye de manera sustancial en los pisos superiores).

Por tanto, los datos aquí presentados no deben considerarse indicativos de las concentraciones de radón a las que está expuesta la población española (menos de

un 3% de las viviendas están situadas en primeros pisos o bajos, según datos del censo de 2001). Además, la densidad de medidas no es homogénea, como correspondería a un muestreo aleatorio, sino que es mayor en las zonas en las que se han detectado niveles altos de radón.

En cuanto a los detectores utilizados, la mayoría de las medidas se han hecho con detectores de trazas expuestos durante periodos de entre tres y seis meses. Un porcentaje de aproximadamente un 10% corresponde a detectores de carbón activo expuestos a lo largo de tres días. A pesar de que las medidas de larga duración son más fiables en cuanto a la estimación de los promedios de radón anuales, en los municipios en los que se disponía de resultados obtenidos con los dos tipos de detector se ha comprobado que, en términos globales, existe un buen acuerdo entre ambos.

Figura 6.1. Valores de la tasa de radiación gamma (T) frente a la media geométrica de las concentraciones de radón (CRn) medidas en viviendas de distintos municipios



Las líneas rojas verticales indican la división correspondiente, según el valor de T, a las tres categorías del mapa de exposición potencial al radón. Para cada uno de los tres grupos se representa la mediana (línea gris) y aparece coloreada la región que va del percentil 25 al 75.

En la figura 6.1 se representan las medias geométricas (m_g) de las concentraciones de radón medidas en viviendas de 362 municipios frente a las tasas de exposición a la radiación gamma correspondientes (obtenidas del Marna a partir de las coordenadas geográficas tomadas del censo de población).

Como parámetro de posición central se ha elegido la media geométrica (m_g) por tratarse de un buen indicador para distribuciones lognormales, como las que suelen seguir las concentraciones de radón. Para caracterizar adecuadamente este tipo de distribuciones, se necesita un número de muestras relativamente alto. Por ejemplo, si se requiere garantizar con un 95% de confianza que el valor muestral de m_g no difiere en más de un 30% del valor verdadero, se necesitan, respectivamente, 19 y 48 muestras³ para distribuciones con desviaciones estándar geométricas (σ_g) de 2 y de 3 (Hewett, 1995); los valores de σ_g de las distribuciones obtenidas para los municipios analizados suelen ser ligeramente superiores a 2.

Clasificando los municipios, según su tasa de radiación gamma, en tres grupos de acuerdo a los rangos de la tabla 5.4 se encuentran diferencias significativas entre ellos según el test de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$); las medianas de las concentraciones de radón correspondientes a cada uno de estos grupos son 35, 59 y 116 Bq m⁻³, respectivamente. El test de Mann-Whitney corrobora diferencias significativas entre el segundo y el tercer grupo, que son más acusadas cuando se toma como valor de corte 14 en lugar de 14,5 µR/h ($U=1799$ frente a $U=1663$: cuanto mayor es el valor del estadístico U , menos probable es que las diferencias entre los grupos sean debidas al azar).

Ninguno de los municipios con tasas de radiación gamma inferiores a 7,5 µR/h tiene una media geométrica superior a 150 Bq m⁻³ (la predicción de concen-

tración de radón máxima esperable según el modelo para la categoría 1) y menos del 4% de los municipios con tasas inferiores a 14 µR/h tiene medias geométricas que superen los 300 Bq m⁻³ (la predicción para la categoría 2).

También en la gráfica puede observarse que la media geométrica de concentración de radón aumenta con la tasa de radiación gamma (ρ de Spearman = 0,54; $p < 0,05$). No obstante, cuando se analizan los datos separados por categorías de exposición solo se encuentra una correlación significativa para los municipios de categoría 1 (ρ de Spearman = 0,45).

2. Comprobación de la utilidad del mapa en viviendas gallegas

En 2005, la Universidad de Cantabria en colaboración con el Ciemat, llevó a cabo el proyecto de investigación *Evaluación de los niveles de radón en edificios en zonas de diferentes tasas de exposición a la radiación gamma*, promovido por el CSN, con la finalidad de contrastar las predicciones del mapa con medidas en viviendas en una región geográfica relativamente homogénea en cuanto a sus características ambientales.

En concreto, el proyecto se desarrolló en Galicia, partiendo de la selección de tres zonas, de unos 2.000 km² cada una. De acuerdo a los valores de tasa de exposición a la radiación gamma externa, estas zonas se clasifican mayoritariamente de la siguiente forma dentro del mapa predictivo de exposición al radón:

- Categoría 0: zona centrada en Villalba (Lugo) en la que los valores de radiación gamma son generalmente inferiores a 7,5 µR/h y, en todo caso, no suelen superar los 10 µR/h.
- Categoría 1: zona centrada en Sarria (Lugo) donde la tasa de radiación gamma varía predominantemente entre 10 y 15 µR/h.
- Categoría 2: zona centrada en Pontearreas (Pontevedra) con tasas de radiación gamma en torno a los 15 µR/h.

³ Suponiendo que se cuenta con un muestreo exploratorio previo con $n > 50$.

En cada una de las tres zonas se tomaron unas 200 medidas de concentración de radón en viviendas. En la tabla 6.1 se resumen los principales resultados del proyecto:

Tabla 6.1. Resumen de los resultados de radón en viviendas en cada una de las tres zonas: media geométrica (m_g), desviación estándar geométrica (s_g) y rango de concentraciones medidas

	^{222}Rn (Bq m^{-3})		
	m_g	s_g	Rango
Categoría 0	72,2	2,1	13-993
Categoría 1	105,9	2,4	20-1057
Categoría 2	280,3	2,0	49-1330

Como puede verse a partir de la tabla 6.1 las medias geométricas de cada una de las tres distribuciones aumentan al aumentar la categoría de exposición potencial. La principal conclusión del proyecto fue que la exposición a la radiación gamma puede emplearse como variable indicativa del riesgo de exposición al radón.

OTROS FACTORES CORRELACIONADOS
CON EL RADÓN EN VIVIENDAS



El mapa predictivo de exposición al radón en España se basa exclusivamente en la relación de la concentración del radón en las viviendas con la tasa de exposición a la radiación gamma, e, indirectamente, con la concentración de radio-226 en el suelo. No obstante, como ya se ha visto en el capítulo 4, los niveles de radón en una vivienda dependen de la interrelación compleja de un gran número de variables. A continuación se describen algunas de las más importantes, cuya influencia se valorará en desarrollos posteriores, en particular, con vistas a la delimitación de las “zonas identificadas” a las que hace referencia la Instrucción IS-33 del CSN.

1. La permeabilidad

La permeabilidad determina en gran medida el volumen de suelo o roca que contribuye al aporte de radón a una vivienda: en general, suponiendo un contenido constante de radio-226 en el suelo, a mayor permeabilidad, más altas son las concentraciones de radón registradas en las viviendas.

La permeabilidad de un suelo depende estrechamente de su porosidad. En la tabla 7.1, se recogen, a título ilustrativo, valores típicos de porosidad de distintos materiales sedimentarios. No obstante, a veces, en el terreno existen canales de flujo preferencial (como conducciones de abastecimiento de agua o pequeños túneles excavados por animales) que incrementan de manera acusada la permeabilidad efectiva, por su capacidad de transportar aire a distancias de hasta 100 m (Moseley, 2005).

En cuanto a las rocas, su permeabilidad es muy variable dependiendo de su naturaleza. Por ejemplo, las calizas y dolomías pueden presentar zonas karstificadas altamente permeables debido a la formación de grandes conductos de disolución, canales y cavernas, aunque, cuando se encuentran llenos de agua, apenas favorecen el flujo de radón. Las rocas graníticas, por el contrario, carecen de porosidad primaria y tienen una baja porosidad secundaria, ya que suelen estar poco fracturadas. La excepción son los granitos meteorizados, particularmente permeables al flujo de radón (Peake y Schumann, 1991). Las rocas tipo pizarras, grauvacas y cuarcitas se muestran normalmente muy fracturadas hasta grandes profundidades y se consideran semipermeables. Sin embargo, en las pizarras arcillosas las fracturas se encuentran taponadas por productos arcillosos, lo cual reduce su permeabilidad.

2. La presencia de fallas activas

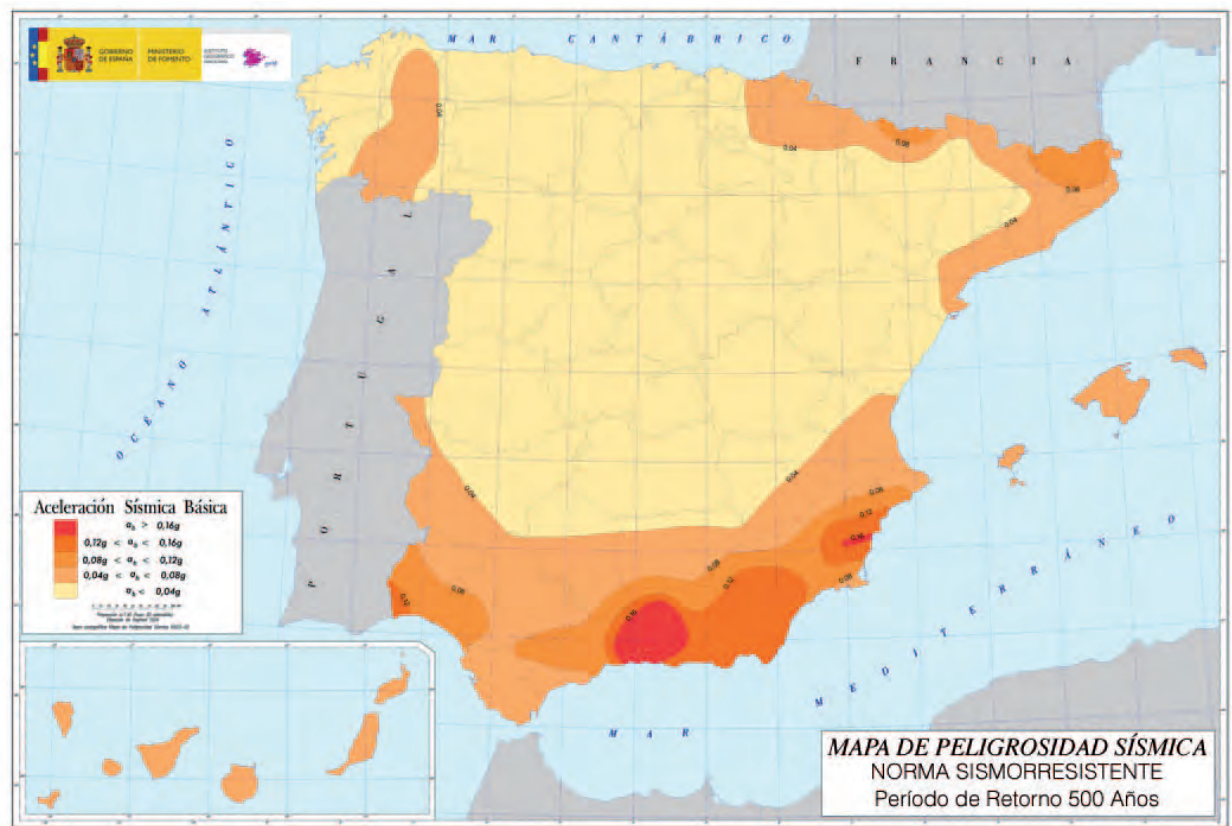
Las fallas activas son buenas conductoras en el proceso de degasificación del terreno (King *et al.*, 1993) y, en consecuencia, la actividad de las fallas geológicas se encuentra correlacionada con la concentración de radón en el gas del suelo. De hecho, esta variable se utiliza en la confección de mapas de fallas activas (Ioannides *et al.*, 2003) y como predictor de la actividad sísmica (King, 1984; Lagios *et al.*, 2000) o volcánica (Richon *et al.*, 1994).

La relación de la actividad sísmica con la entrada de radón a un edificio es más compleja y no necesariamente la presencia de fallas activas se refleja en un

Tabla 7.1. Valores típicos de porosidad en distintos materiales sedimentarios (según Todd, 1959)

Material	Porosidad (%)	Material	Porosidad (%)
Turberas	60-80	Arena media-fina	30-35
Suelos	50-60	Grava	30-40
Arcillas	45-55	Grava y arena	30-35
Limos	40-50	Areniscas	10-20
Sedimentos aluviales	35-40	Esquistos	1-10
Arena uniforme	30-40	Calizas	1-10

Figura 2.4. Mapa que define la peligrosidad sísmica de España a efectos de la Norma de Construcción Sismorresistente (Ministerio de Fomento)



aumento de los niveles de radón en las viviendas, como pone de manifiesto un estudio de la Universidad Autónoma de Barcelona sobre la falla de Amer en la comarca volcánica de la Garrotxa (Font *et al.*, 2008).

Sin embargo, algunos mapas predictivos utilizan esta característica como un factor que eleva la categoría de riesgo asignada a partir de otras variables a una determinada zona (ver por ejemplo Ielsch, 2010).

3. El régimen pluviométrico

El grado de humedad del suelo es uno de los factores que más condiciona el transporte de radón. Generalmente, después de producirse precipitaciones que saturan el terreno de agua, los niveles de concentración en una vivienda suelen aumentar, ya que la parte del suelo que permanece seca por el efecto de la edificación ofrece un

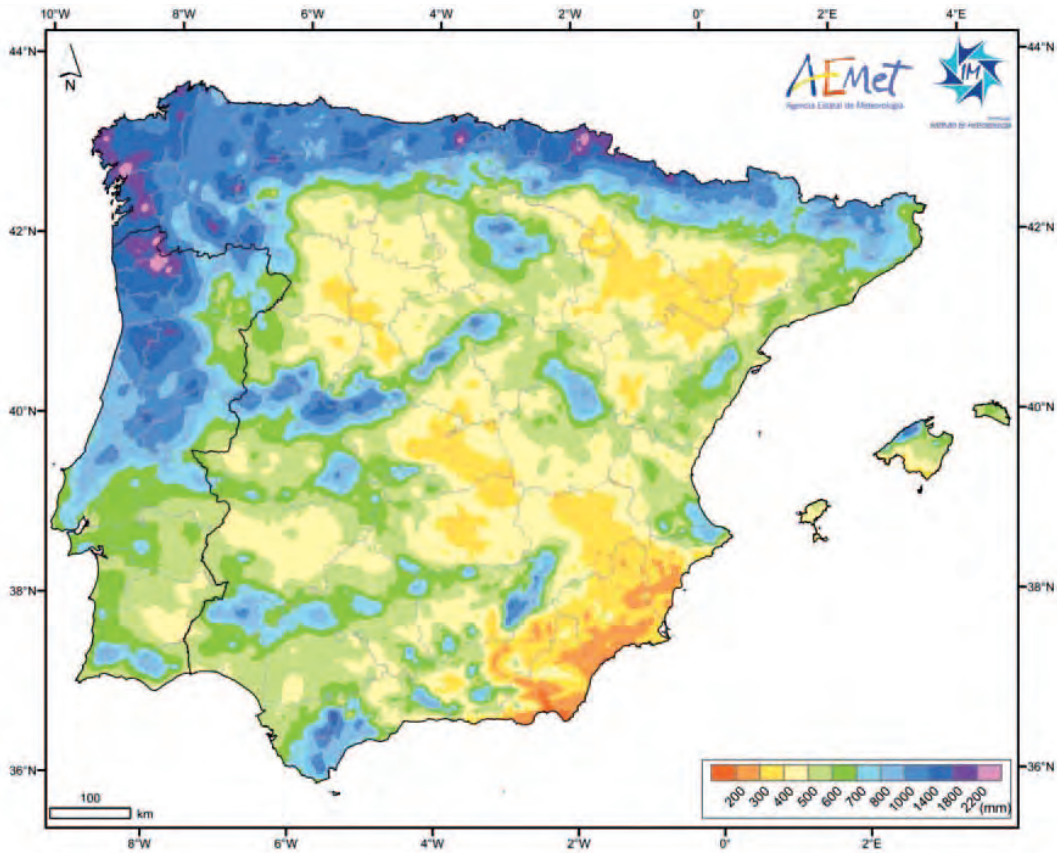
camino preferencial al flujo de radón: un suelo muy saturado de agua tiene una baja permeabilidad al transporte de radón.

Puesto que el régimen hídrico del suelo está condicionado por el régimen pluviométrico, este último es otro de los factores que podría ser de utilidad en la elaboración de mapas de riesgo.

4. La topografía

La topografía del terreno también puede influir en las concentraciones de radón en una vivienda. Por ejemplo, las viviendas situadas en una ladera, donde los suelos suelen estar bien drenados y compuestos de materiales más permeables, presentan, en general, niveles de radón más altos que las casas situadas en zonas llanas o de valle.

Figura 2.5. Precipitación media anual para la península Ibérica e islas Baleares de 1971 a 2000 (Agencia Estatal de Meteorología)



5. Las características constructivas de la vivienda

Hay varias características de una vivienda que condicionan la entrada y la acumulación de radón en su interior, como son su volumen total y el de cada una de las habitaciones, el tipo de cimentación, las penetraciones de tuberías e instalaciones o la hermeticidad respecto al intercambio con el aire exterior.

En relación con esta última característica, existe la preocupación de que, puesto que la tendencia actual es construir edificaciones más estancas a fin de maximizar el ahorro energético, se esté incrementando la exposición al radón de la población.

En el marco del proyecto RADPAR de la Unión Europea (2009-2012) se están desarrollando diversas

iniciativas para estudiar la acumulación de radón en edificios energéticamente eficientes. En concreto, se ha puesto en marcha un proyecto de medida en continuo en diez edificios de este tipo y se ha completado una campaña exploratoria en otros 25 (sin sistemas de mitigación de tipo activo) situados en zonas de potencial alto de radón. A pesar de que las tasas de intercambio con el aire exterior son más bajas de lo habitual, los valores registrados en ellos no superan los 80 Bq/m³. Esto parece indicar que, de hecho, en los edificios de nueva construcción, los esfuerzos por conseguir un mayor ahorro energético redundan también en una reducción de la entrada de radón (RADPAR Newsletter 4, mayo 2011). Resultados similares se han contrastado en Alemania (Kemski *et al.*, 2009), donde se confirma que las edificaciones más modernas (en particular las posteriores a 1995) presentan concentraciones de radón más moderadas en su interior.



- APARICIO, A., HEMÁN, F., CUBAS, C.R., ARAÑA-FUENTES, V., 2003. "Fuentes mantélicas y evolución del volcanismo canario". *Estudios Geol.*, 59, 5-13.
- BANDA, E., DAÑOBEITIA, J. J., SURINACH, E. Y ANSORGE, J., 1981. "Features of crustal structure under the Canary Islands. Earth Planet". *Sci. Letters*, 55: 11-24.
- DARBY, S. *et al.*, 2005. "Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies". *British Medical Journal*, 330 (7485): 223-227.
- DUVAL J.S., 1991. "Use of aerial gamma-ray data to estimate relative amounts of radon in soil gas. In: Gundersen LCS, Wanty RB, eds. Field studies of radon in rocks, soils and water". *U.S. Geological Survey, Bulletin* 1971: 155-162.
- European Commission Radiation Protection 122, 2001. *Practical use of the concepts of clearance and exemption*. Part II.
- EC, 2011. Draft Euratom Basic Safety Standards Directive presented under Article 31 Euratom Treaty for the opinion of the European Economic and Social Committee.
- FONT LL., BAIXERAS C., MORENO V, BACH J., 2008. "Soil radon levels across the Amer fault". *Radiation Measurements* Volume 43 (S1): S319-S323.
- KREWSKI, D. *et al.*, 2005. "Residential radon and risk of lung cancer: a combined analysis of 7 North American case-control studies". *Epidemiology*, 16: 137-145.
- 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.
- ICRP Publication 65. "Protection against radon-222 at home and at work". Oxford Pergamon Press, 1993.
- ICRP Publication 103. "The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection". Oxford Pergamon Press, 2007.
- IELSCH G., CUSHING M.E., COMBES PH., CUNNEY, M., 2010. "Mapping of the geogenic radon potential in France to improve radon risk management: methodology and first application to region Bourgogne". *Journal of Environmental Radioactivity*, Volume 101 (10): 813-820.
- IOANNIDES K., PAPACHRISTODOULOU C., STAMOULIS K., KARAMANISA D., PAVLIDES S., CHATZIPETROS A., KARAKALA E., 2003. "Soil gas radon: a tool for exploring active fault zones". *Applied Radiation and Isotopes*. Vol 59 (2-3): 205-213.
- JIMENEZ, M.A., MARTÍN-VALDEPEÑAS, J.M., GARCÍA-TALAVERA, M., MARTÍN-MATARRANZ, J.L., SALAS, R., SERRANO, J.I., RAMOS, L.M., 2011. "Realistic retrospective dose assessments to members of the public around Spanish nuclear facilities". *Journal of Environ. Radioact.* 102 (11), 995-1007.
- KEMSKI, J., SIEHL, A., STEGEMANN, R., VALDIVIA-MANCHEGO, M., 2001. "Mapping the geogenic radon potential in Germany". *Sci. Total Environ.* 272, 217-230.
- 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.
- KING, C.Y., 1984. "Impulsive radon emanation on a creeping segment of the San Andreas Fault, California". *Pageoph.* 122: 341-352.
- KING, C.Y., ZHANG, W., KING, B.S., 1993. "Radon anomalies on three kinds of faults in California". *Pageoph.* 141(1): 111-124.
- LAGIOS, E., SIDERIS G., ZERVOS, F., TSOURLOS P., NICHOLSON R.A., PONOMAREV, A.L., SALOV B., BALASSANIAN S., PETROSYAN H., BUSHATI S., LIKA O.,

2000. "Tectonic early warning system through real-time radon (Rn) monitoring: preliminary results of a geophysical method for forecasting earthquakes". *Earthquake Hazard and Seismic Risk Reduction, Dordrecht, Kluwer*, vol. 20(2): 261-270.
- LUBIN, JH *et al.*, 2005. "Adjusting lung cancer risks for temporal and spatial variations in radon concentration in dwellings in Gansu Province, China". *Radiation Research*, 163: 571-579.
- MARTÍ, J., MALLARACH, J.M., 1987. "Eruptiones hidromagmáticas en el volcanismo Cuaternario de Olot (Girona)". *Estud. Geol.* 43, 31-40.
- MARTÍN MATARRANZ, J.L., 2004. *Concentraciones de radón en viviendas españolas. Otros estudios de radiación natural*. Colección Informes Técnicos 13, CSN.
- 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. Measurm.*
- MOSLEY, R.B., 2005. "Preferential radon transport through highly permeable channels in soils". In: McLAUGHLIN, J.P., SIMOPOULOS, S.E., STEINHAÜSLER, F. (Eds.), *The Natural Radiation Environment VII*. Elsevier, Amsterdam.
- NAZAROFF, W.W. and SEXTRO, R. G., 1989. "Technique for measuring the indoor ²²²Rn source potential of soil". *Environ. Sci. Technol.* 23, 451-458.
- NEZNAL, M., MATOLÍN, I., BARNET, I., MIKSOVA, J., 2004. "The new method for assessing the radon risk of building sites". <http://www.geology.cz/specpapers/obsah/no16/16-1.pdf>
- OIEA, 2011. "IAEA Safety Standards for protecting people and the environment". Draft 5.0.
- PEAKE RT., SCHUMANN RR., 1991 "Regional radon characterizations". In: Gundersen LCS, Wanty RB, eds. *Field studies of radon in rocks, soils and water*. U.S. *Geological Survey, Bulletin* 1971: 163-175.
- RAASCHOU-NIELSEN O., 2008. "Indoor radon and childhood leukaemia". *Radiat Prot Dosimetry* 132 (2): 175-181.
- RICHON, P., SABROUX, J.-C., HALBWACHS, M., VANDEMEULEBROUCK, J., POUSSIELGUE, N., TABBAGH, J., PUNONGBAYAN, R., 2003. "Radon anomaly in the soil of Taal volcano, the Philippines: A likely precursor of the M 7.1 Mindoro earthquake (1994)". *Geophys. Res. Lett.* 30, No 9, 1481.
- SAINZ C., QUINDOS L.S., FERNÁNDEZ P., GÓMEZ J., FUENTE I., QUINDOS L., MATARRANZ J.L., 2007. "High background radiation areas: the case of Villar de la Yegua village (Spain)". *Radiation Protection Dosimetry*, Vol 125 (1-4): 565-567.
- SCOTT AG., 1991. "Site characterization for radon supply potential: a progress review". *Health Phys* 62: 422- 428.
- SUÁREZ, E. FERNANDEZ, J.A. BAEZA, A. MORO, M.A. GARCÍA, D. POZO, J.M. AND LANAJA, J.M., 2000. *Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural*. Colección Informes Técnicos 04.02. CSN. Madrid.
- TANNER A.B., 1991. "Methods of characterization of ground for assessment of indoor radon potential at a site". In: Gundersen LCS, Wanty RB, eds. *Field studies of radon in rocks, soils and water*. U.S. *Geological Survey, Bulletin* 1971:1-13.
- TODD D.K., 1959. *Ground water hydrology*. John Wiley, New York.
- Universidad Autónoma de Barcelona. Informe final al CSN. Proyecto *Estudio del riesgo asociado a la inhalación de descendientes del radón en diferentes actividades laborales y en viviendas*.
- Universidad de Cantabria. Informe final al CSN. Proyecto *Evaluación de niveles de radón en edificios en zonas de diferentes tasas de exposición a la radiación gamma*.

Universidad de Cantabria. Informe final al CSN. Proyecto *Evaluación de las dosis de radiación natural recibidas por la población en el entorno de las centrales nucleares españolas. Estudio específico de Campo Arañuelo (Cáceres)*.

Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Segundo informe de seguimiento. Proyecto *Estudio de la distri-*

bución de radioisótopos naturales y de radón en las Islas Canarias Orientales.

UNSCEAR, 2000. "Sources and Effects of Ionizing Radiation". *Report to the General Assembly*. New York.

WHO Radon Handbook 2009, Geneva. www.who.int/ionizing_radiation/env/radon/en/index1.html

ANEXO



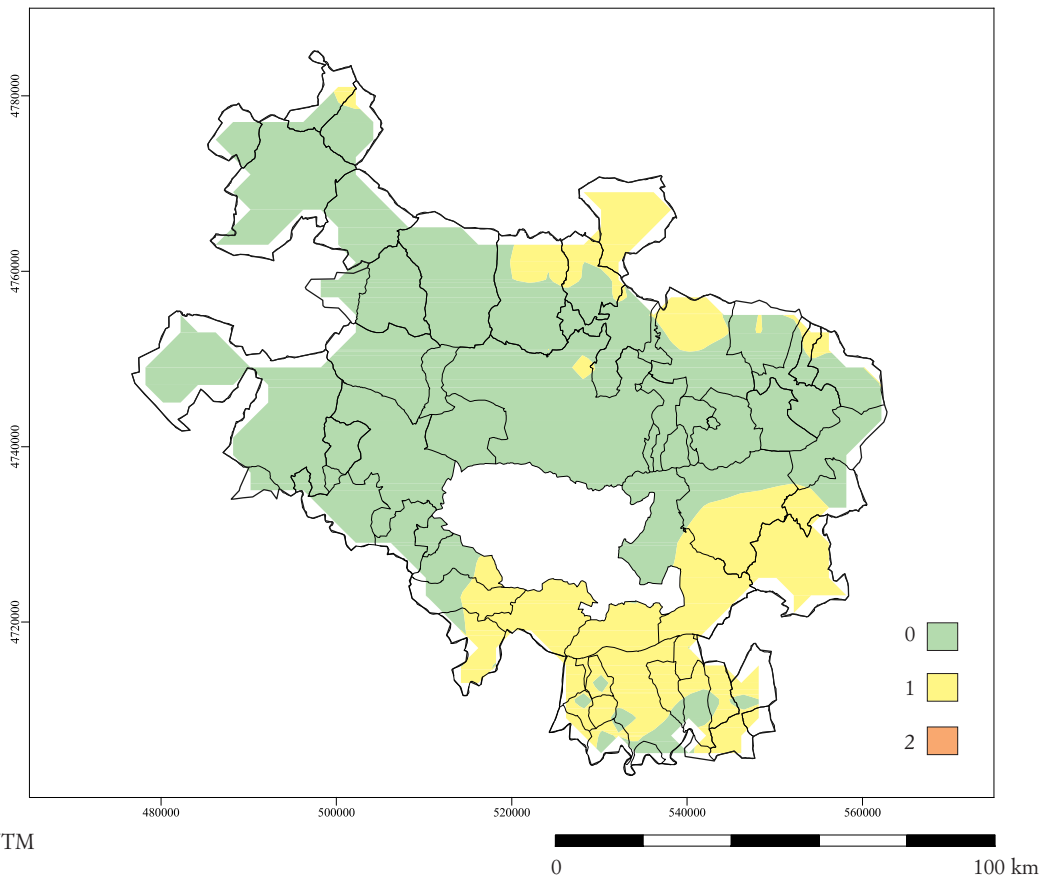
Mapas provinciales

Los mapas provinciales de exposición potencial al radón se han elaborado con el *software* Golden Software Surfer v.8 a partir de los datos de tasa de exposición a la radiación gamma terrestre. El método de interpolación utilizado sido el de *kriging* ordinario.

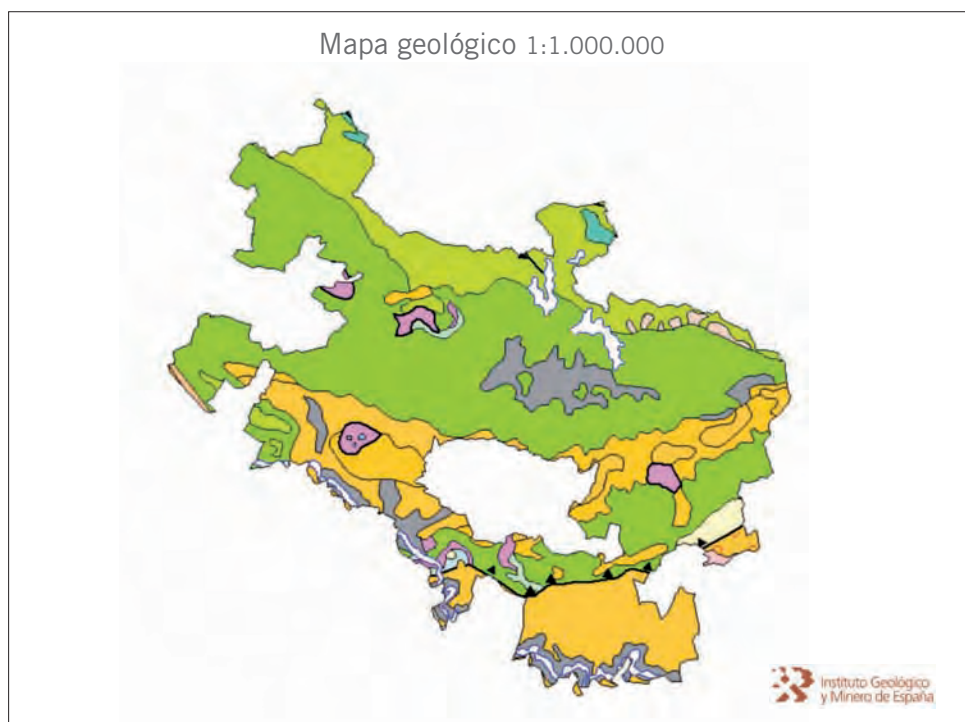
Los mapas geológicos se han representado con el *software* ArcMap v. 9.3.1, utilizando los metadatos del mapa geológico a escala 1/1.000.000 del Instituto Geológico y Minero de España. La leyenda correspondiente se incluye en las páginas 93 a 96.

Álava

Categorías de exposición potencial al radón

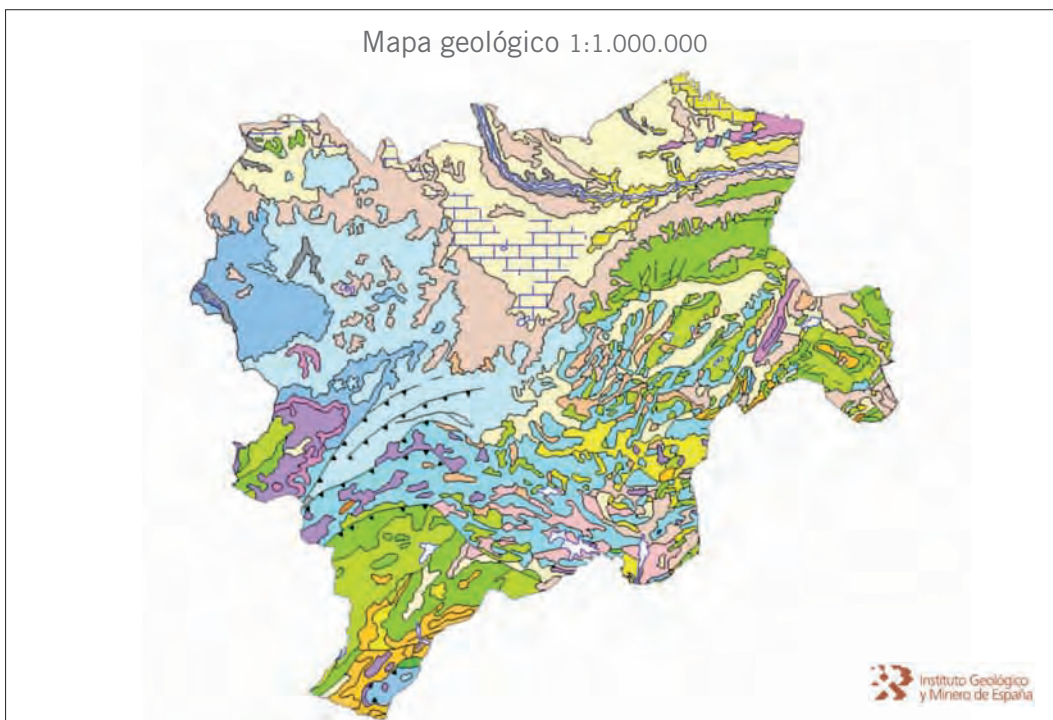
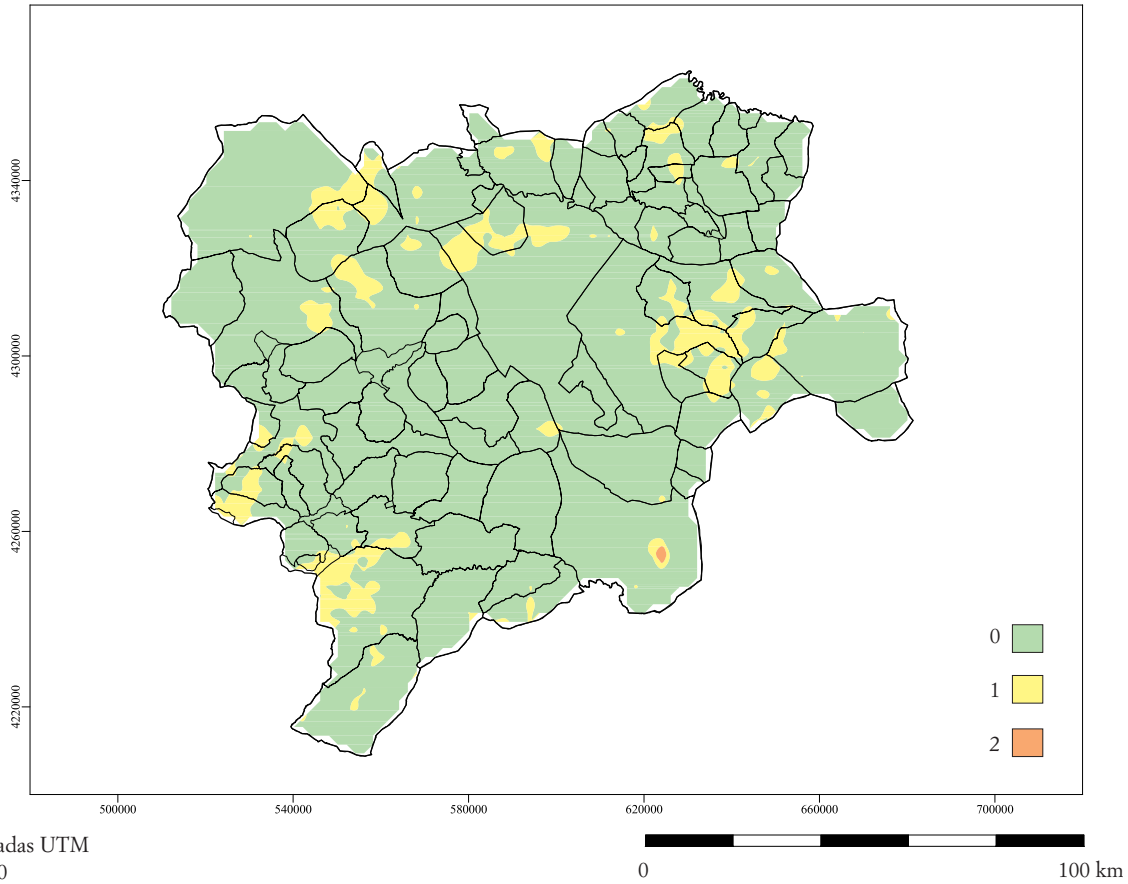


Coordenadas UTM
HUSO 30



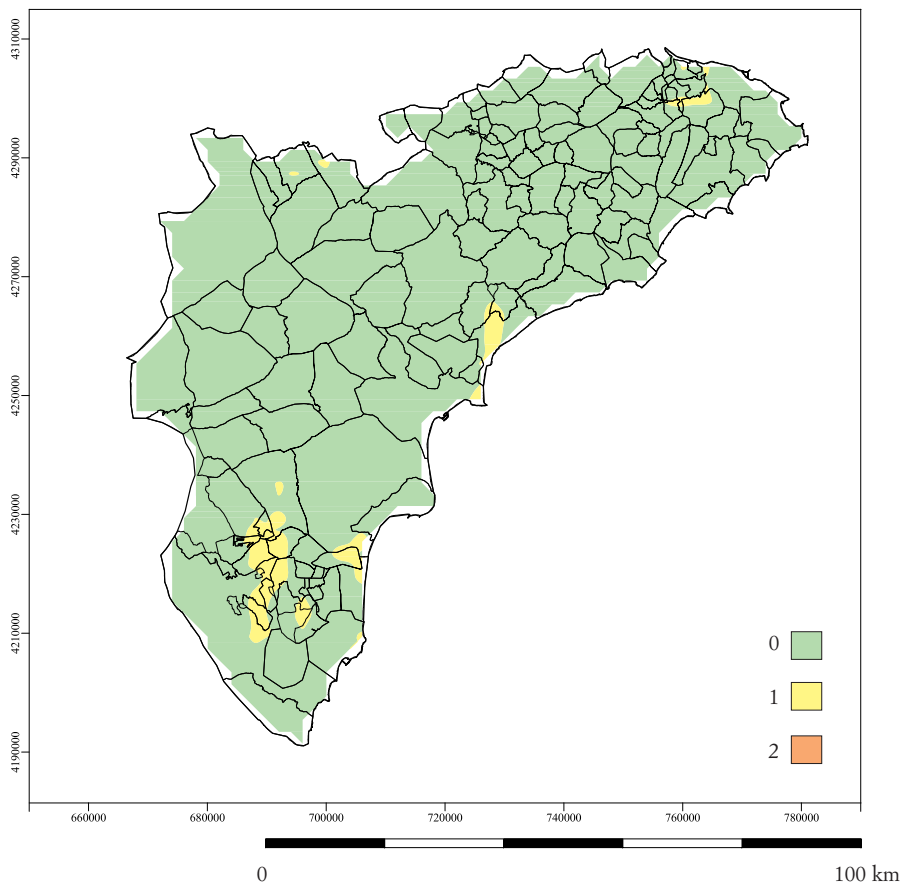
Albacete

Categorías de exposición potencial al radón

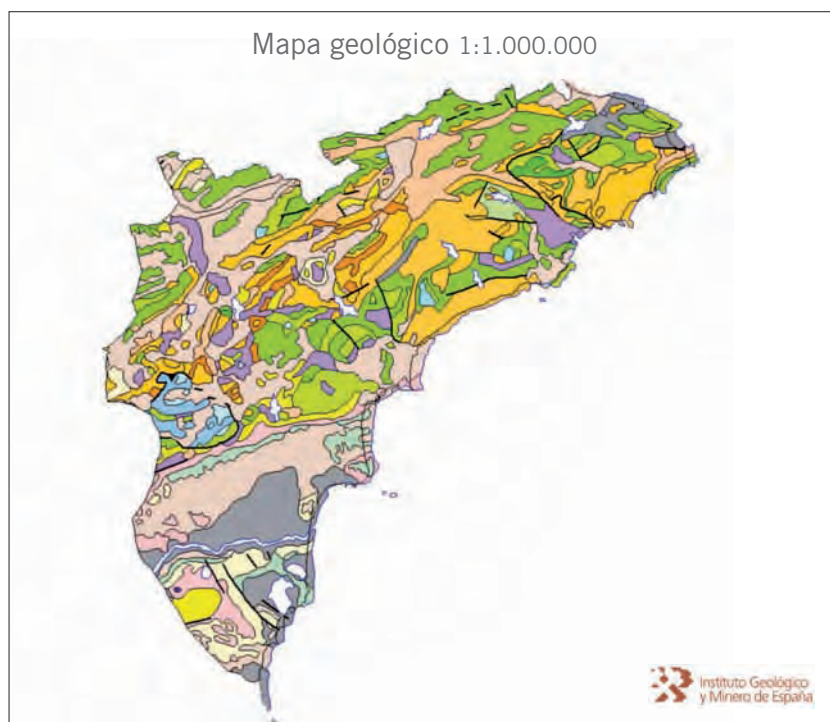


Alicante

Categorías de exposición potencial al radón

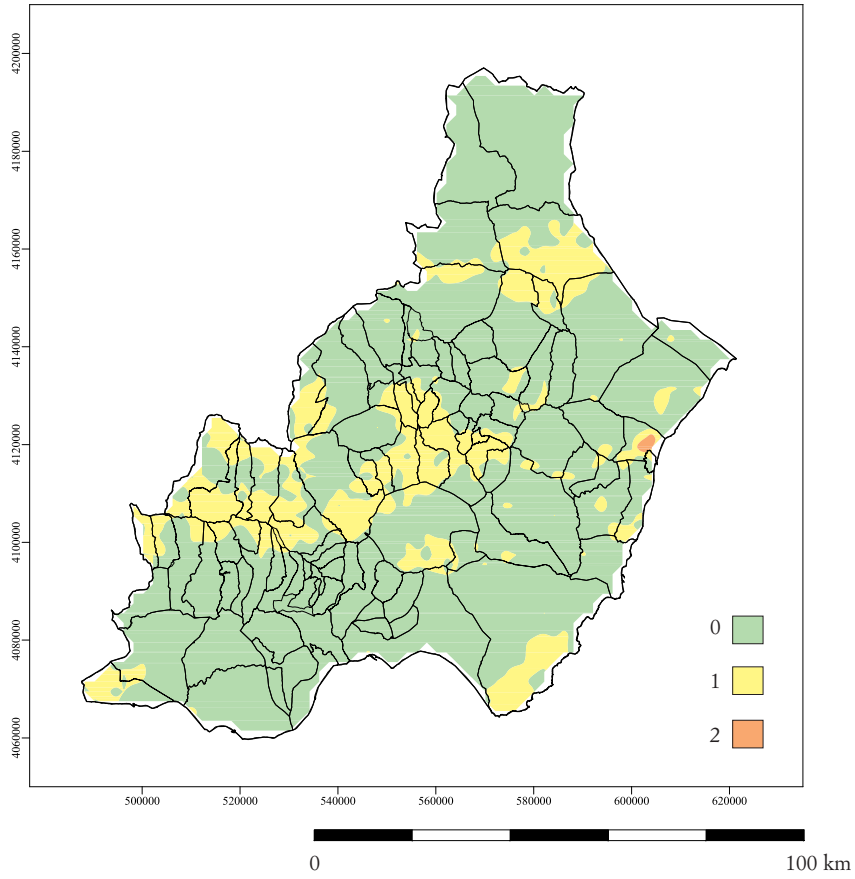


Coordenadas UTM
HUSO 30



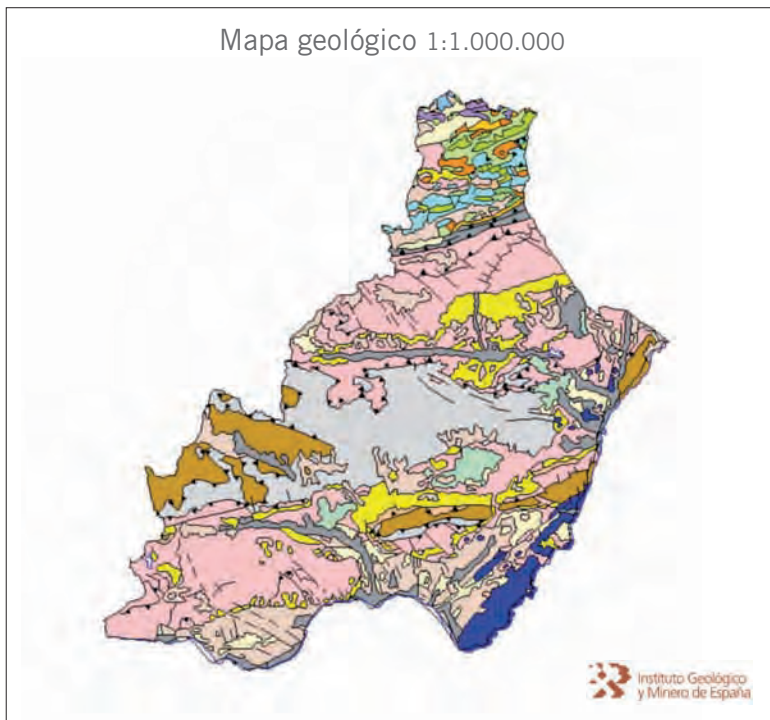
Almería

Categorías de exposición potencial al radón



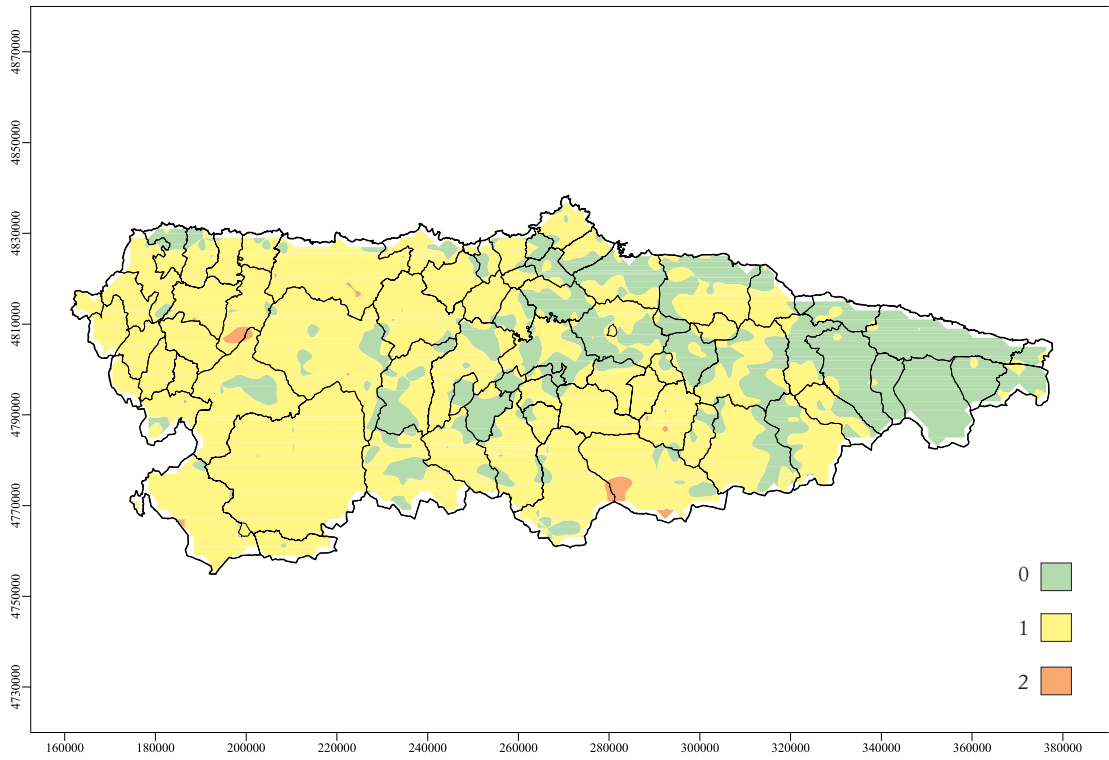
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000



Asturias

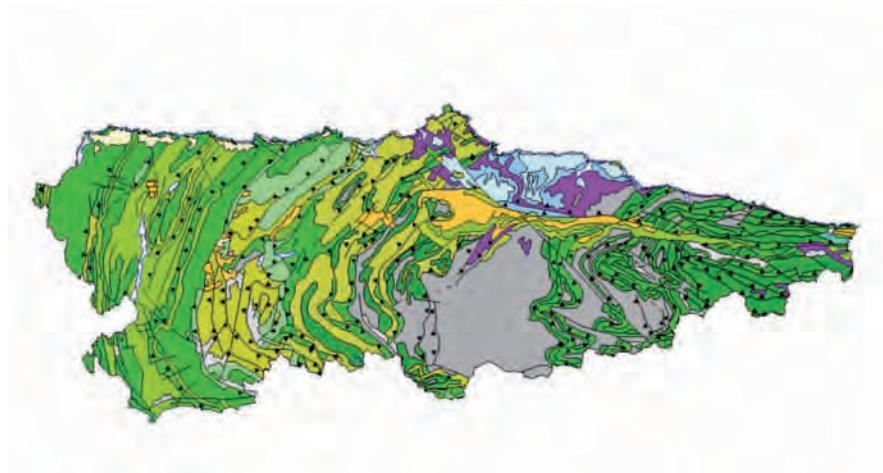
Categorías de exposición potencial al radón



Coordenadas UTM
HUSO 30

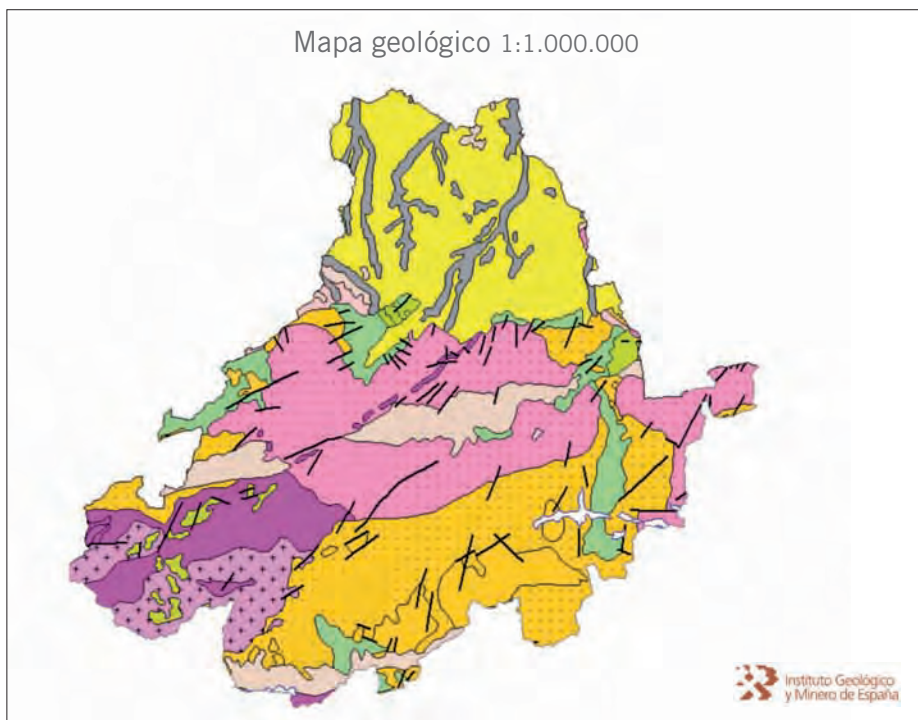
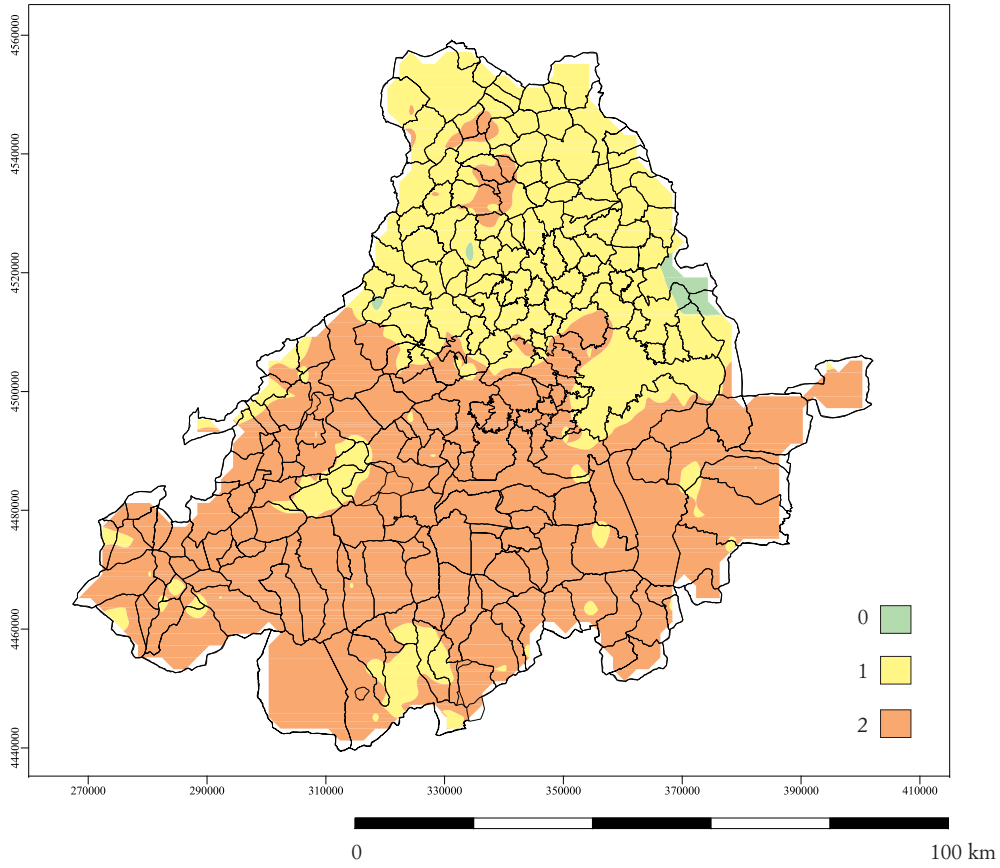


Mapa geológico 1:1.000.000



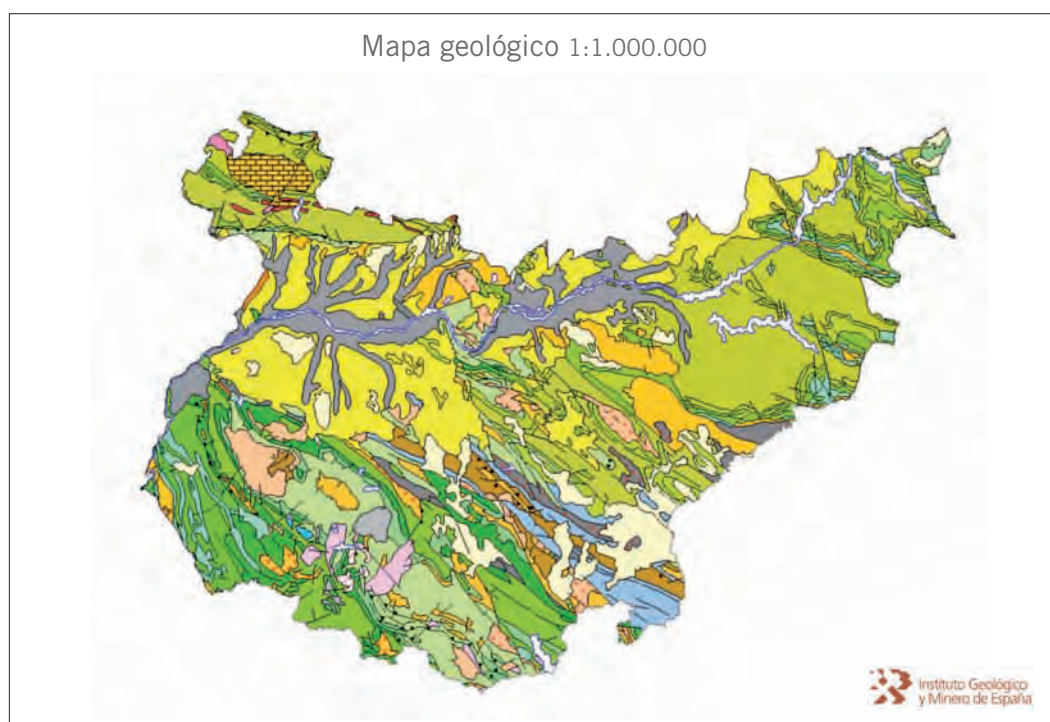
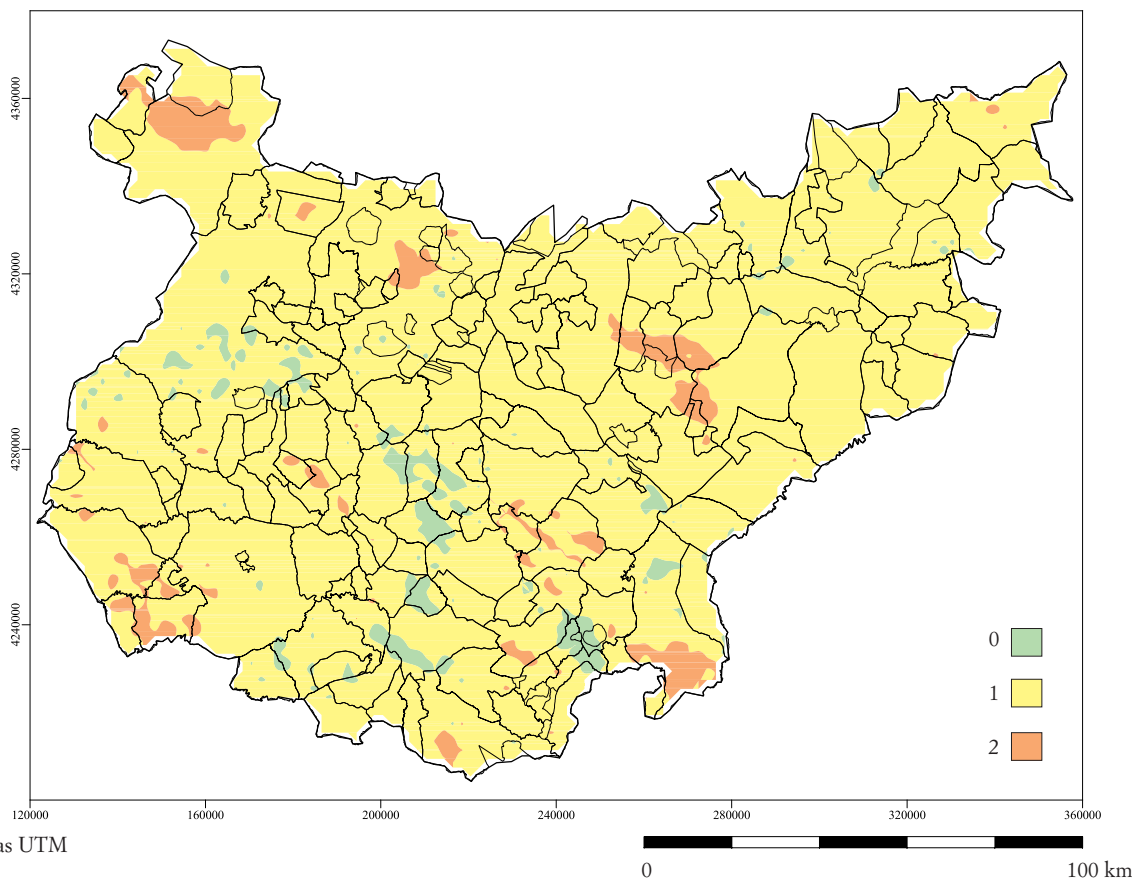
Ávila

Categorías de exposición potencial al radón



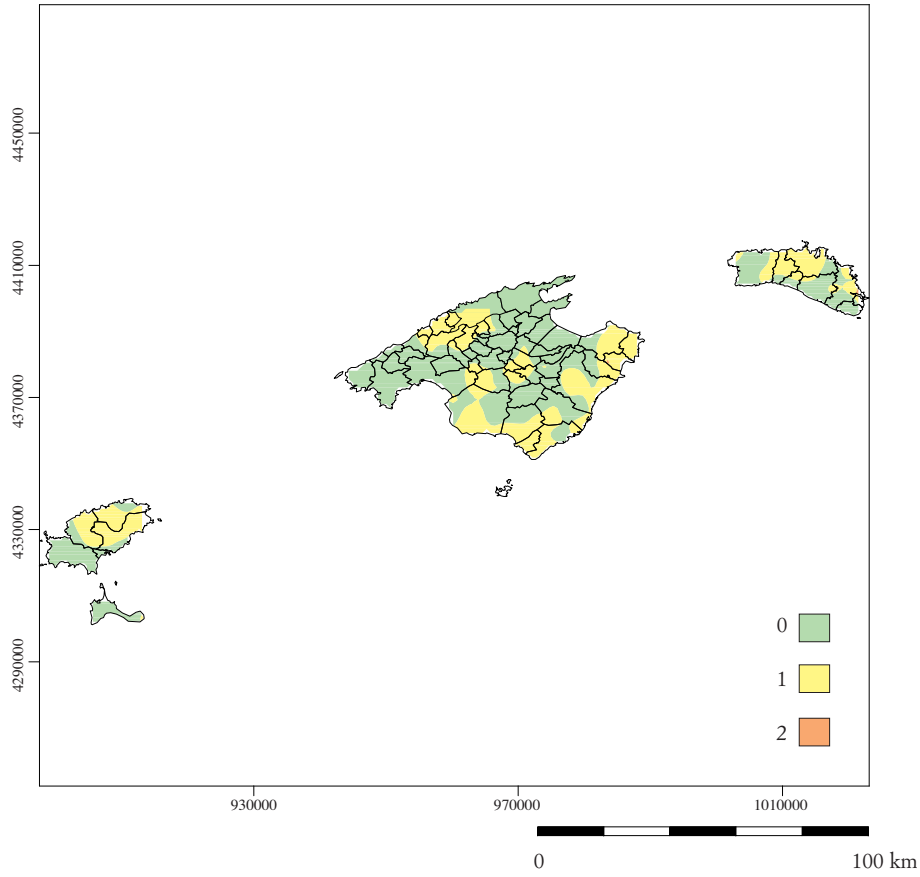
Badajoz

Categorías de exposición potencial al radón

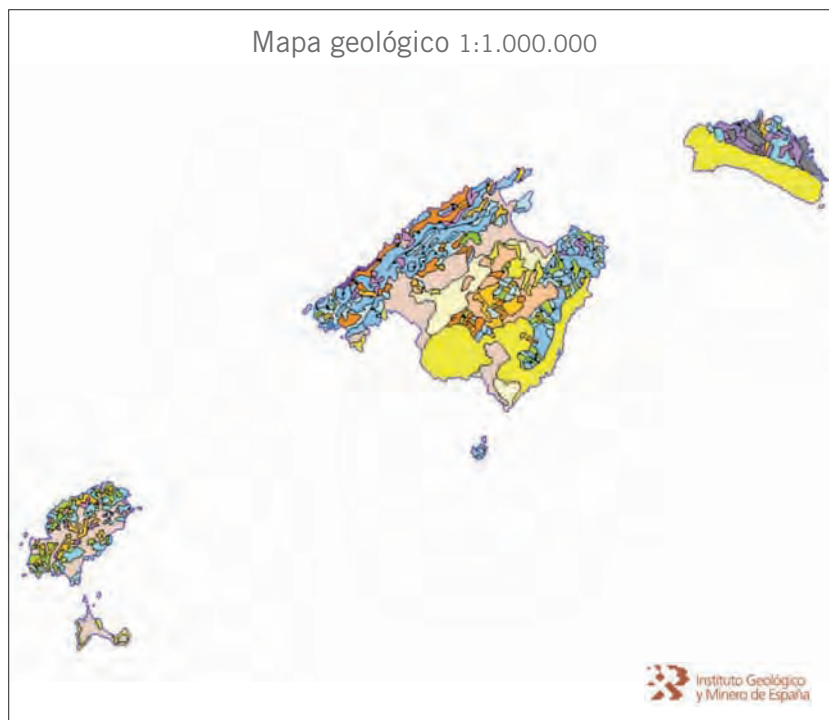


Islas Baleares

Categorías de exposición potencial al radón

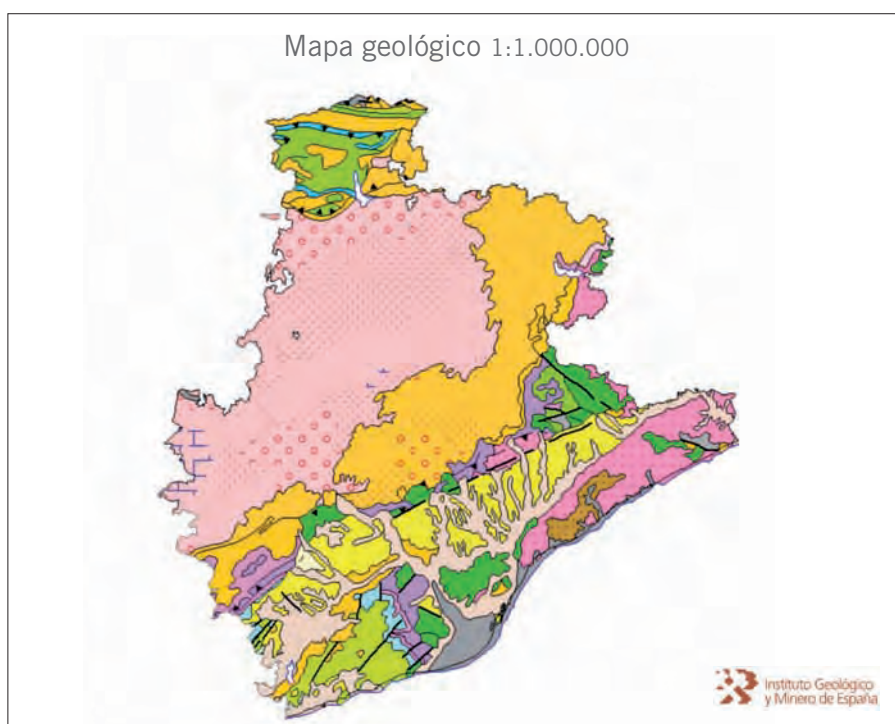
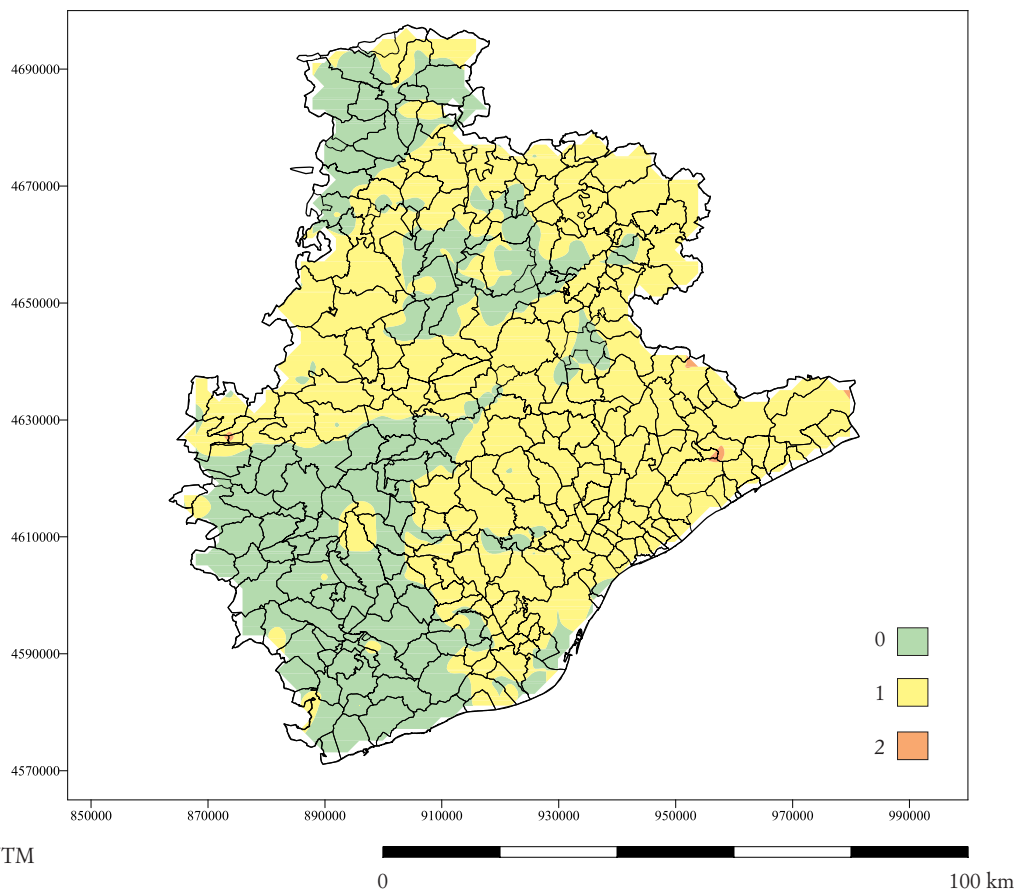


Coordenadas UTM
HUSO 30



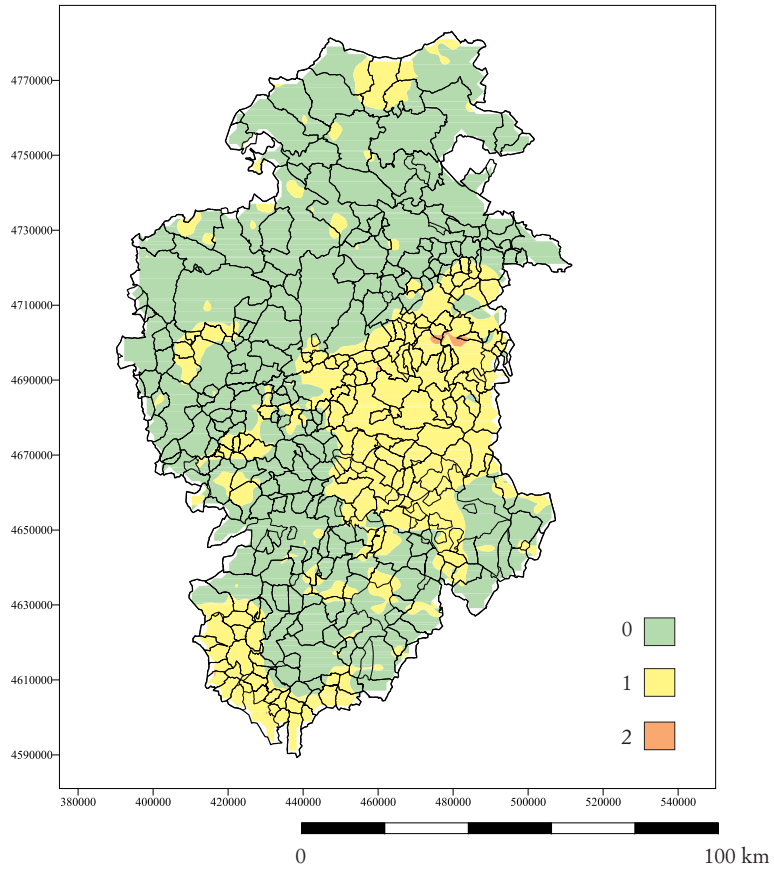
Barcelona

Categorías de exposición potencial al radón

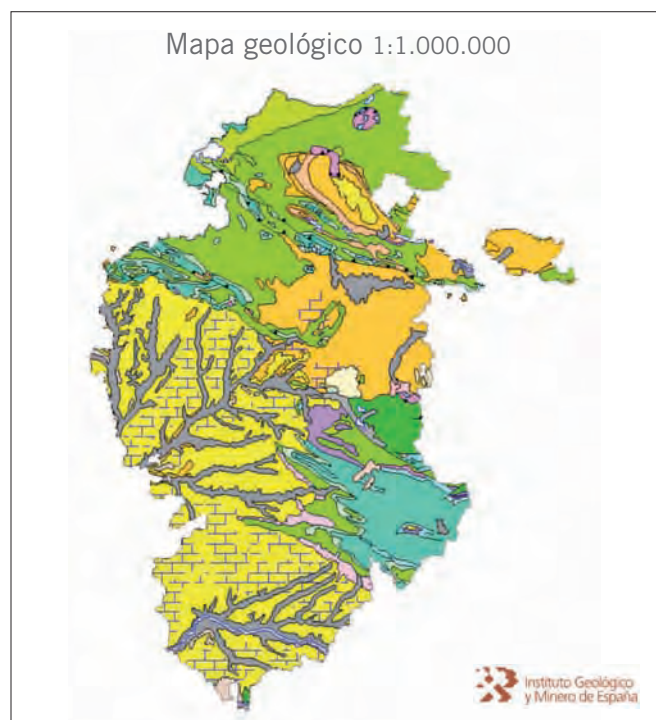


Burgos

Categorías de exposición potencial al radón

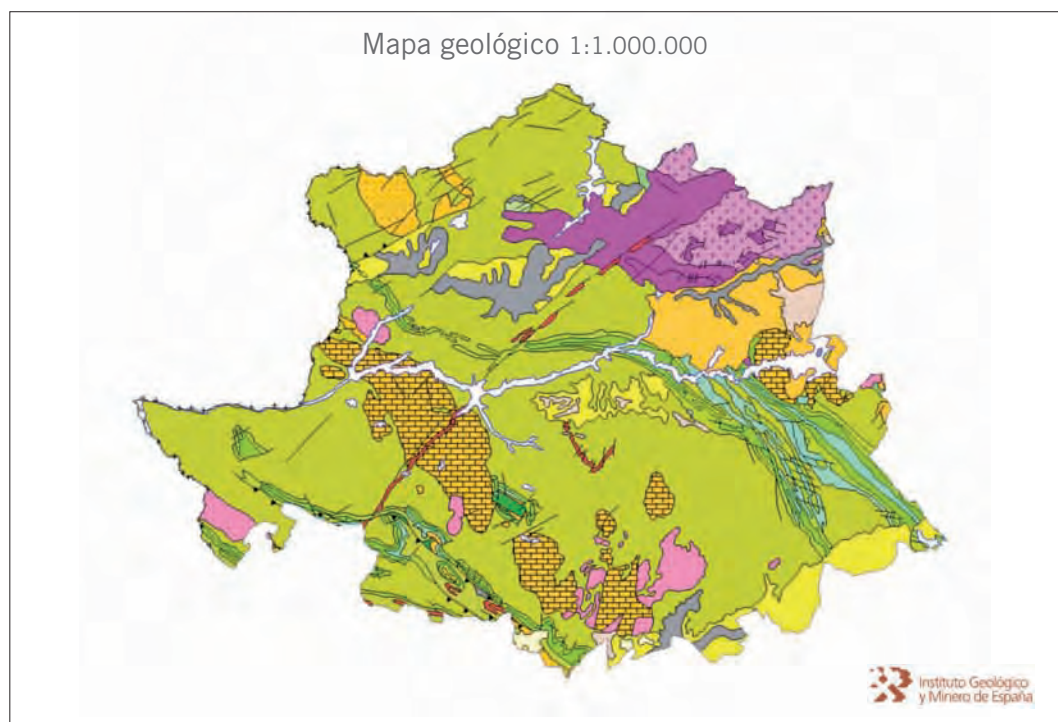
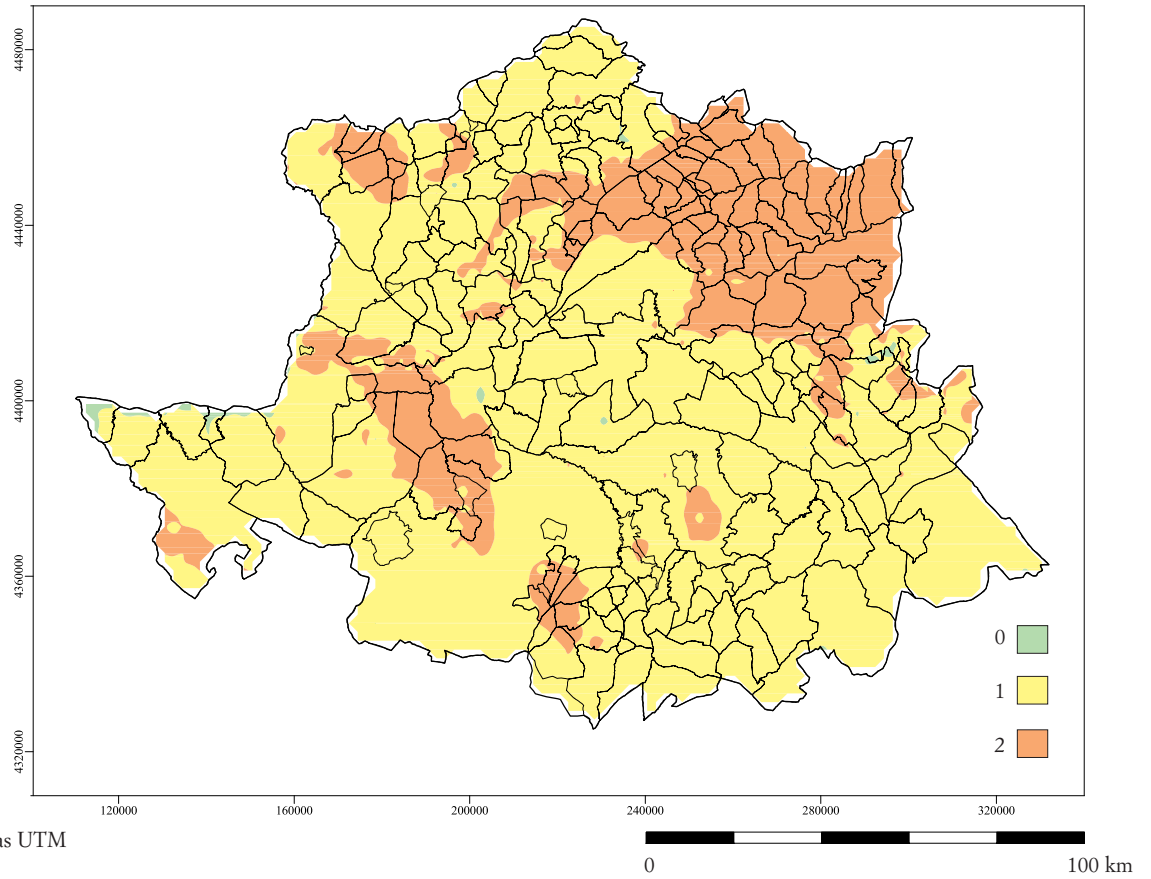


Coordenadas UTM
HUSO 30



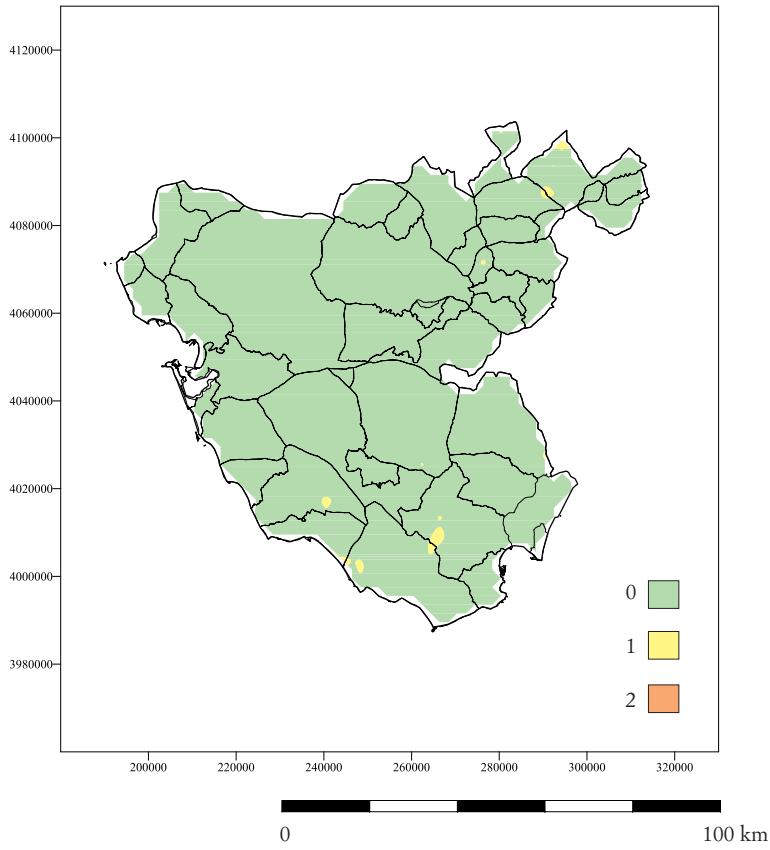
Cáceres

Categorías de exposición potencial al radón



Cádiz

Categorías de exposición potencial al radón

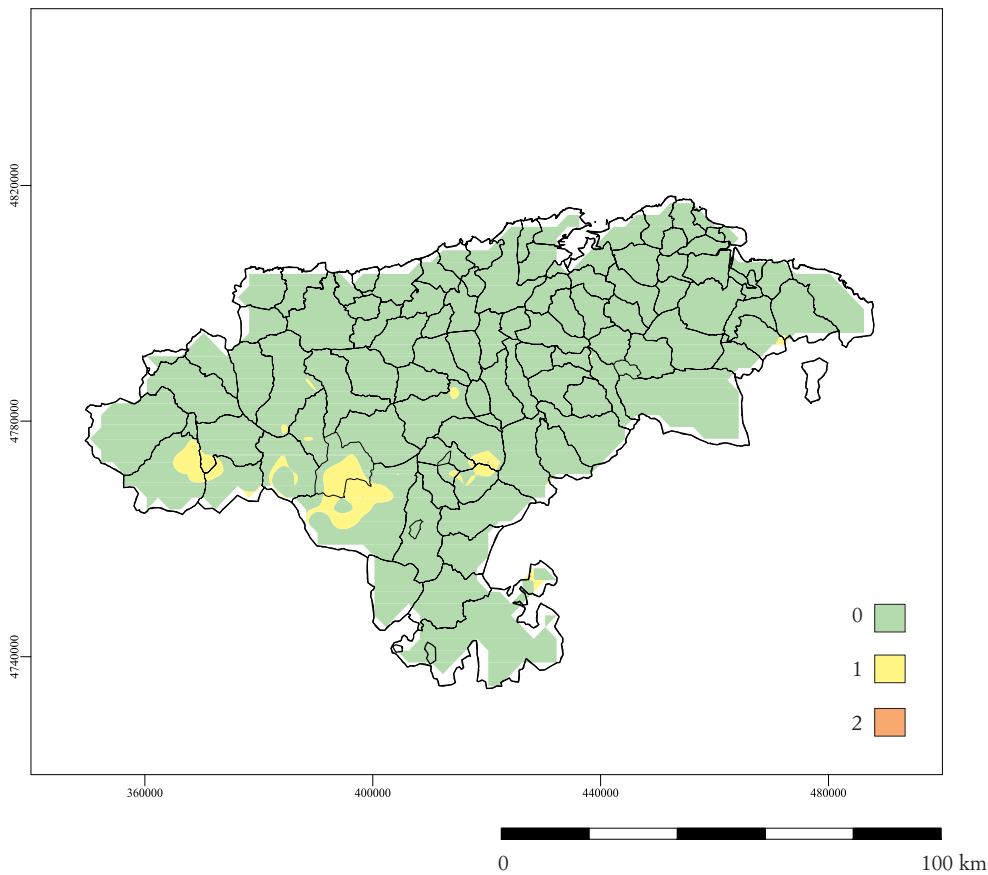


Coordenadas UTM
HUSO 30



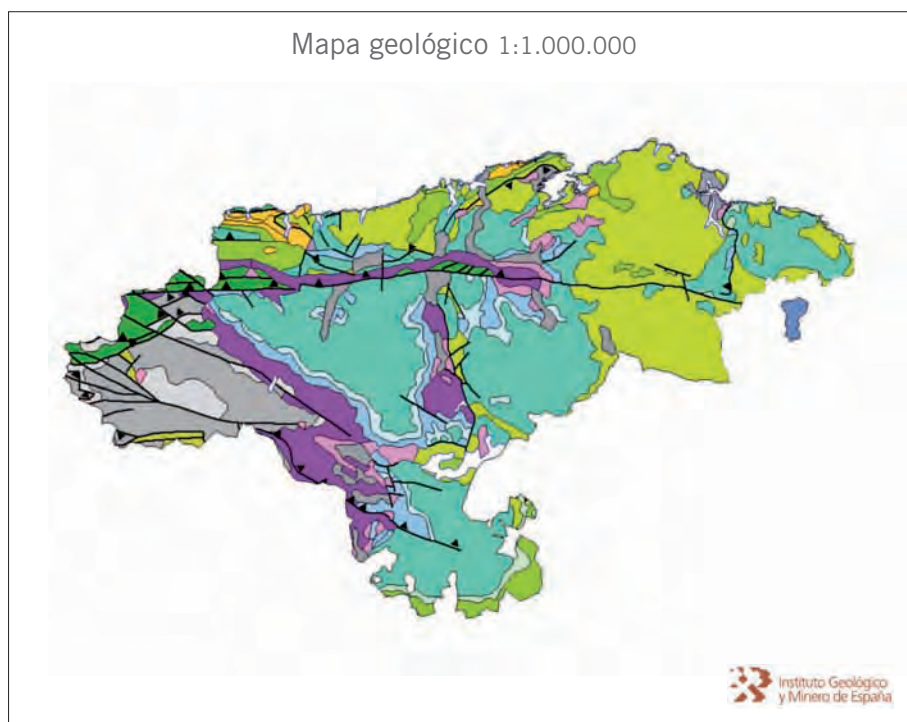
Cantabria

Categorías de exposición potencial al radón



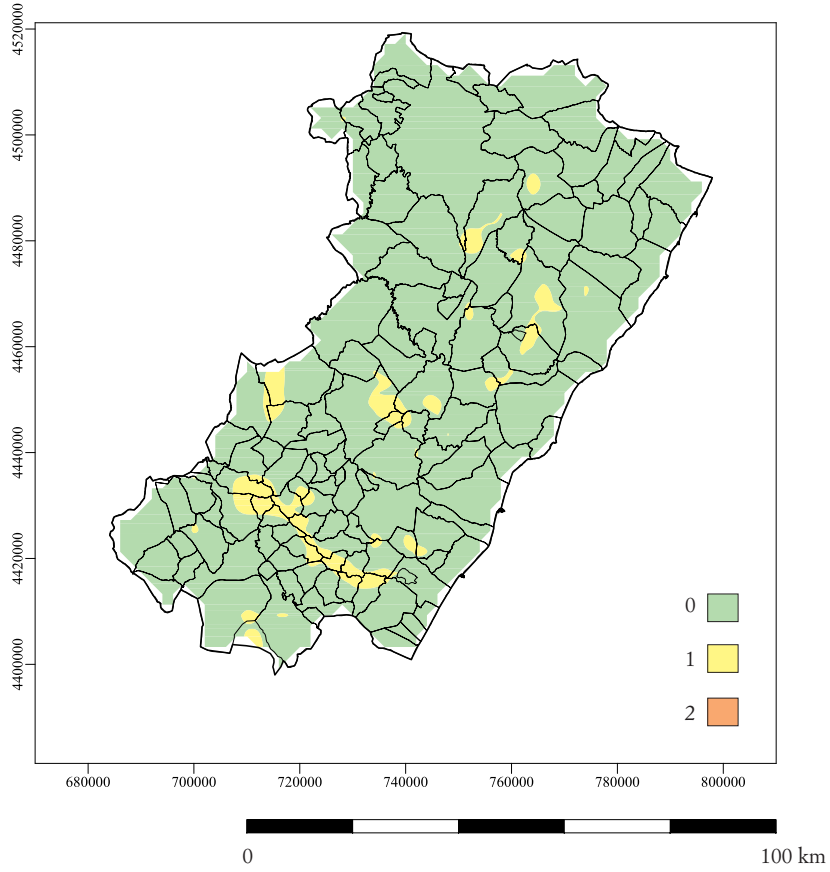
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000



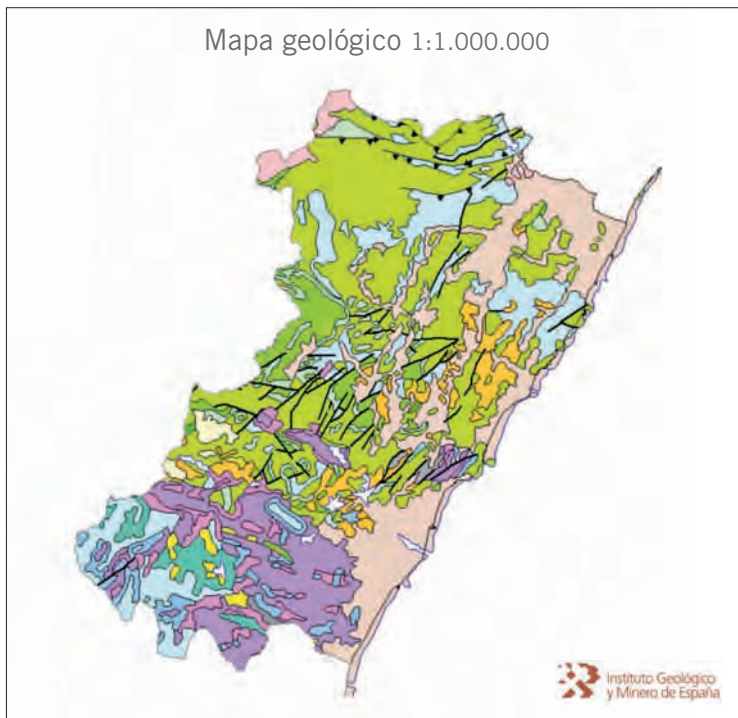
Castellón

Categorías de exposición potencial al radón



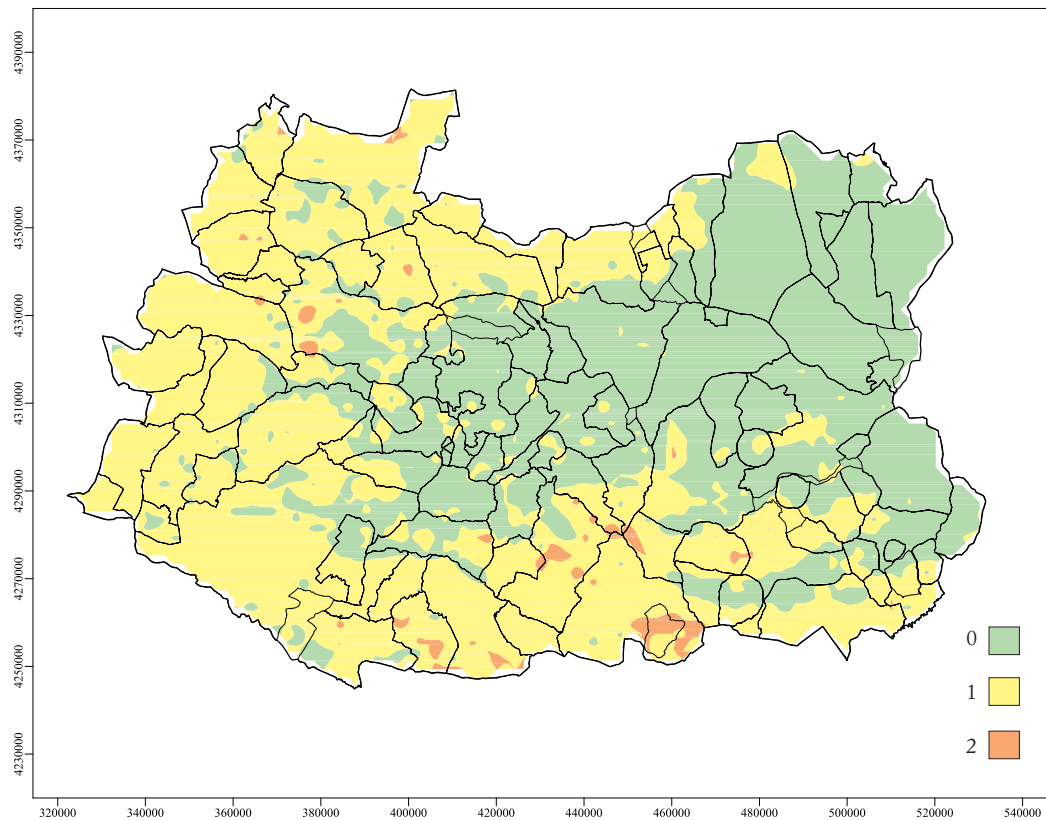
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000



Ciudad Real

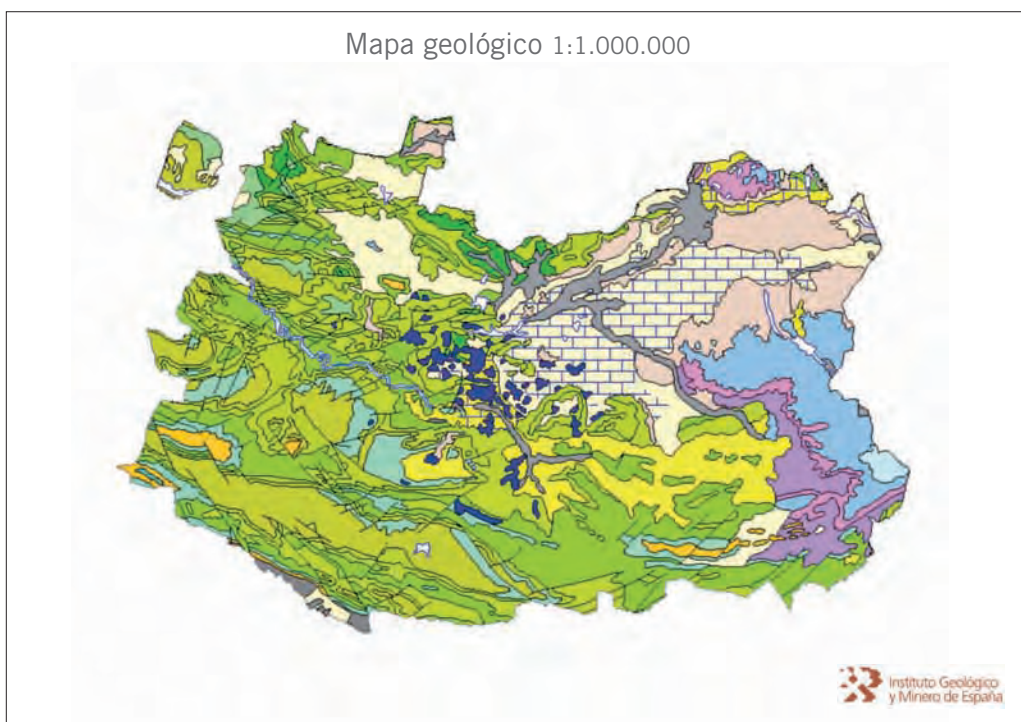
Categorías de exposición potencial al radón



Coordenadas UTM
HUSO 30

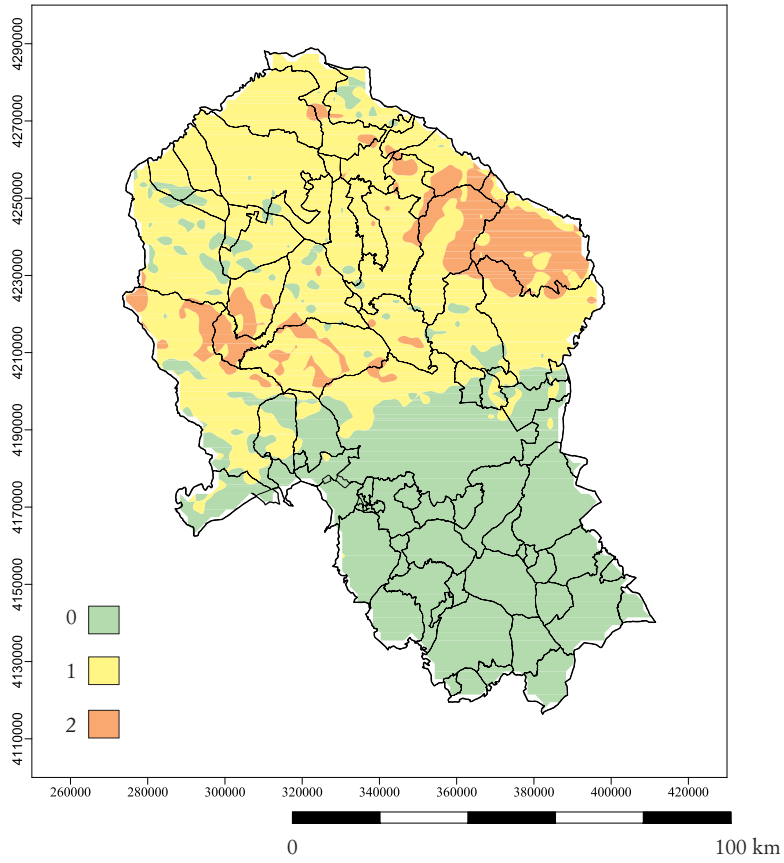


Mapa geológico 1:1.000.000



Córdoba

Categorías de exposición potencial al radón

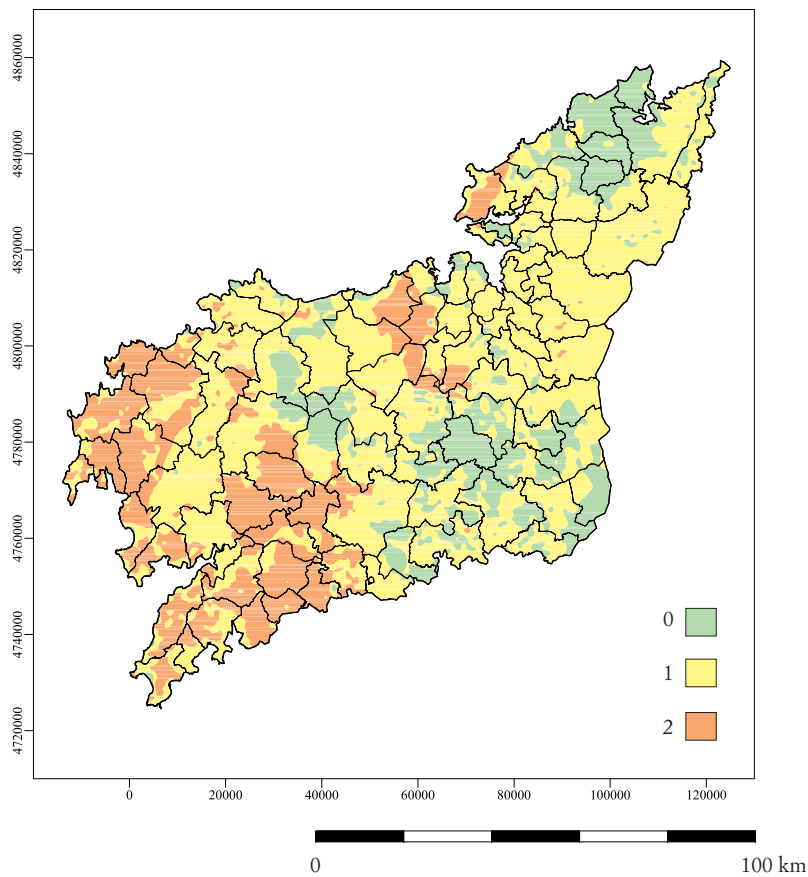


Coordenadas UTM
HUSO 30

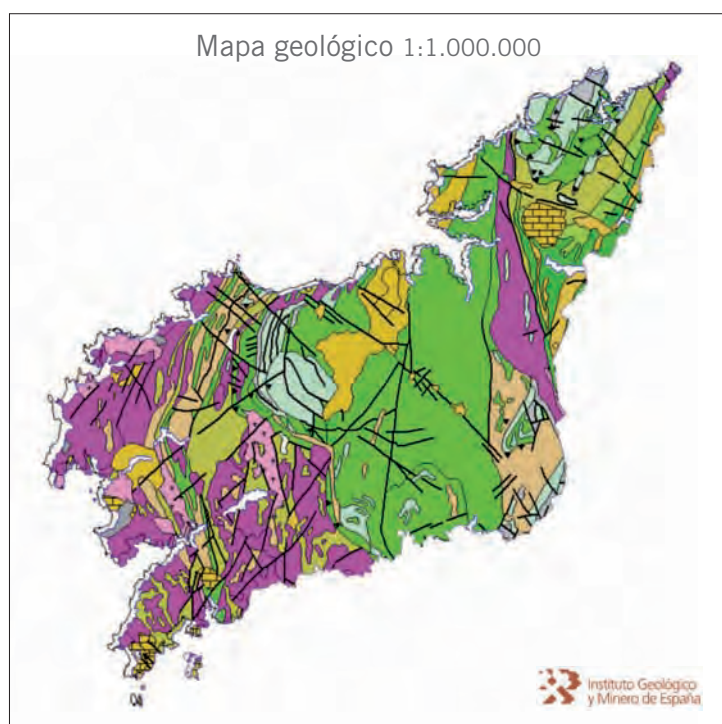


A Coruña

Categorías de exposición potencial al radón

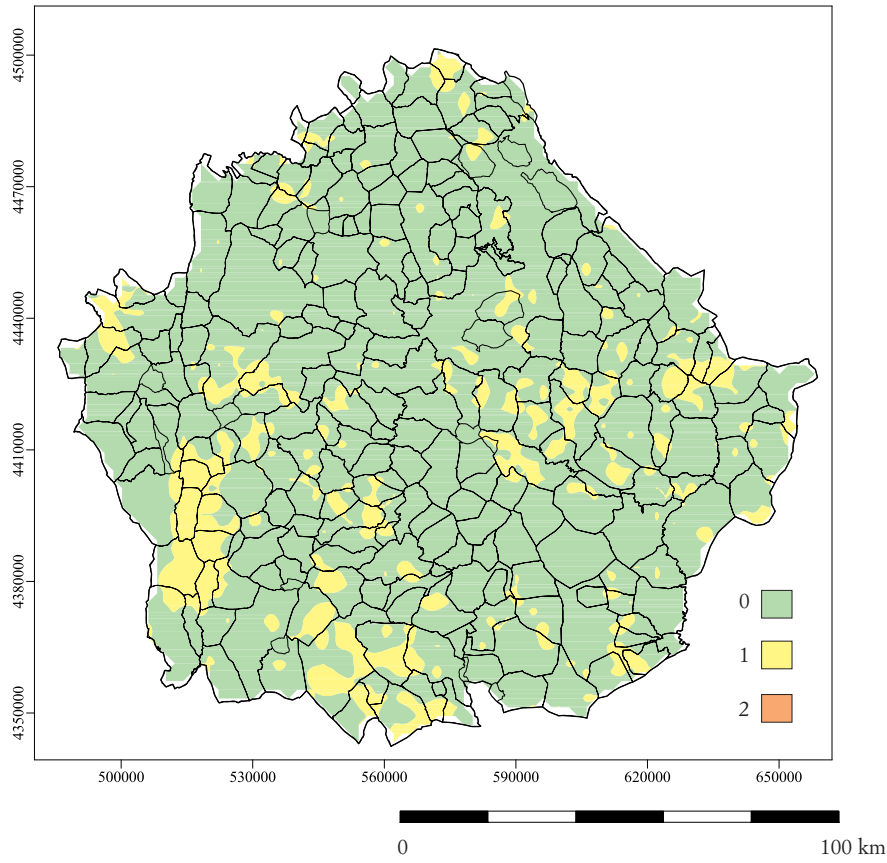


Coordenadas UTM
HUSO 30

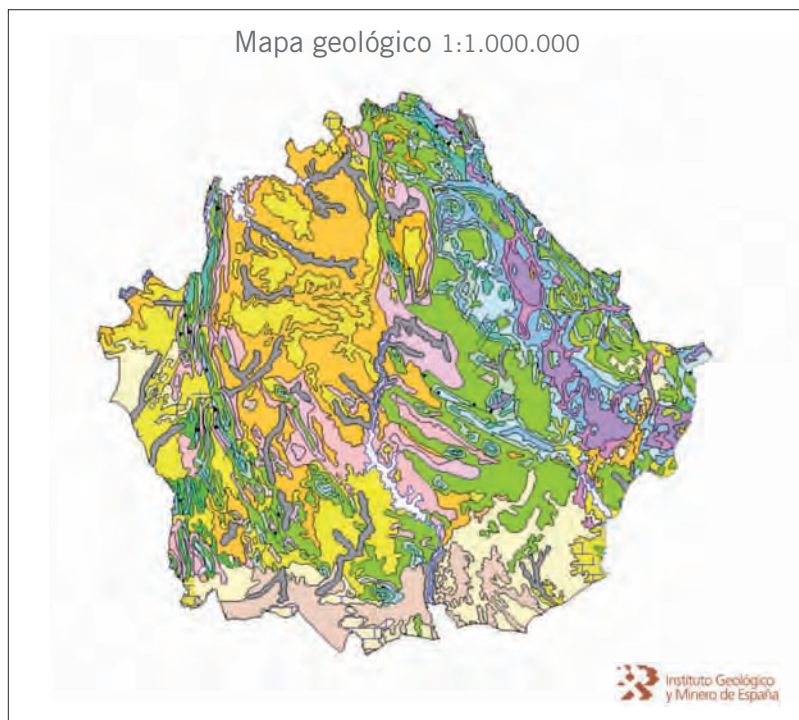


Cuenca

Categorías de exposición potencial al radón

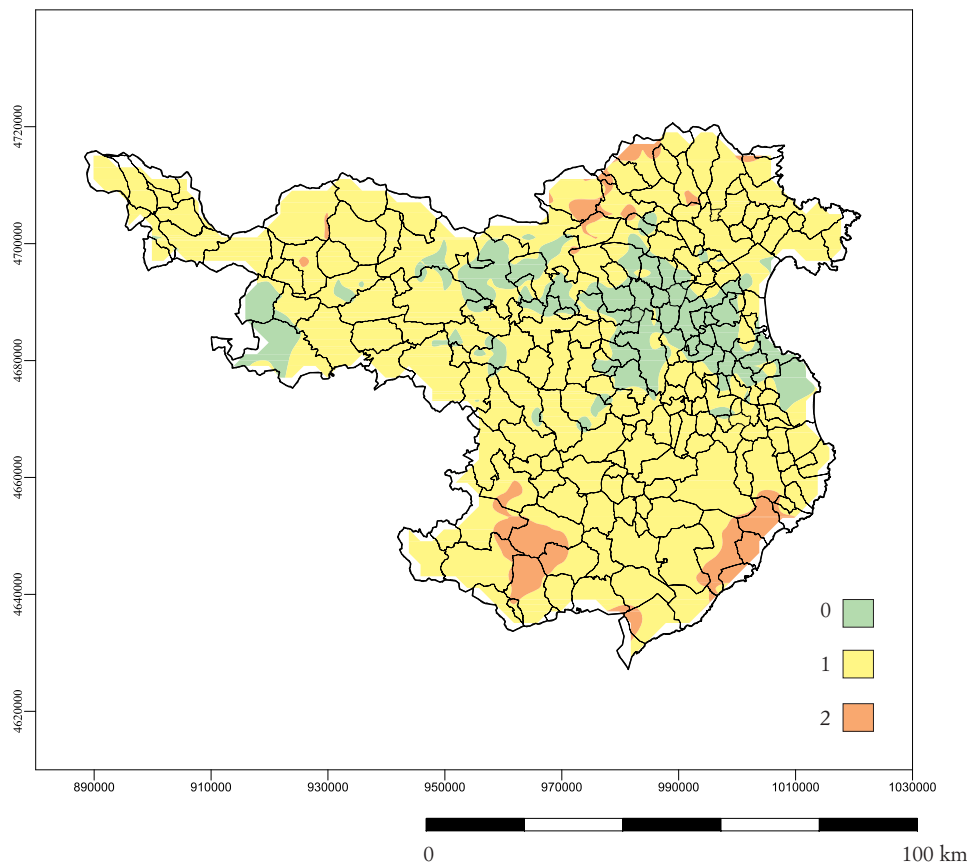


Coordenadas UTM
HUSO 30

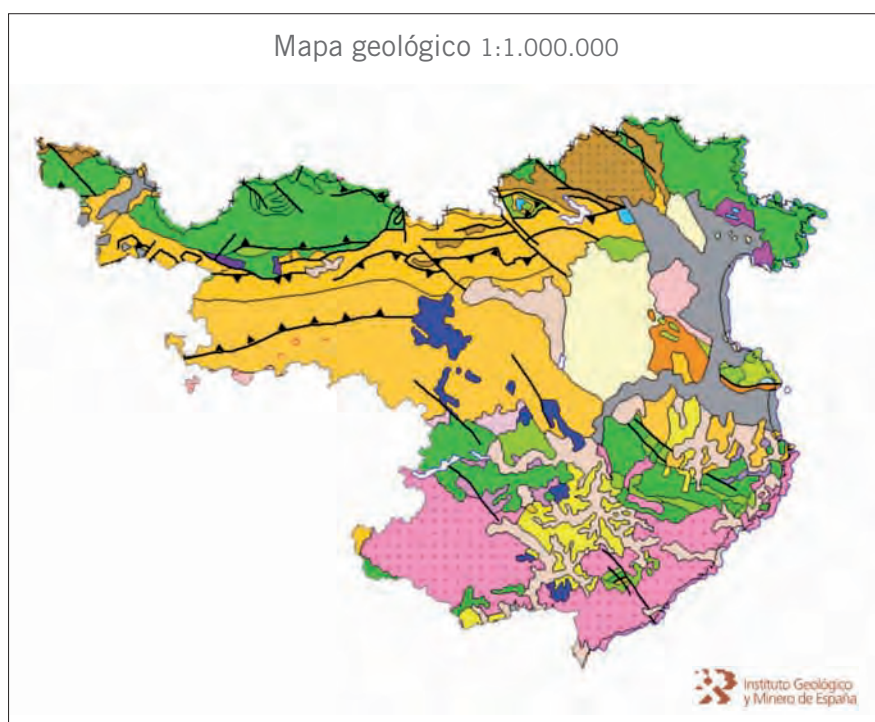


Girona

Categorías de exposición potencial al radón

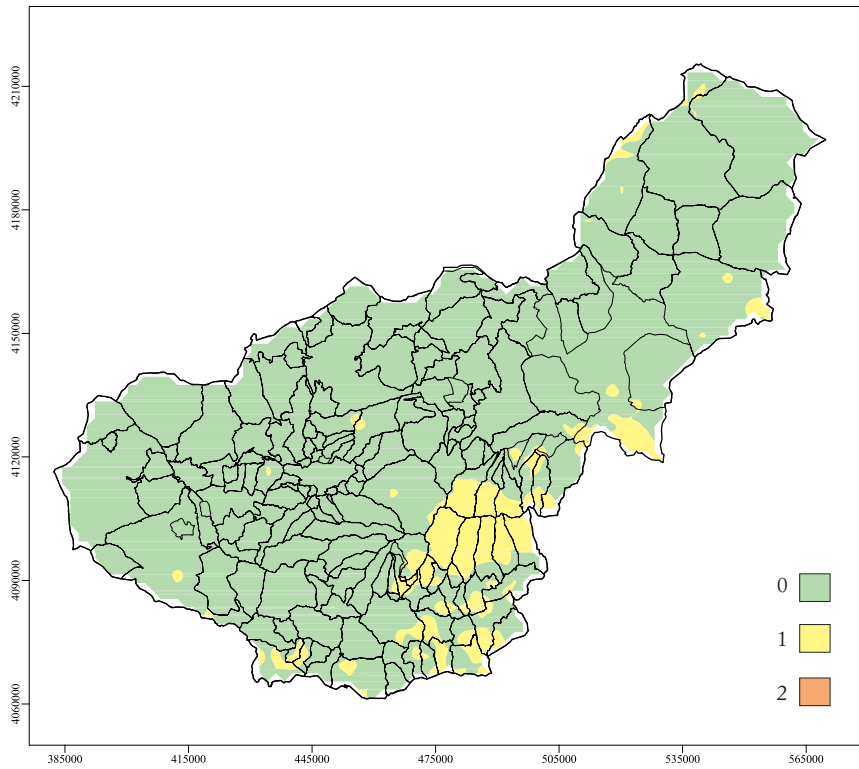


Coordenadas UTM
HUSO 30

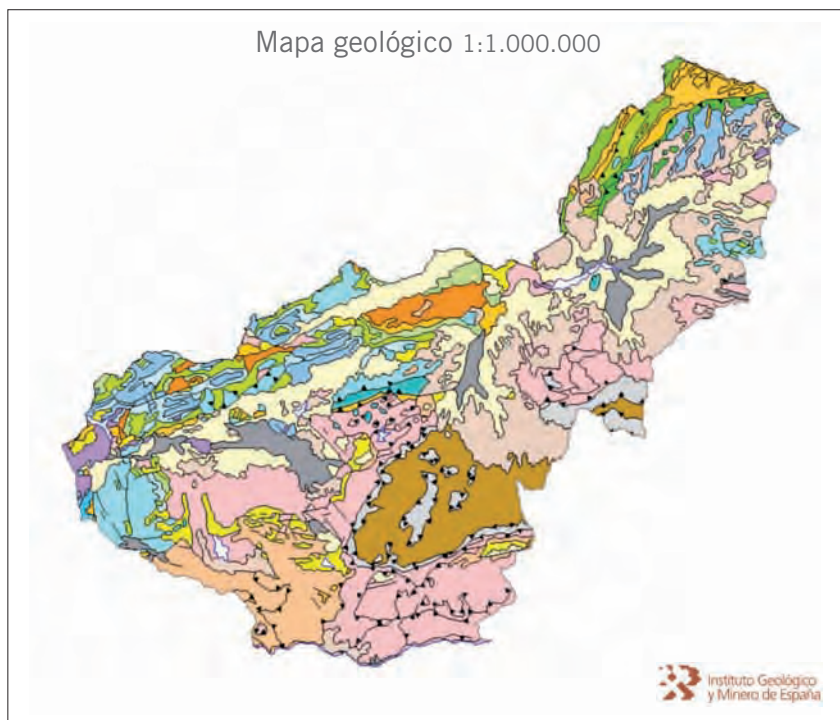


Granada

Categorías de exposición potencial al radón

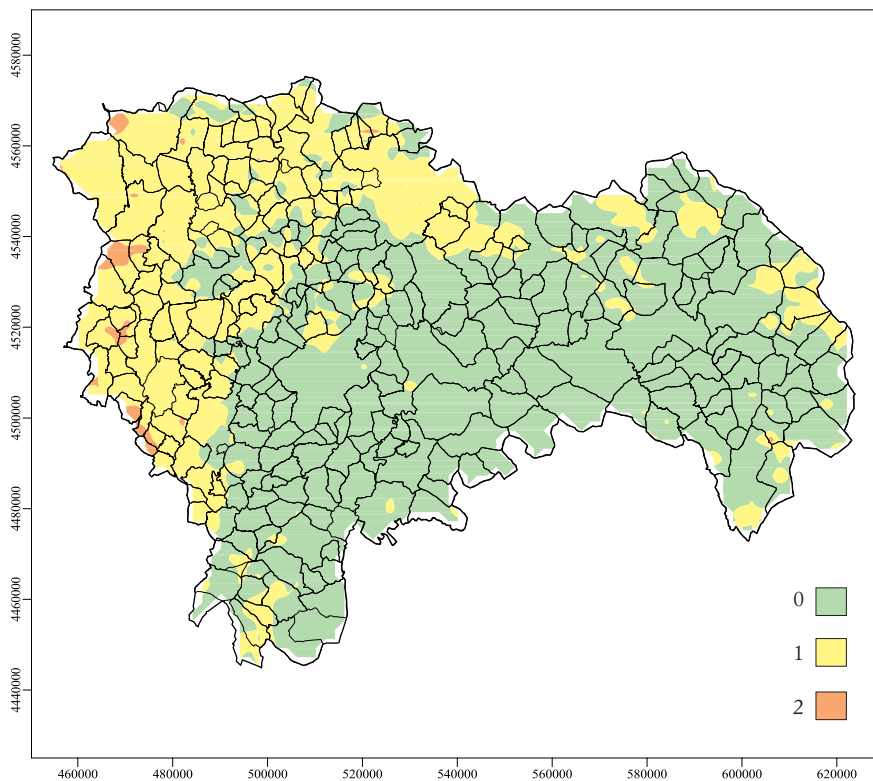


Coordenadas UTM
HUSO 30

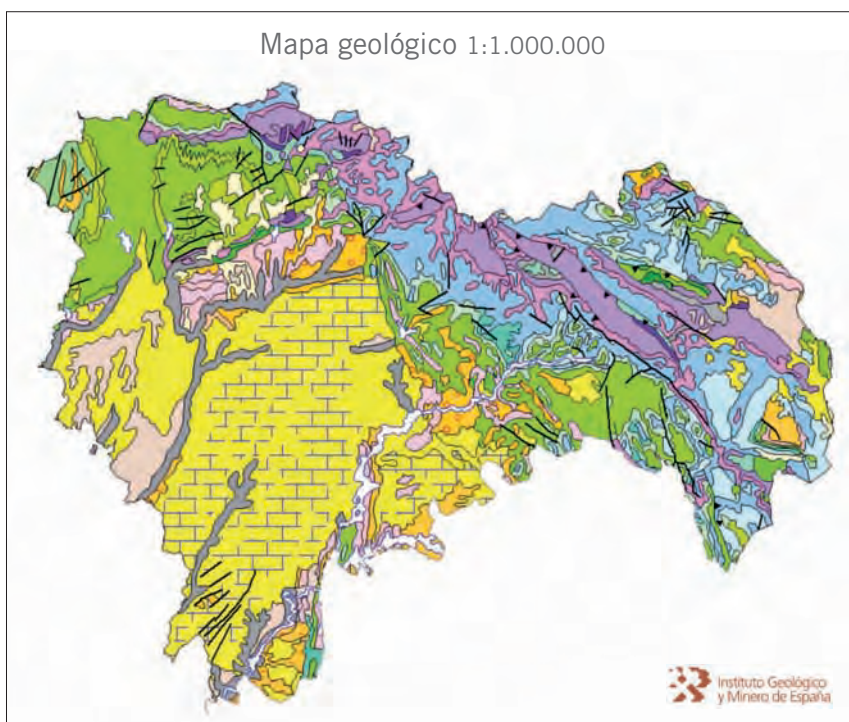


Guadalajara

Categorías de exposición potencial al radón

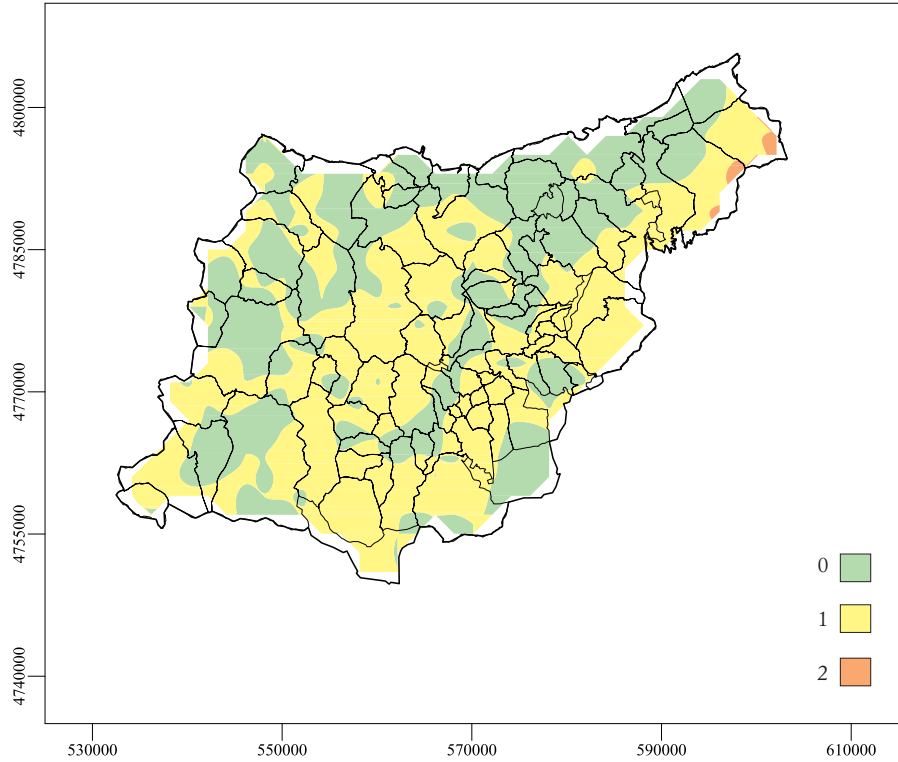


Coordenadas UTM
HUSO 30



Guipúzcoa

Categorías de exposición potencial al radón

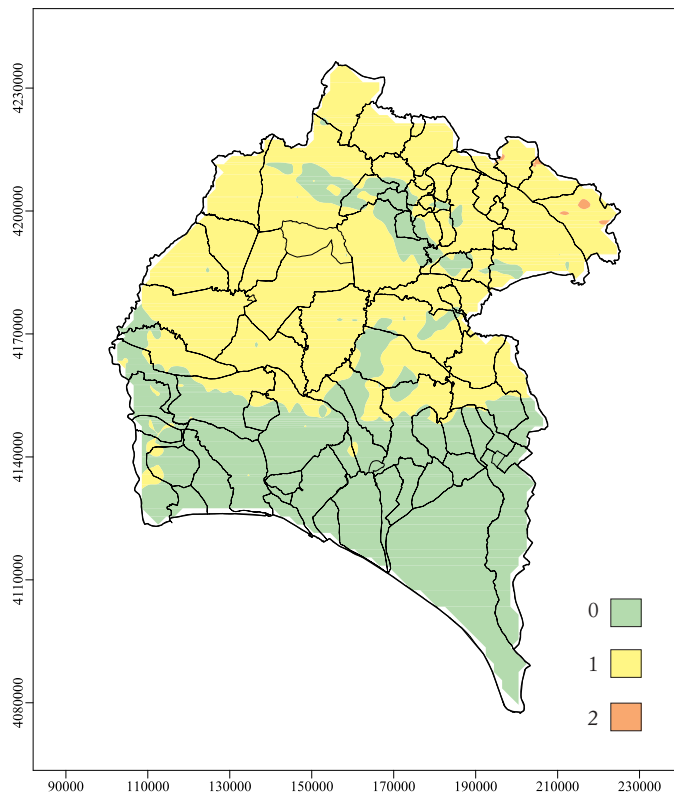


Coordenadas UTM
HUSO 30

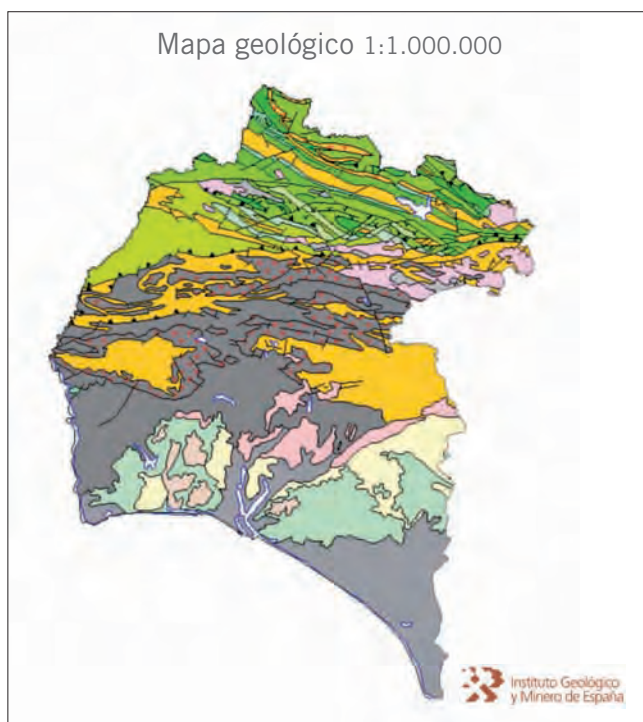


Huelva

Categorías de exposición potencial al radón

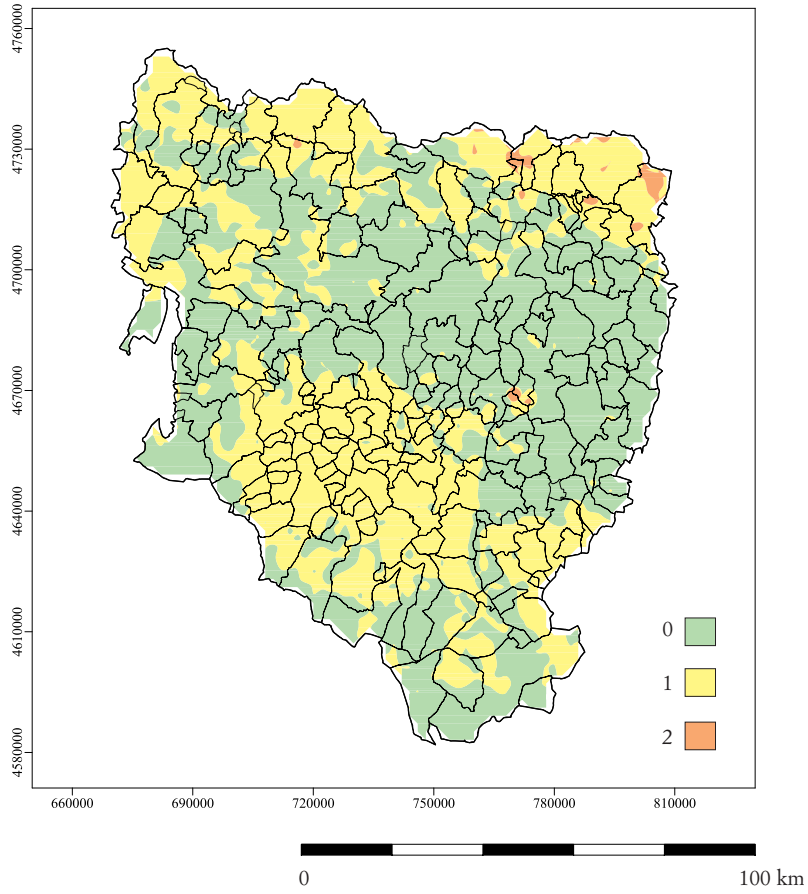


Coordenadas UTM
HUSO 30



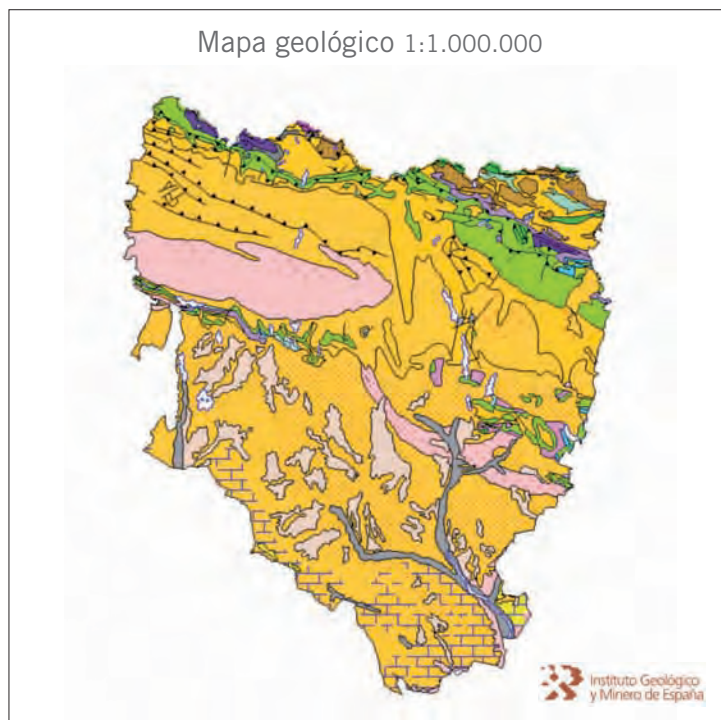
Huesca

Categorías de exposición potencial al radón



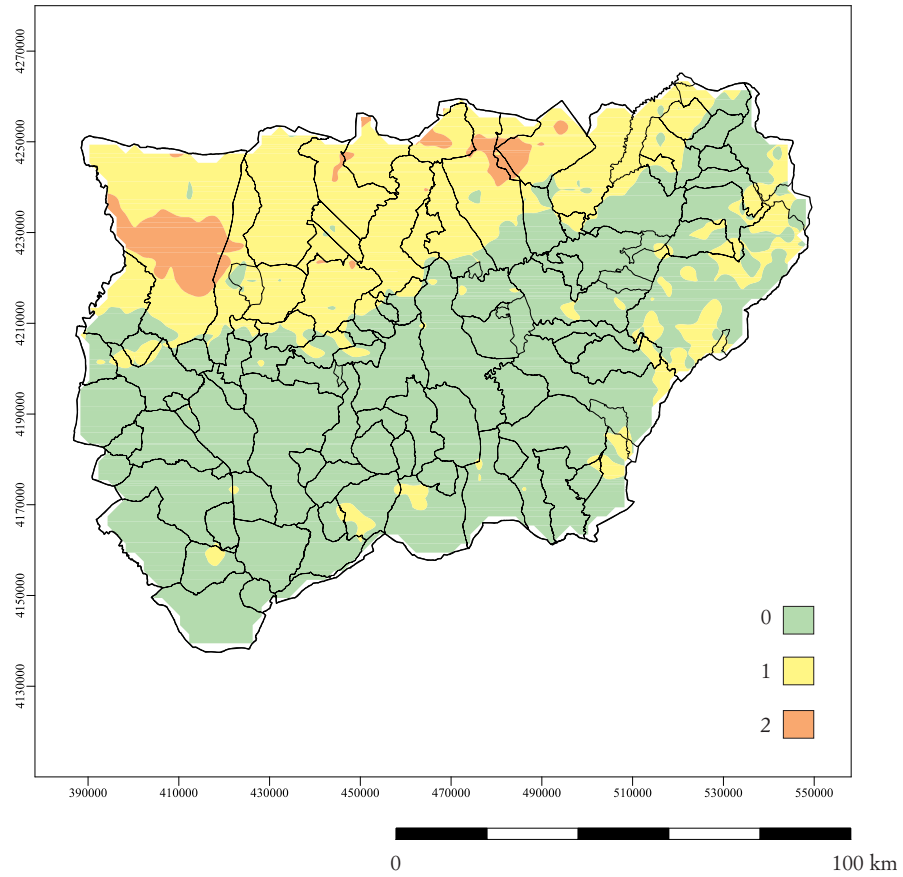
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000

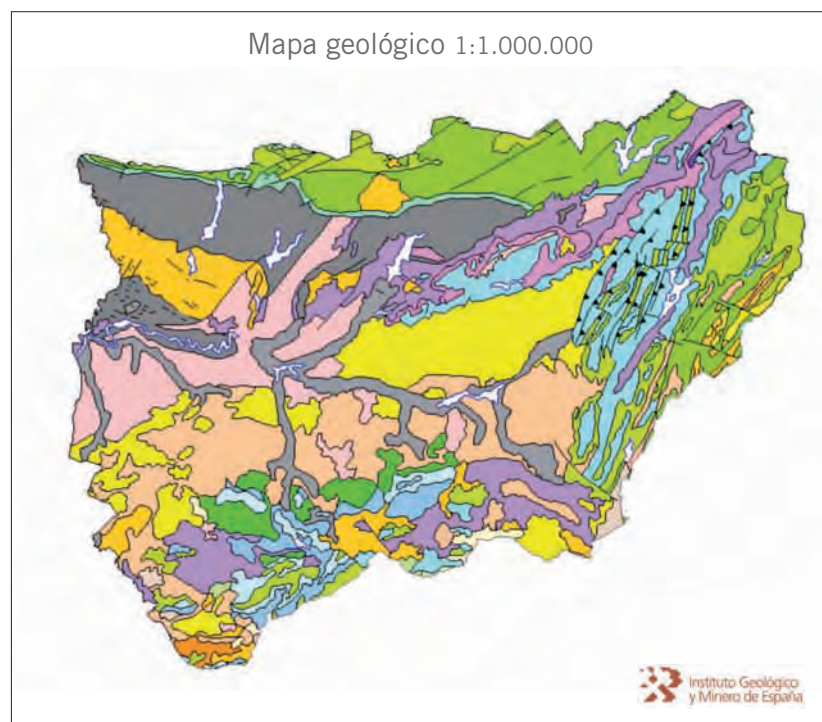


Jaén

Categorías de exposición potencial al radón

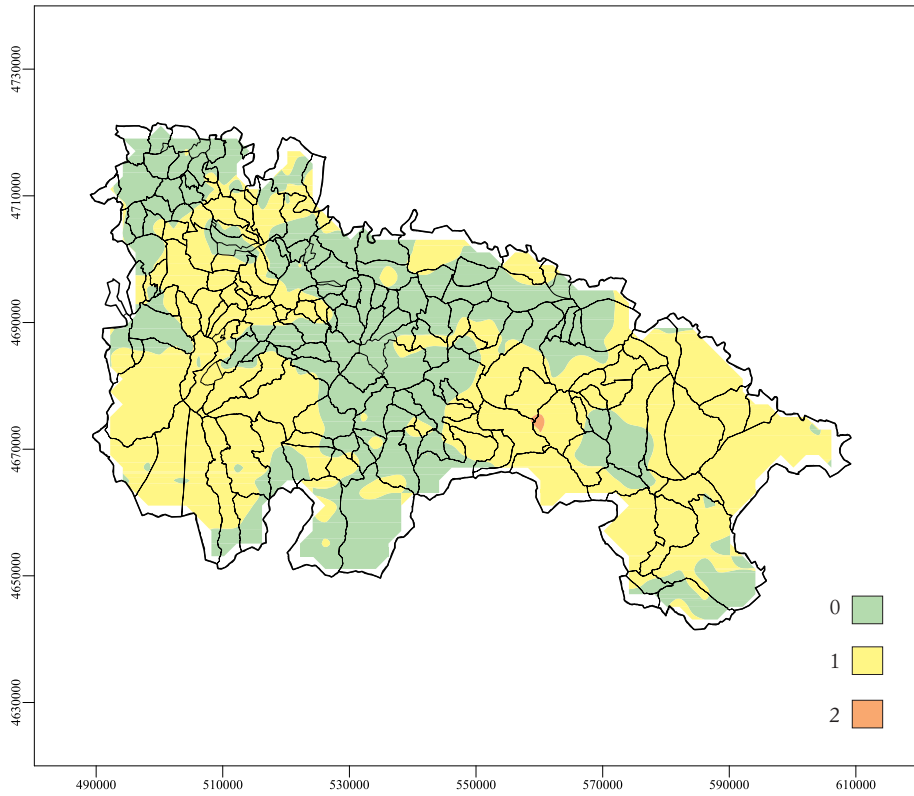


Coordenadas UTM
HUSO 30



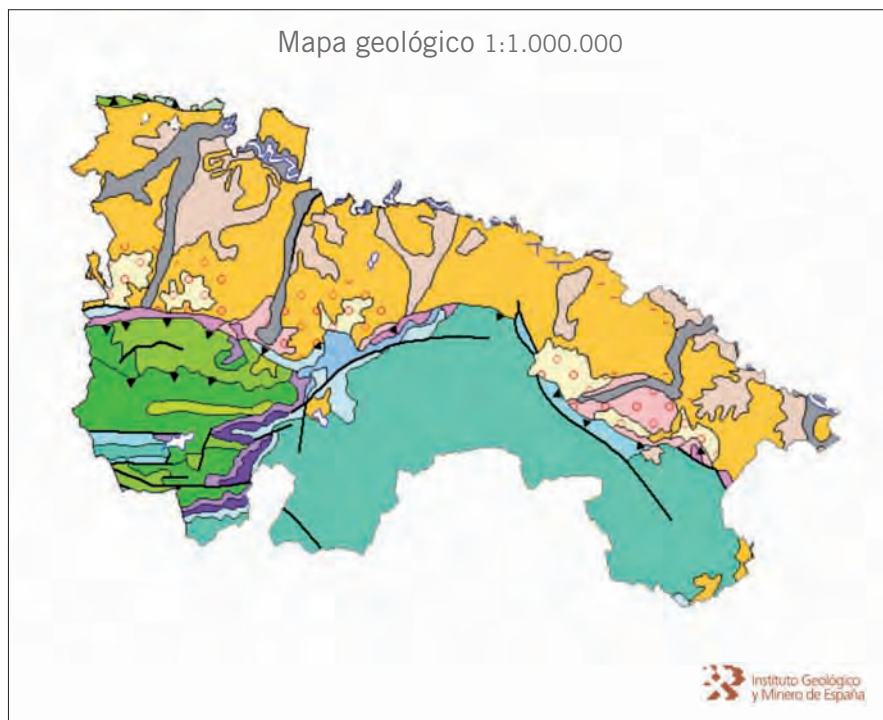
La Rioja

Categorías de exposición potencial al radón



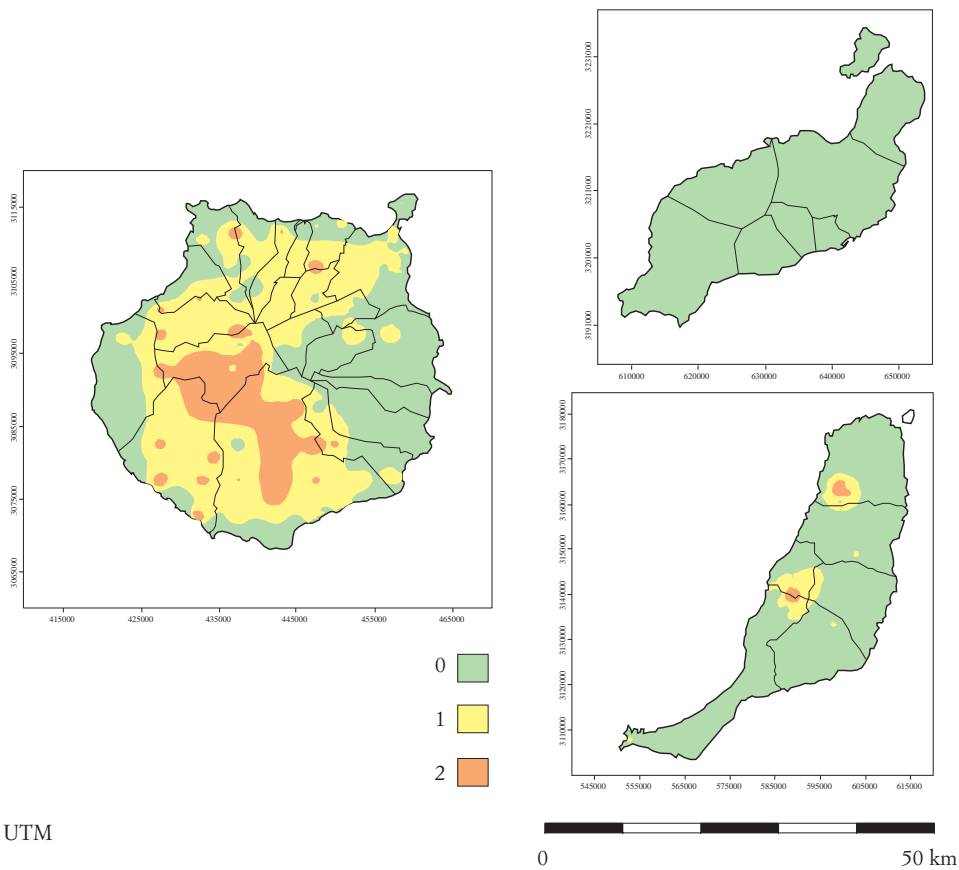
Coordenadas UTM
HUSO 30

0 100 km

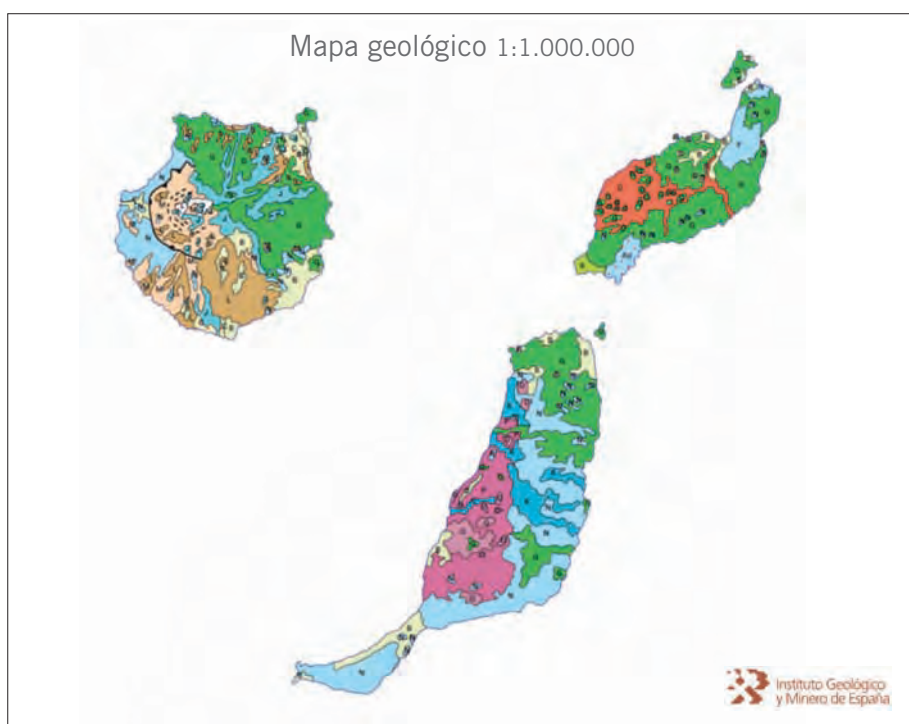


Las Palmas

Categorías de exposición potencial al radón

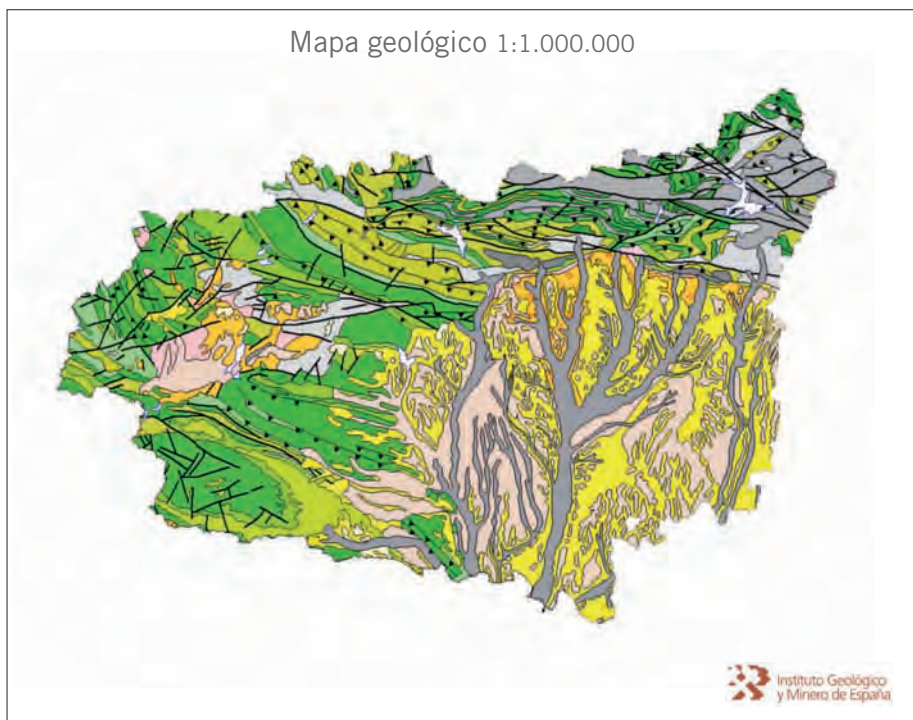
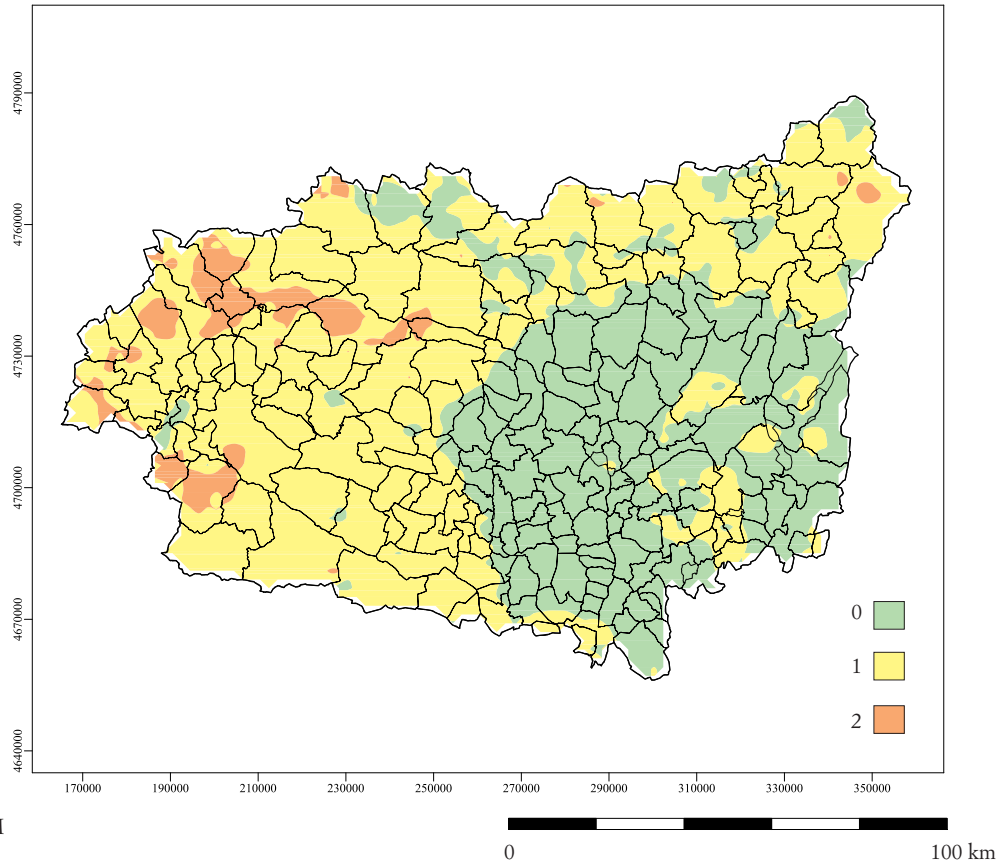


Coordenadas UTM
HUSO 30



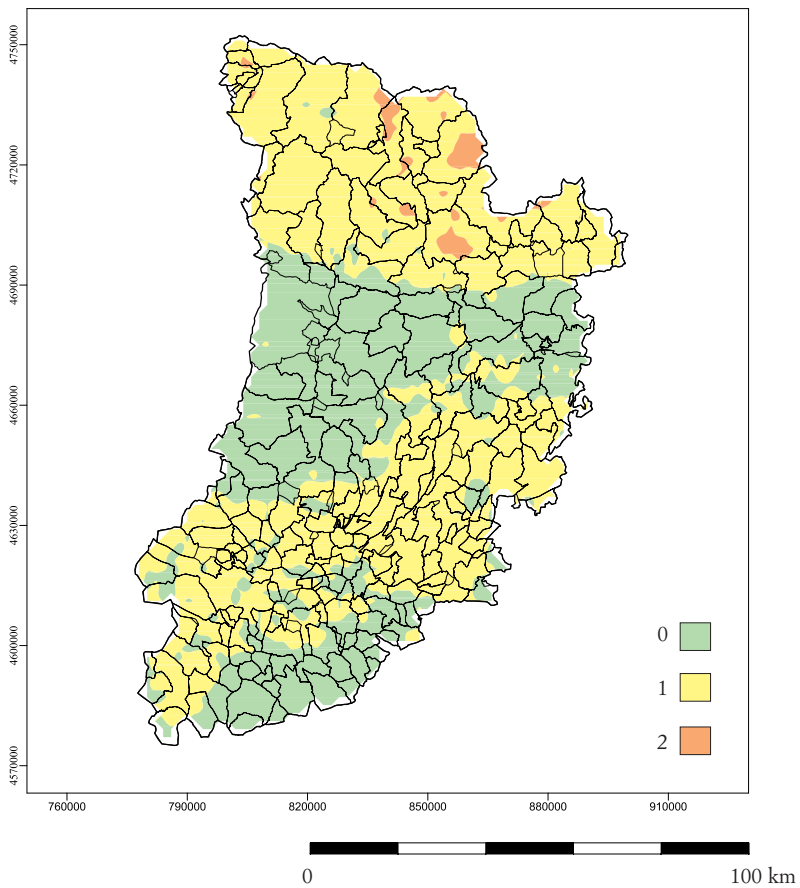
León

Categorías de exposición potencial al radón

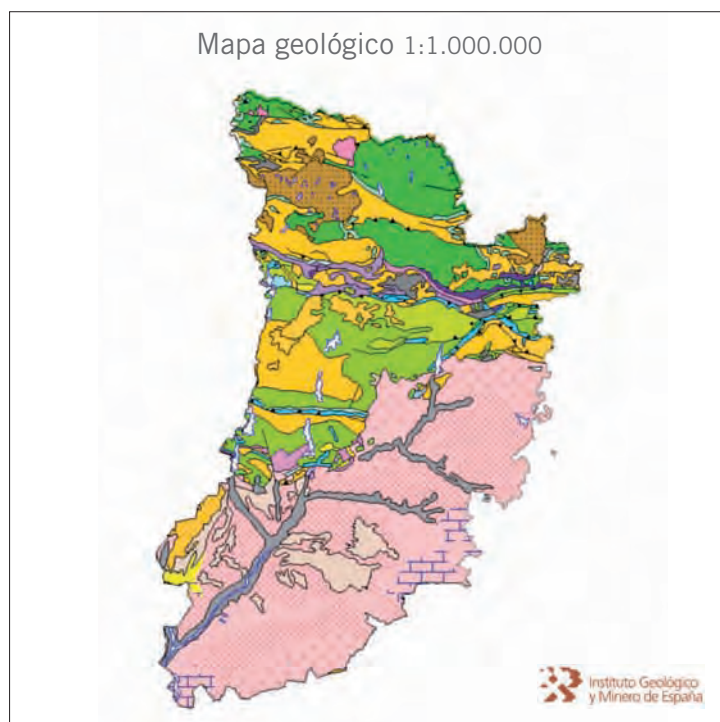


Lleida

Categorías de exposición potencial al radón

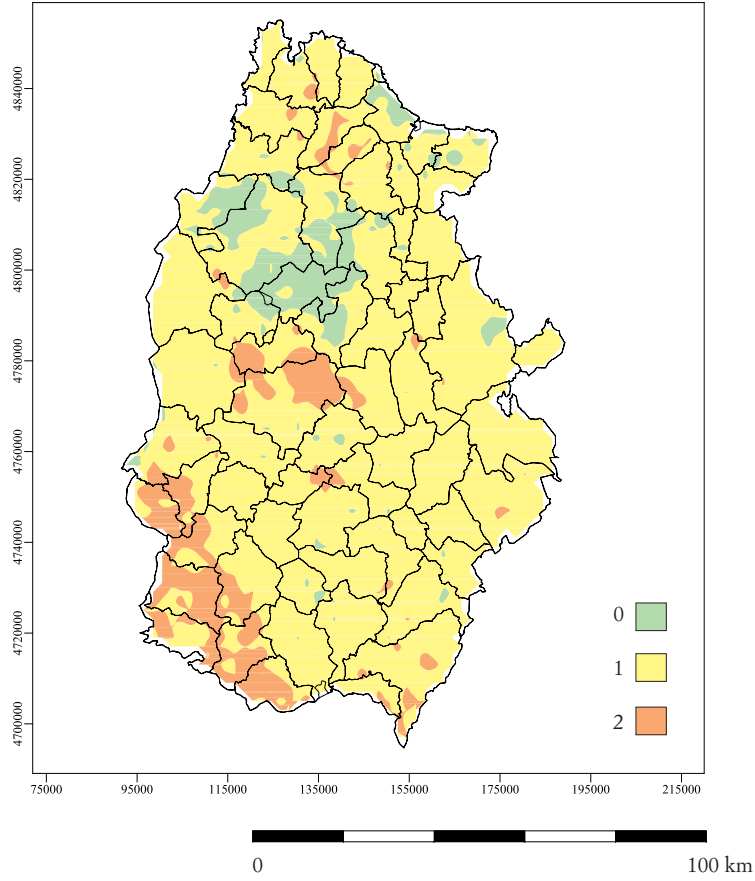


Coordenadas UTM
HUSO 30



Lugo

Categorías de exposición potencial al radón



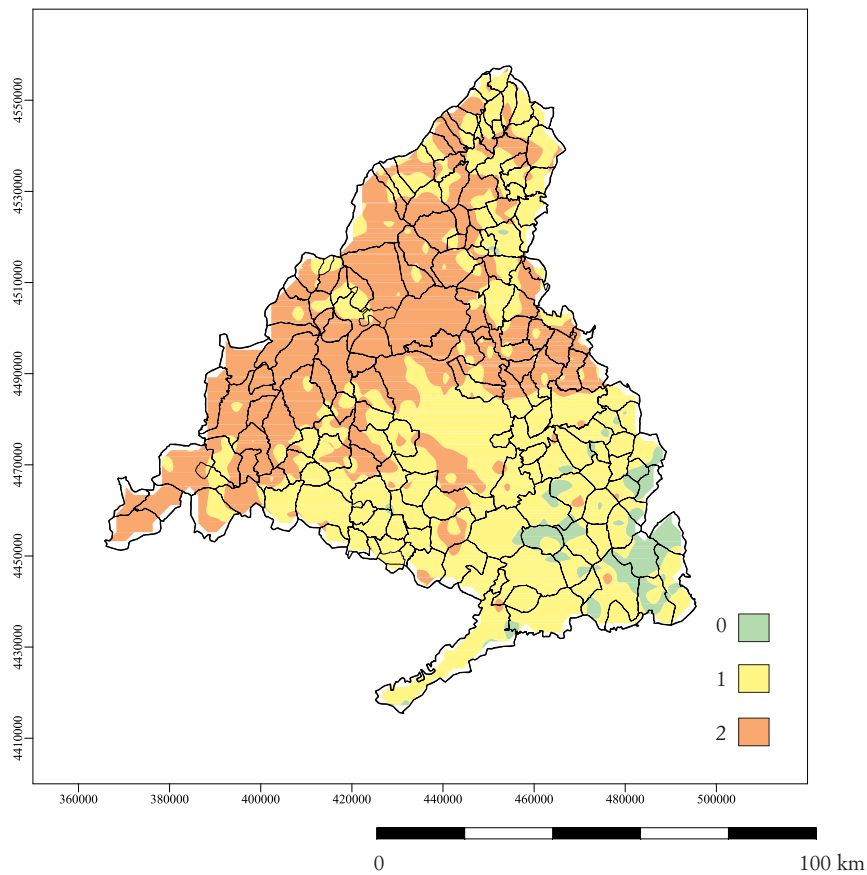
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000

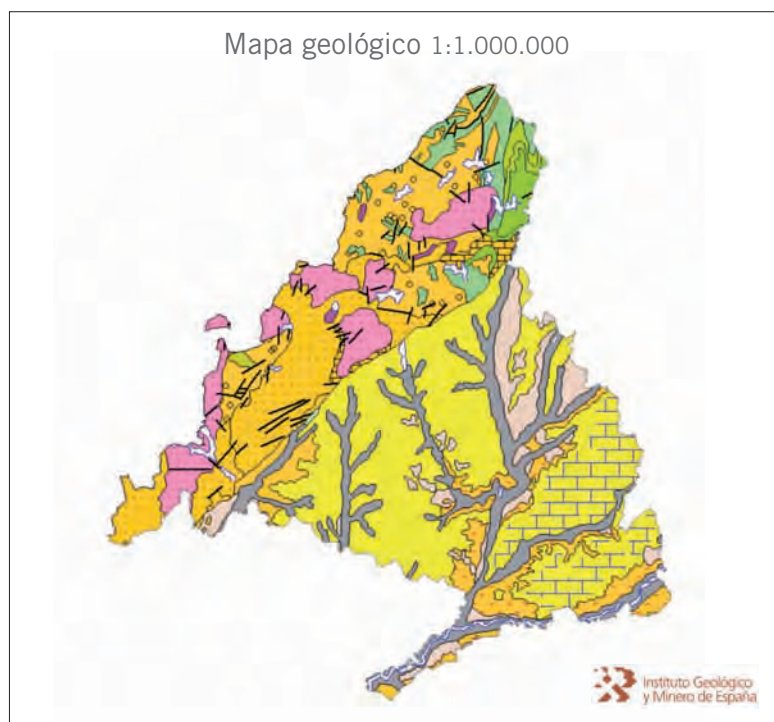


Madrid

Categorías de exposición potencial al radón

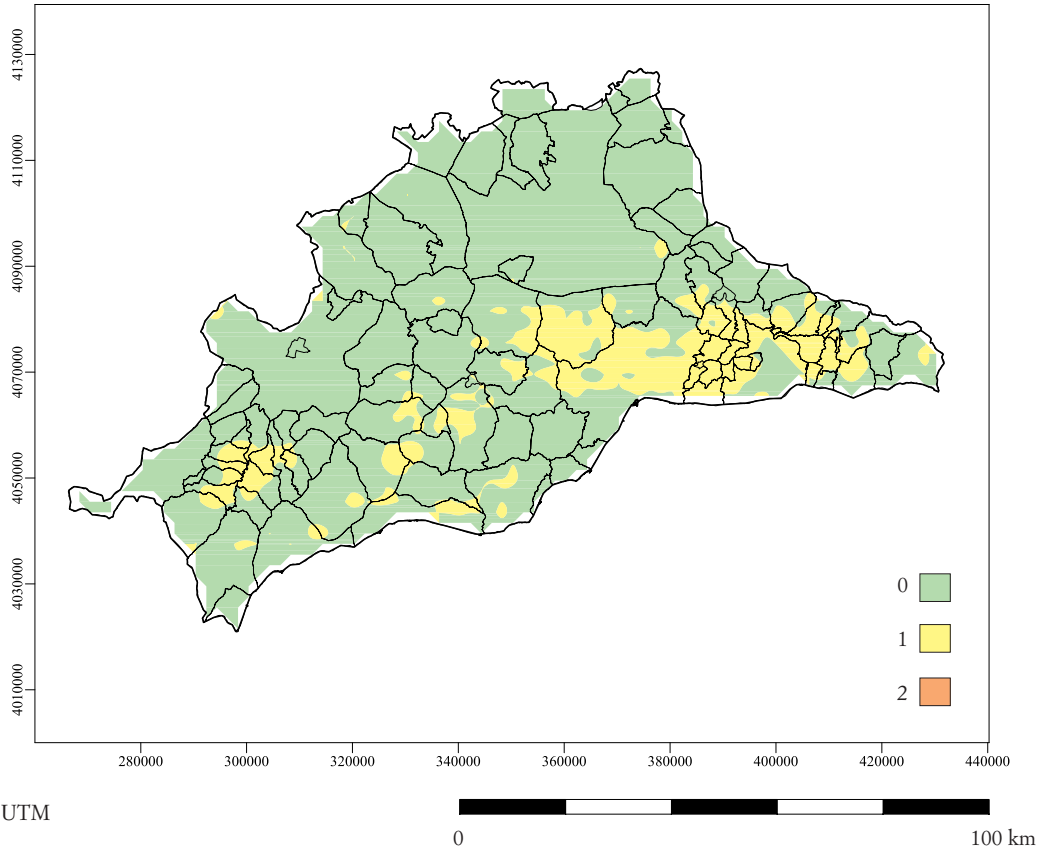


Coordenadas UTM
HUSO 30



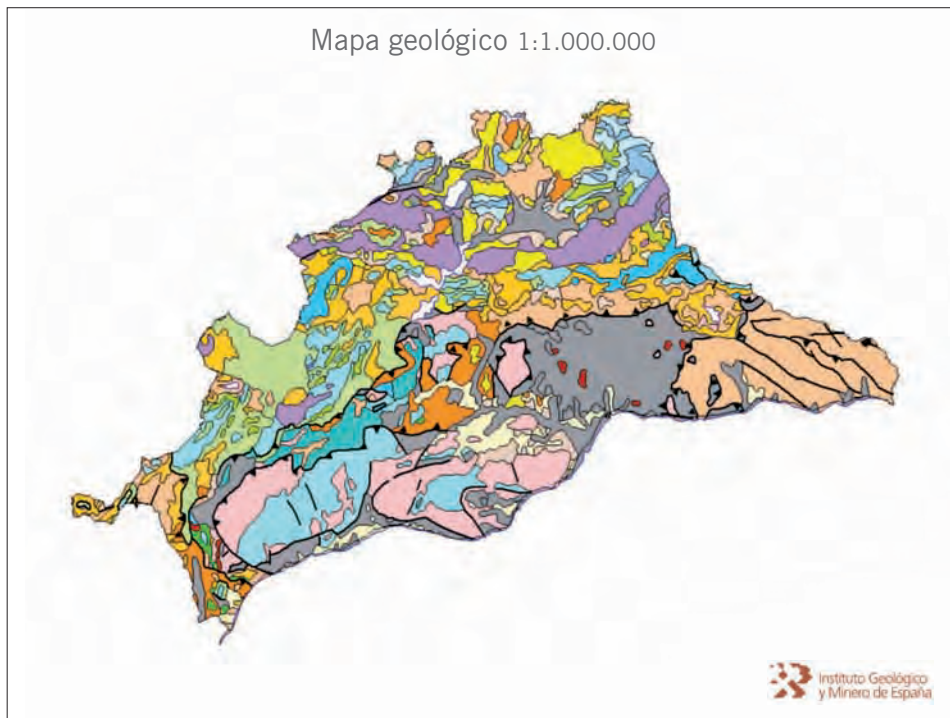
Málaga

Categorías de exposición potencial al radón



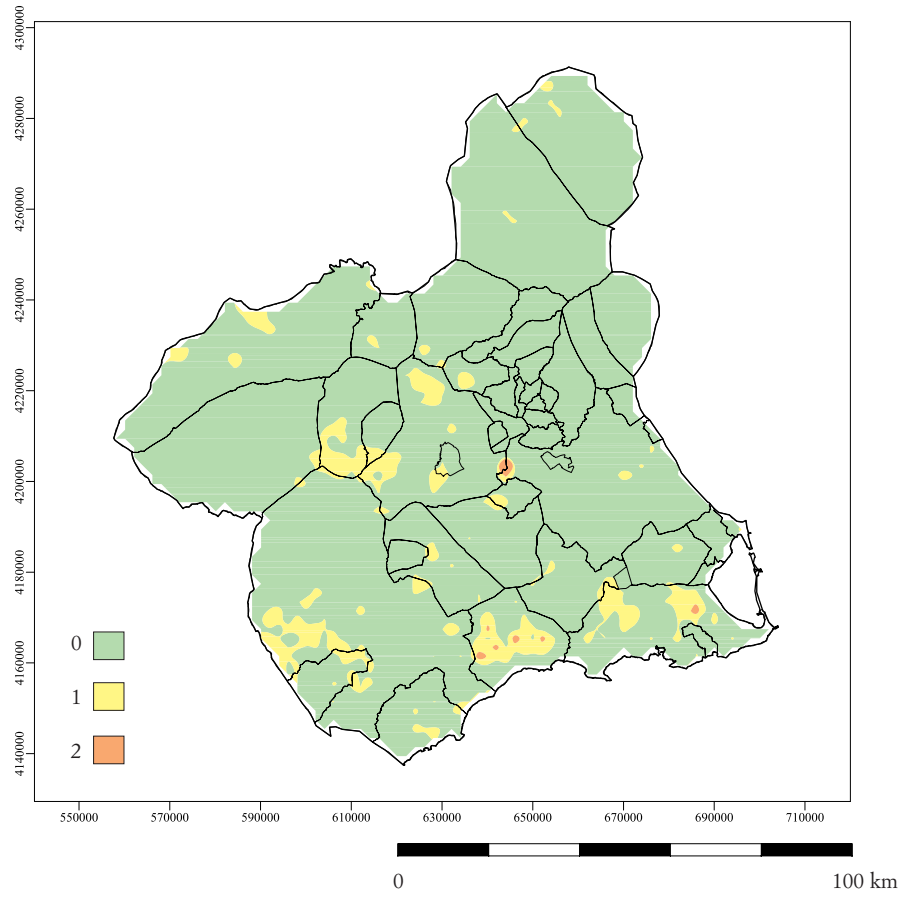
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000

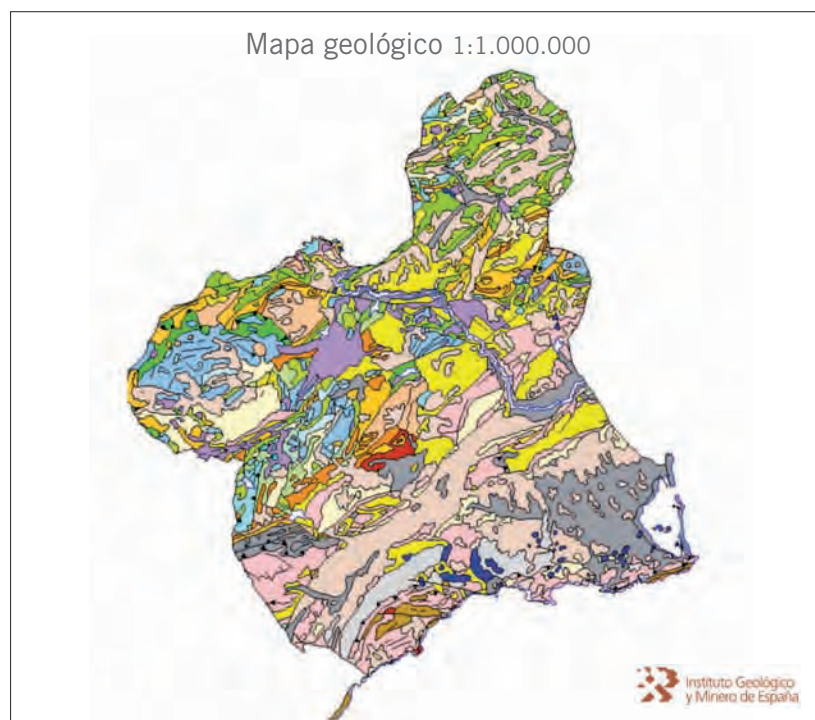


Murcia

Categorías de exposición potencial al radón

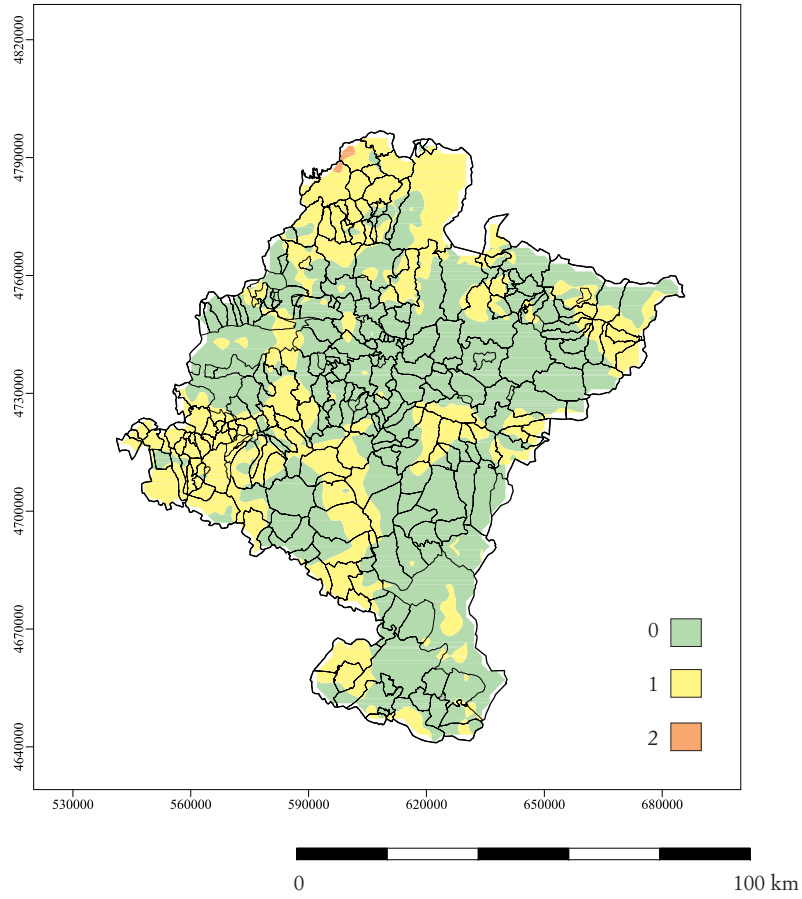


Coordenadas UTM
HUSO 30

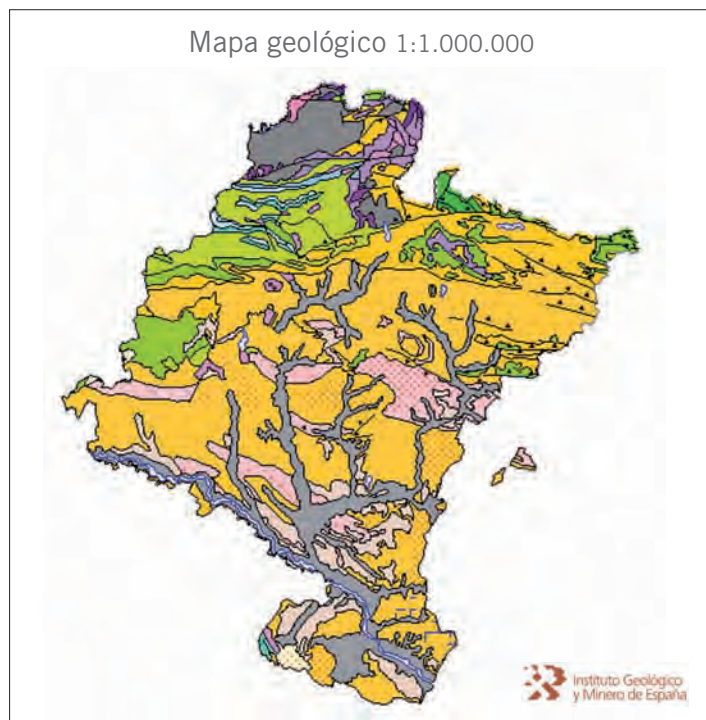


Navarra

Categorías de exposición potencial al radón

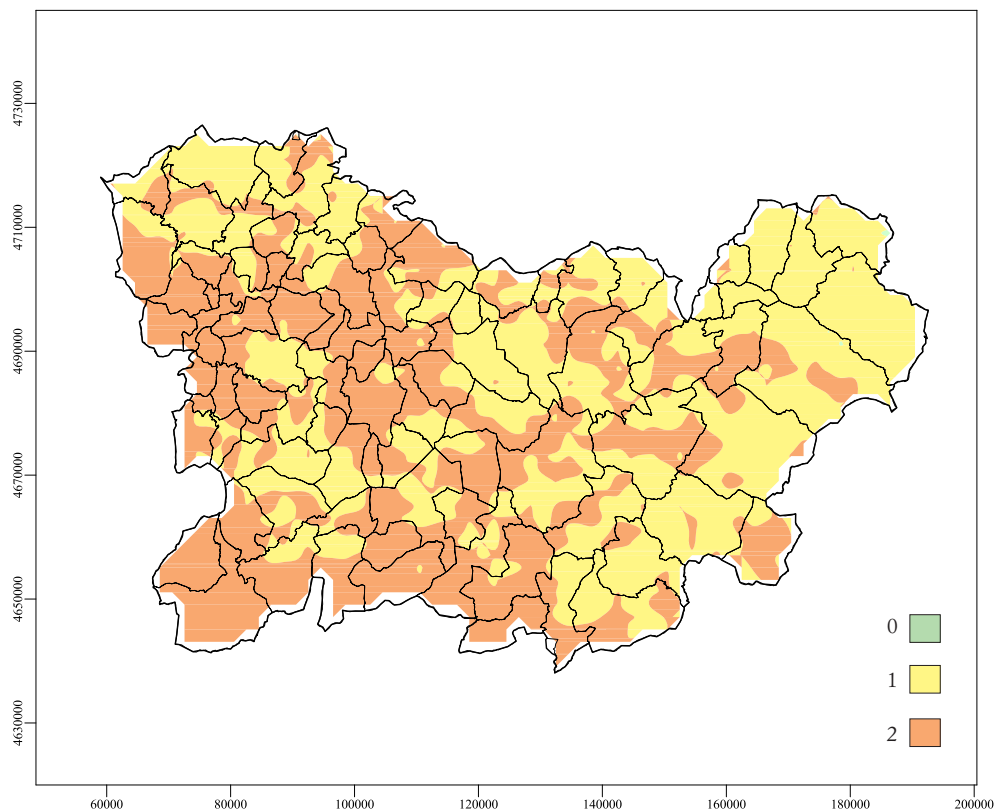


Coordenadas UTM
HUSO 30



Ourense

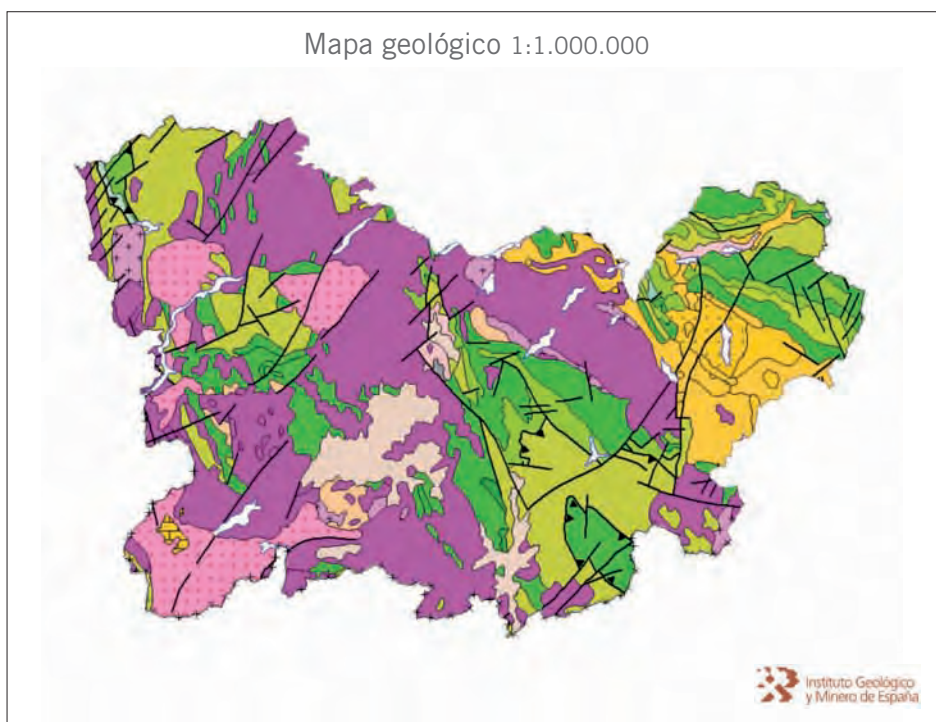
Categorías de exposición potencial al radón



Coordenadas UTM
HUSO 30

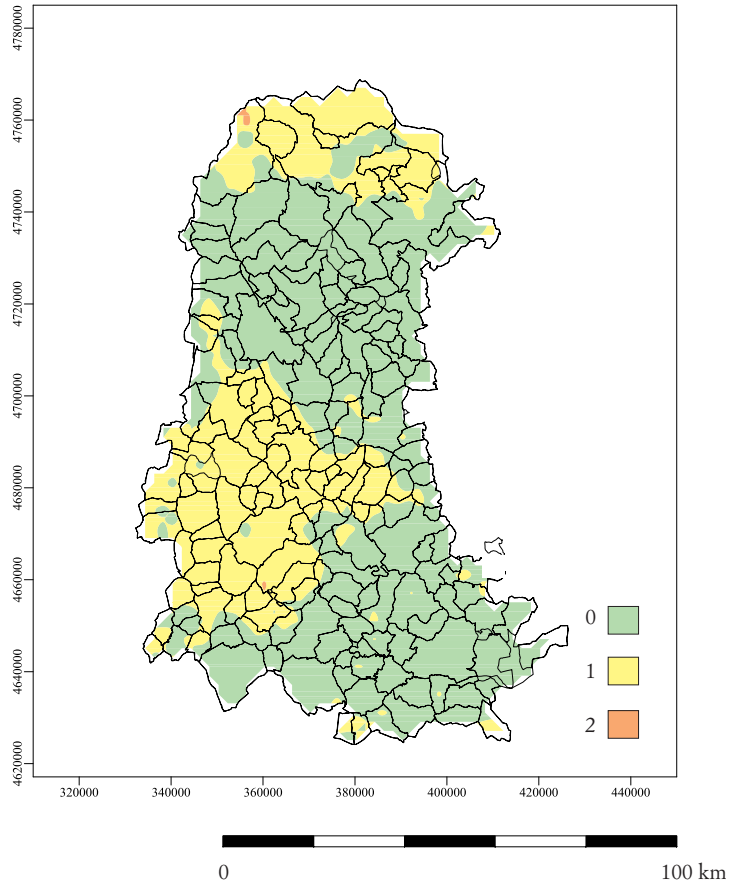


Mapa geológico 1:1.000.000

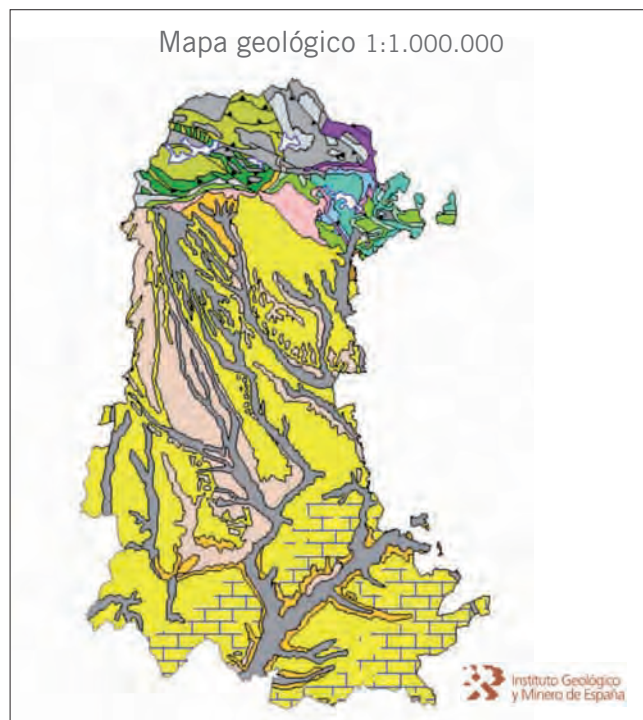


Palencia

Categorías de exposición potencial al radón

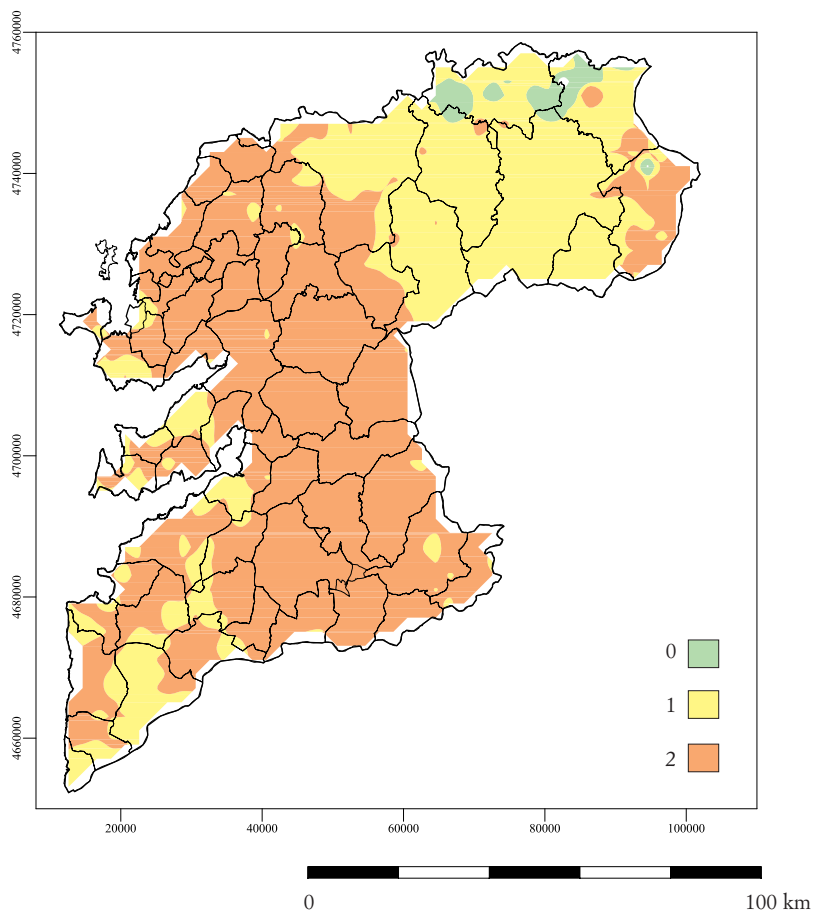


Coordenadas UTM
HUSO 30



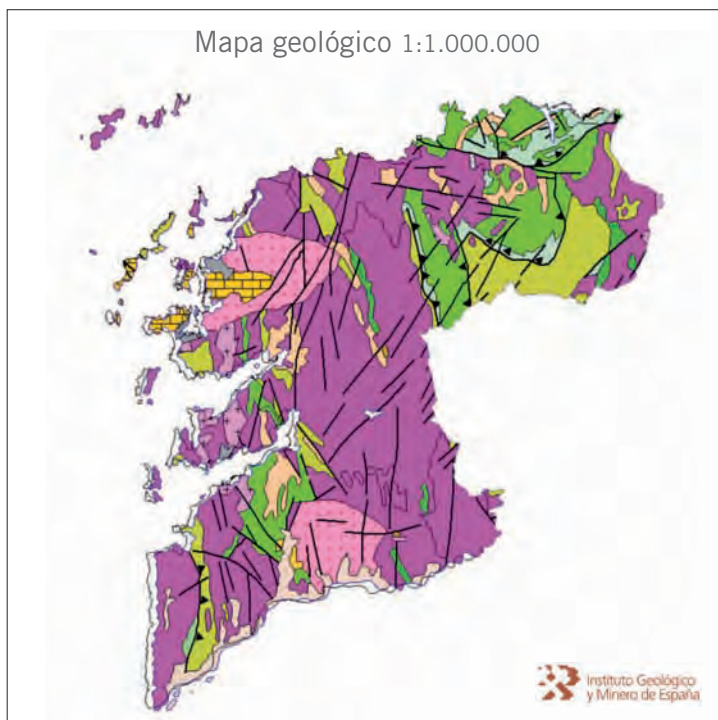
Pontevedra

Categorías de exposición potencial al radón



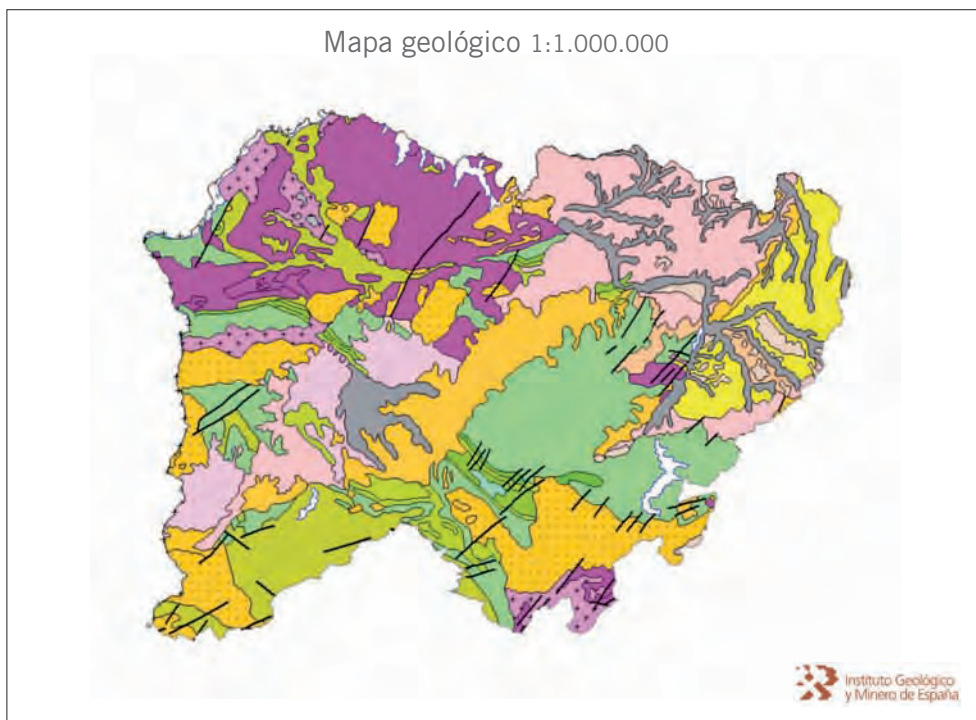
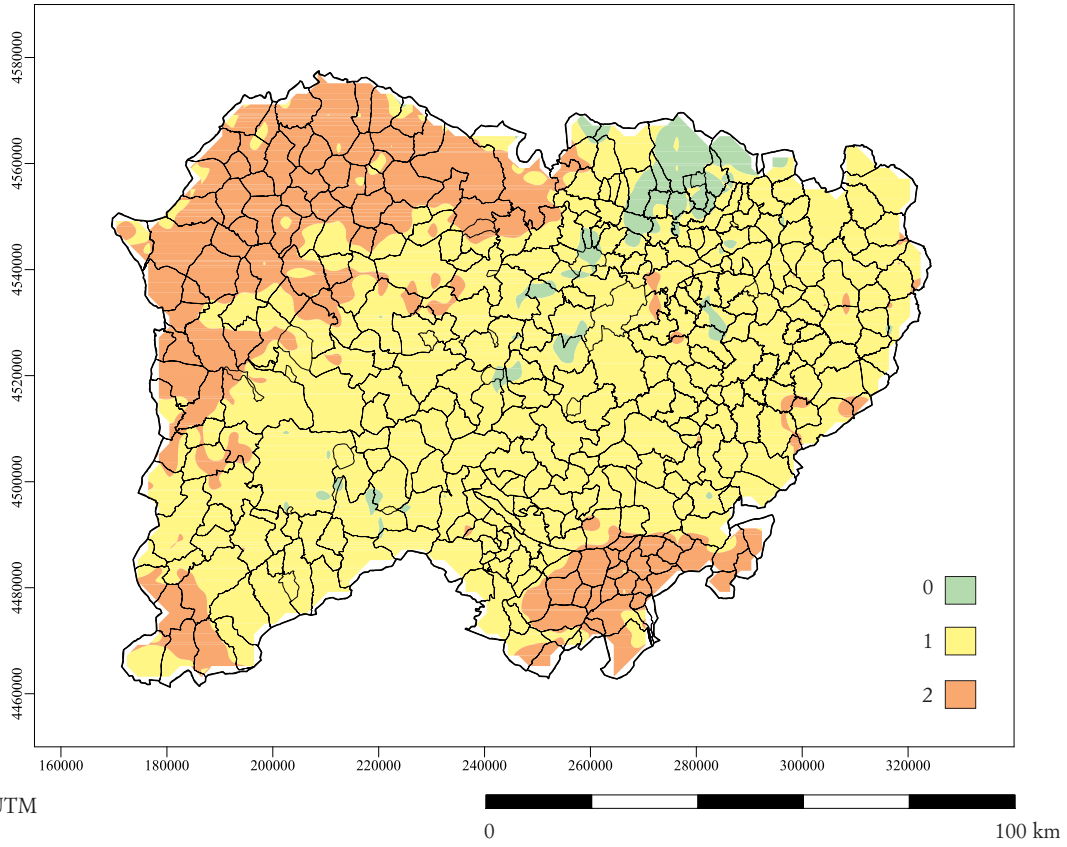
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000



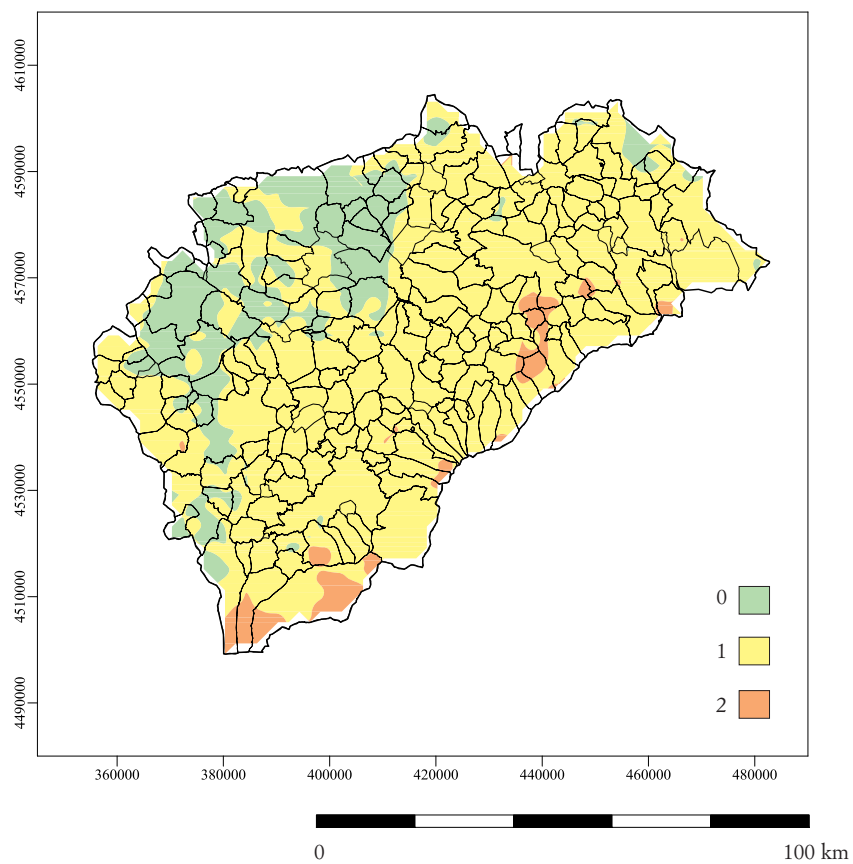
Salamanca

Categorías de exposición potencial al radón

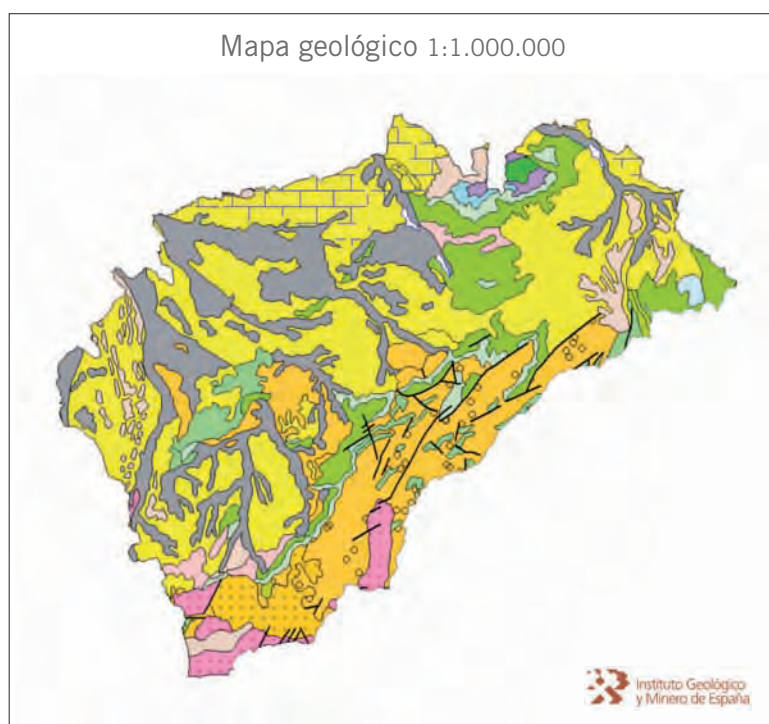


Segovia

Categorías de exposición potencial al radón

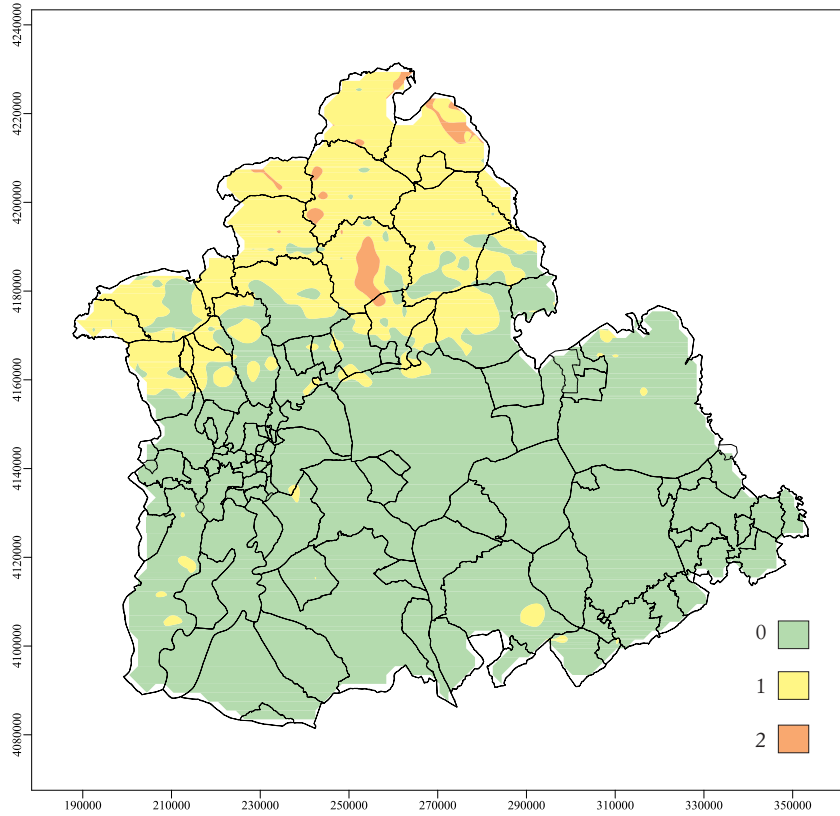


Coordenadas UTM
HUSO 30



Sevilla

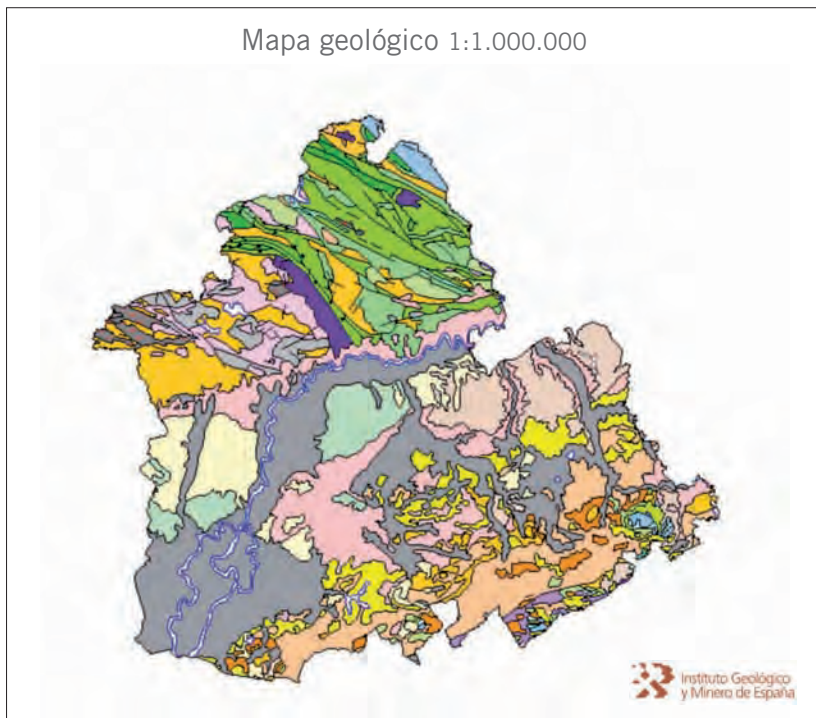
Categorías de exposición potencial al radón



Coordenadas UTM
HUSO 30

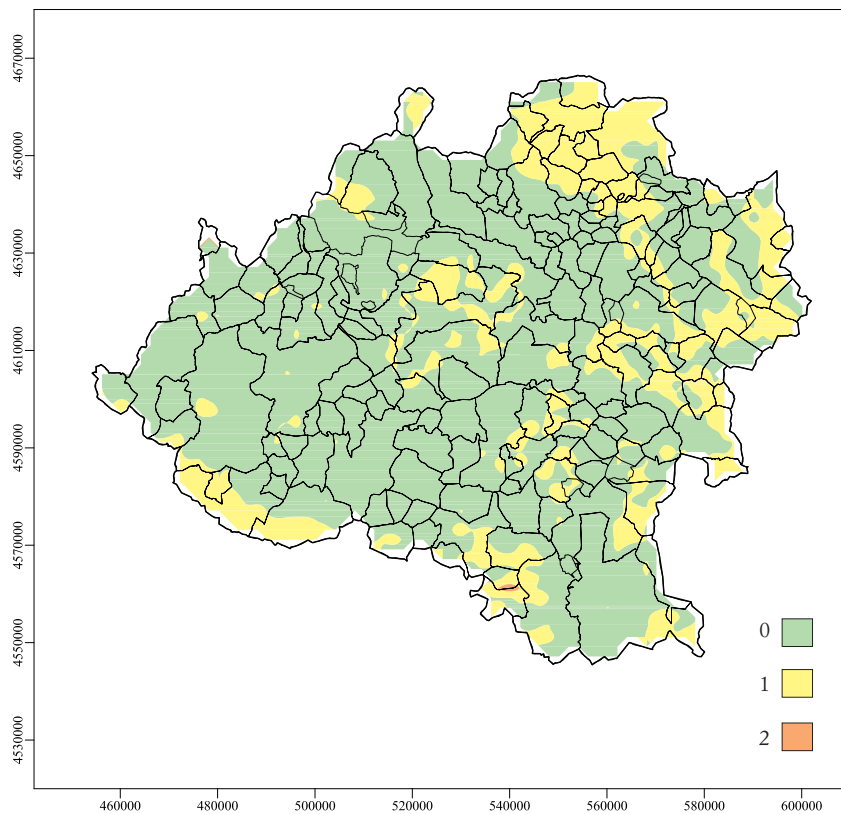


Mapa geológico 1:1.000.000



Soria

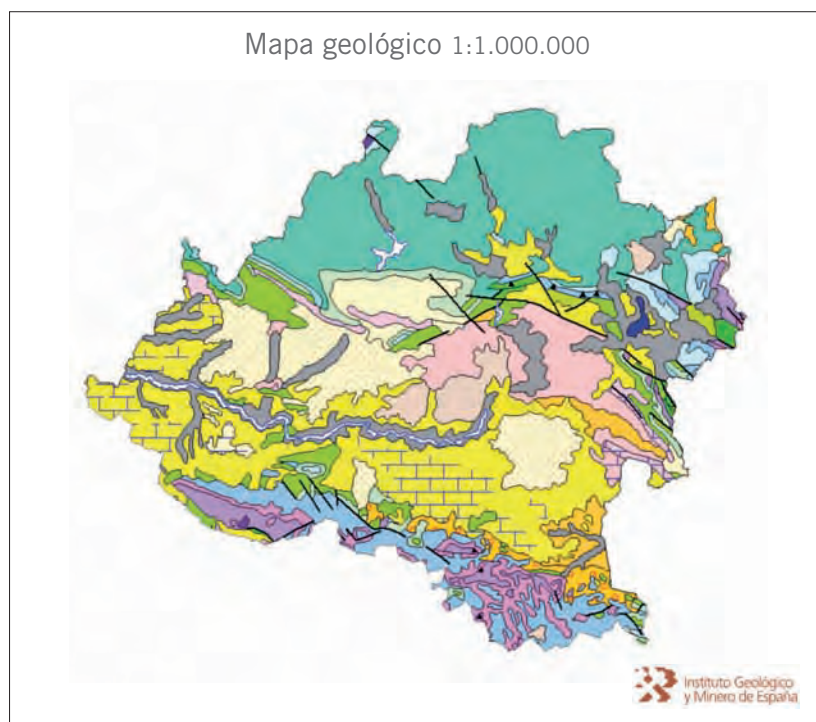
Categorías de exposición potencial al radón



Coordenadas UTM
HUSO 30

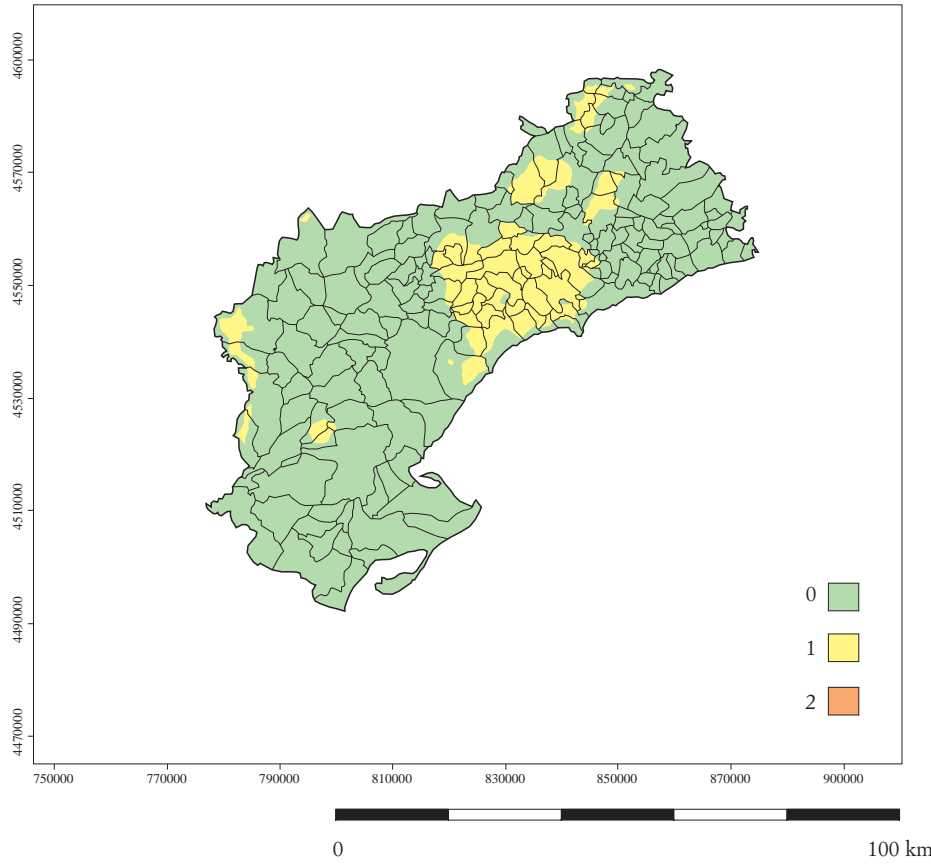


Mapa geológico 1:1.000.000

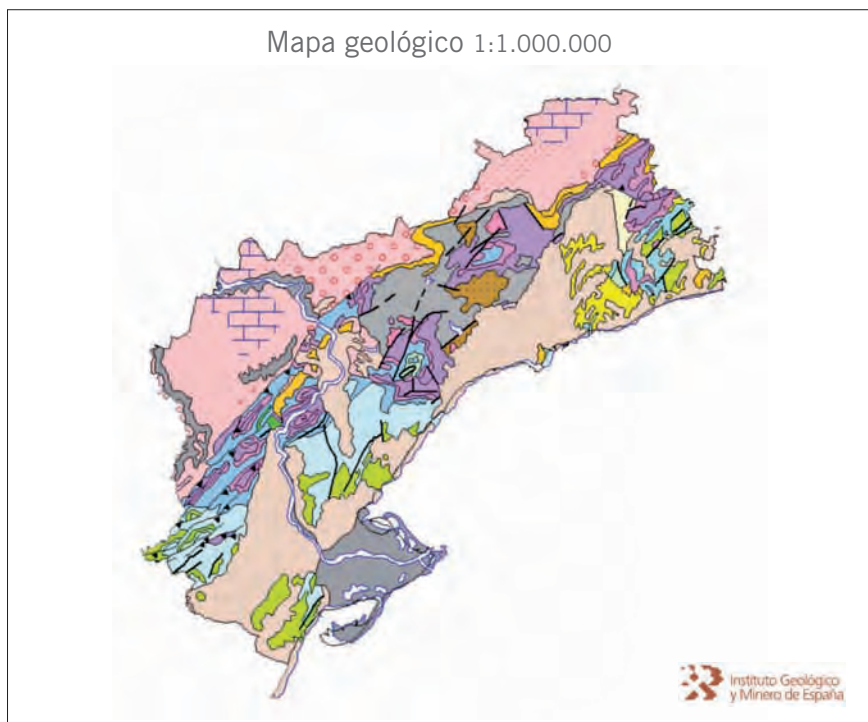


Tarragona

Categorías de exposición potencial al radón

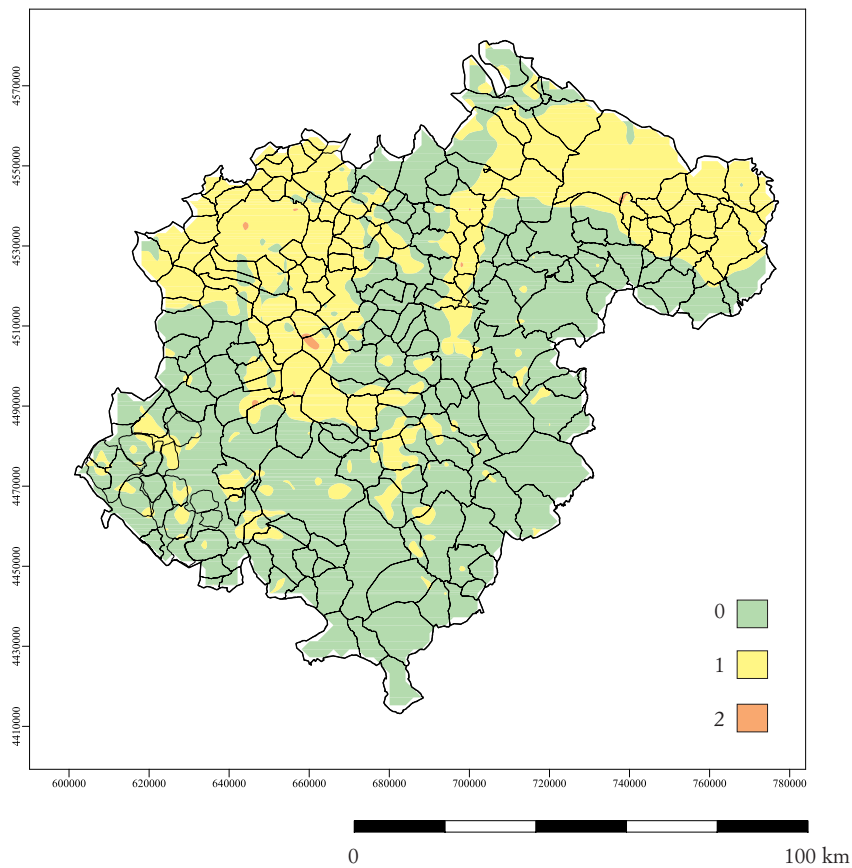


Coordenadas UTM
HUSO 30

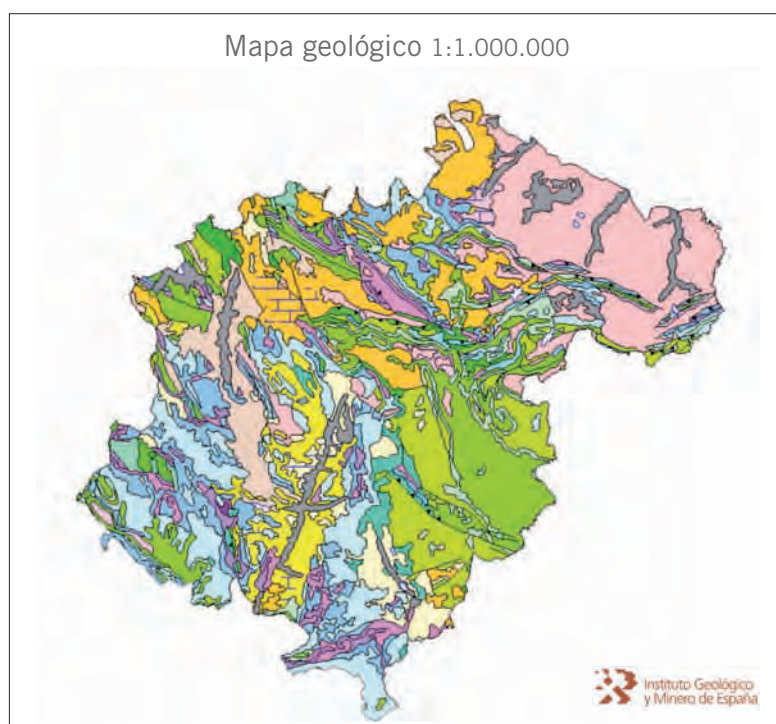


Teruel

Categorías de exposición potencial al radón

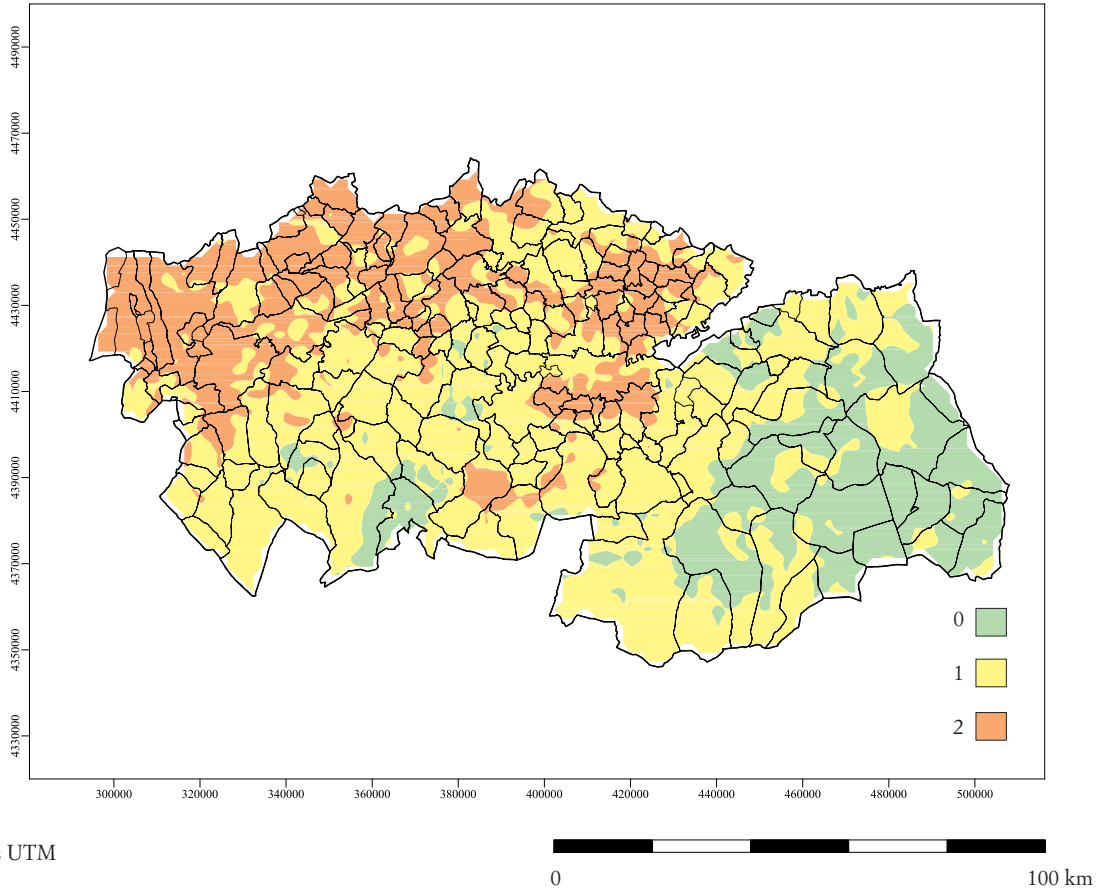


Coordenadas UTM
HUSO 30



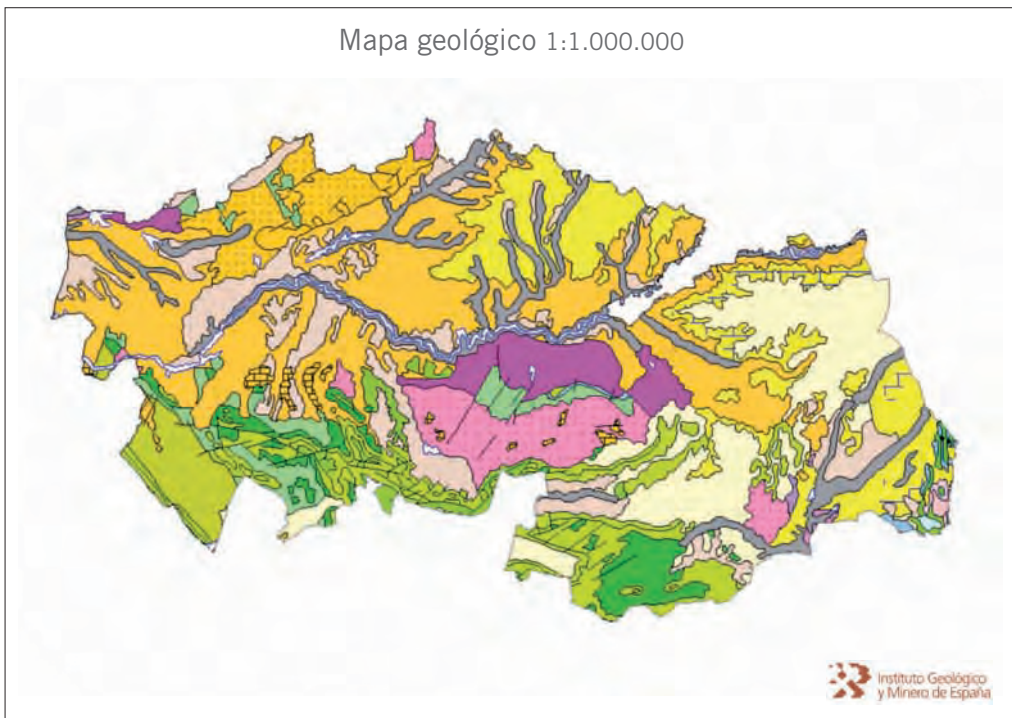
Toledo

Categorías de exposición potencial al radón



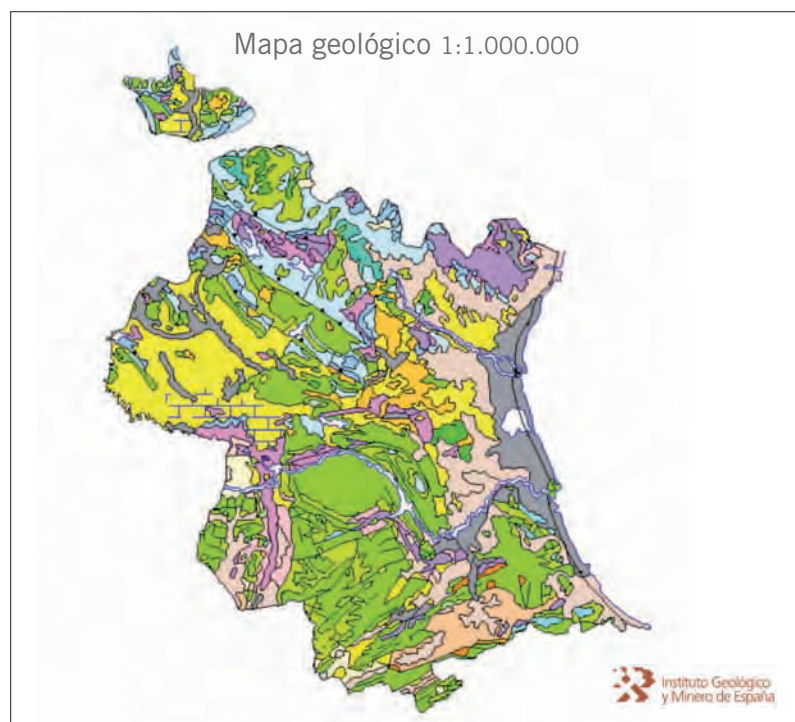
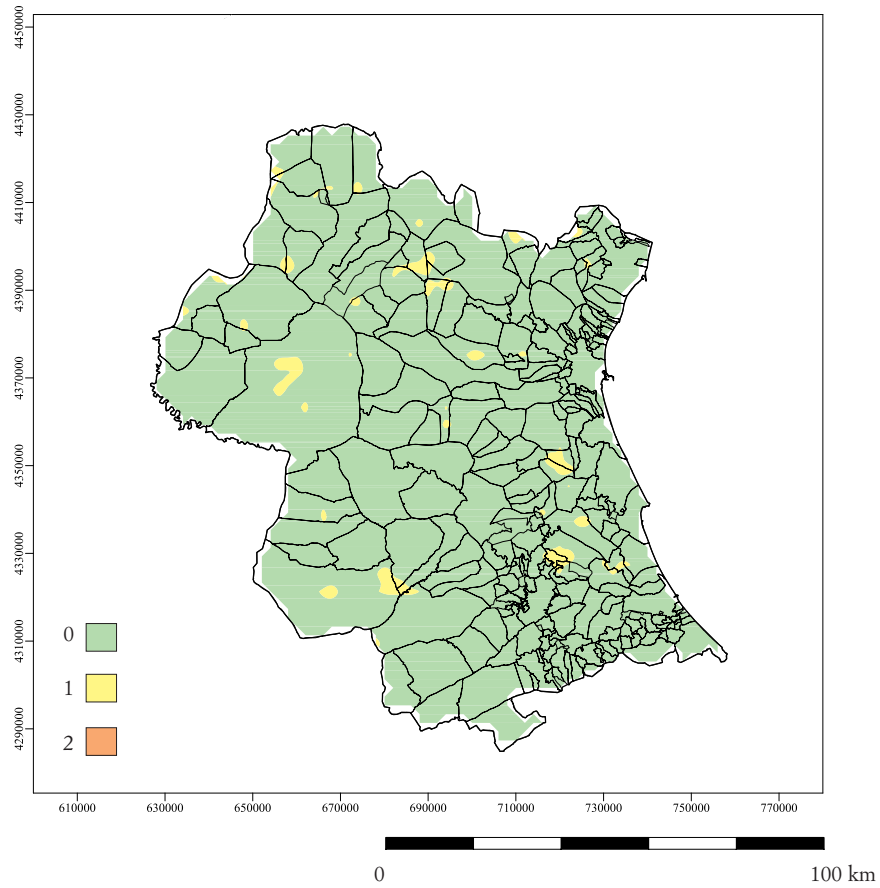
Coordenadas UTM
HUSO 30

Mapa geológico 1:1.000.000



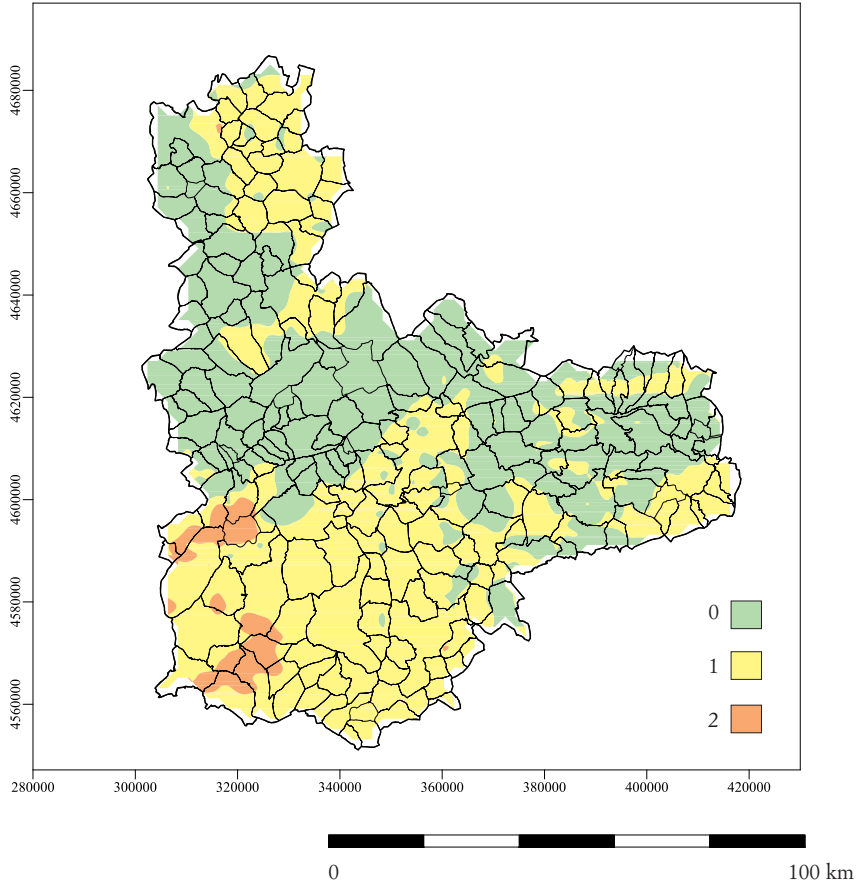
Valencia

Categorías de exposición potencial al radón



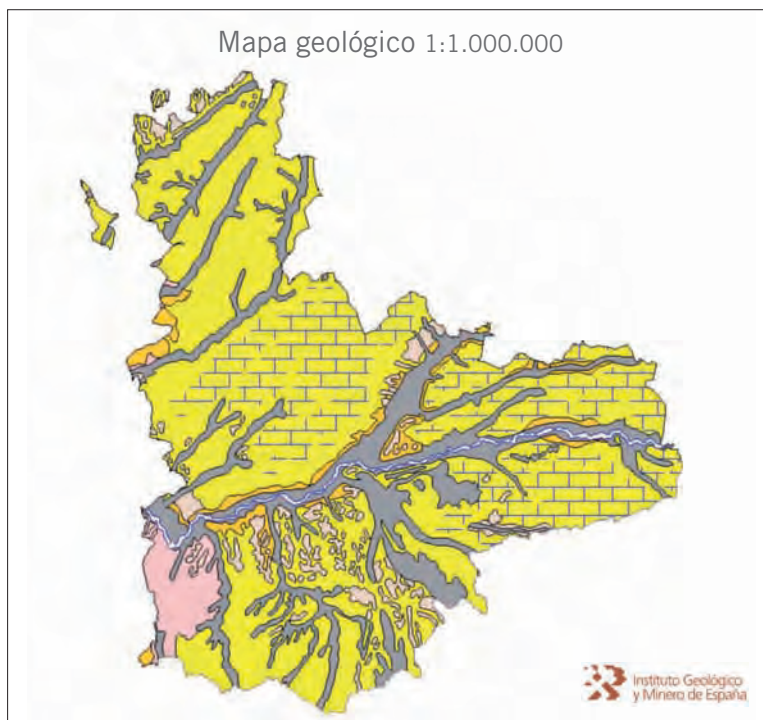
Valladolid

Categorías de exposición potencial al radón



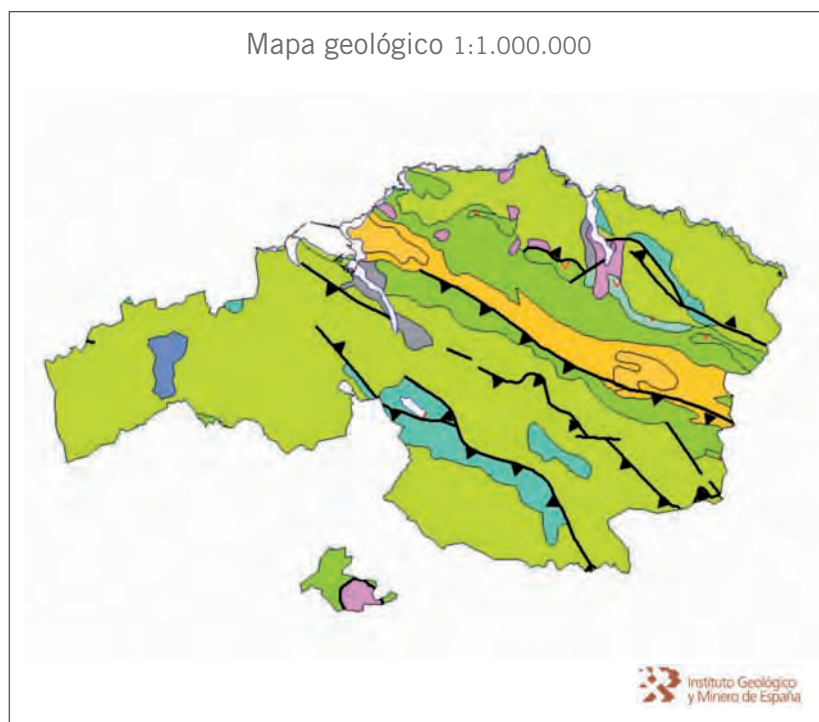
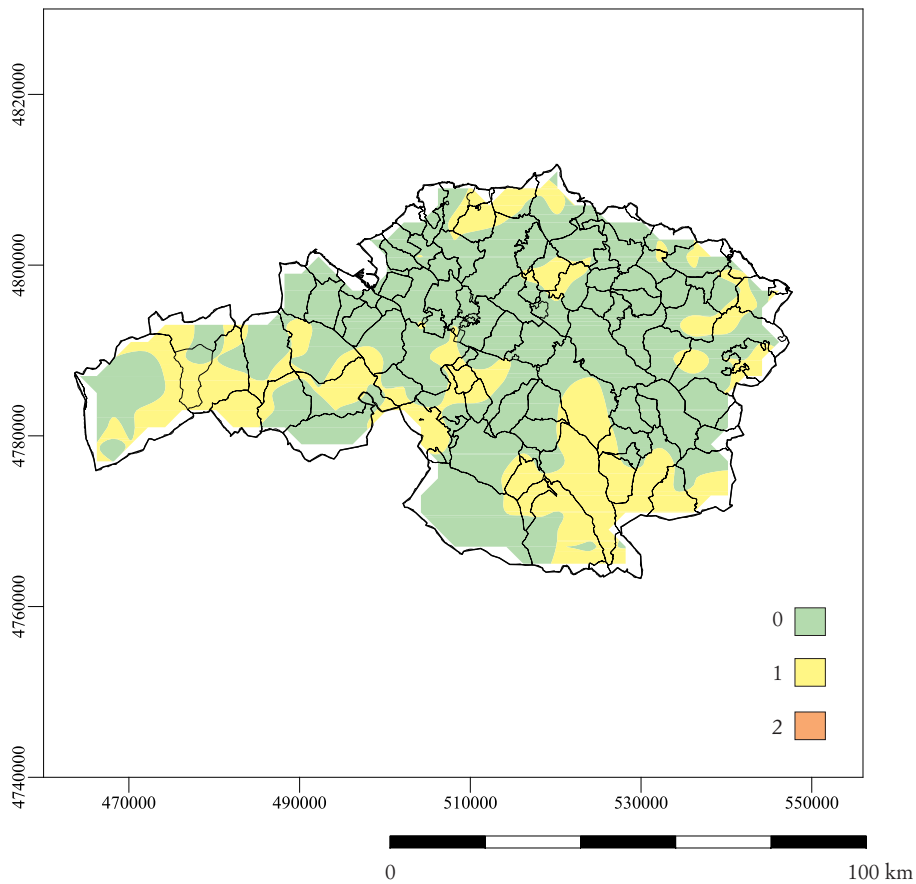
Coordenadas UTM
HUSO 30

0 100 km



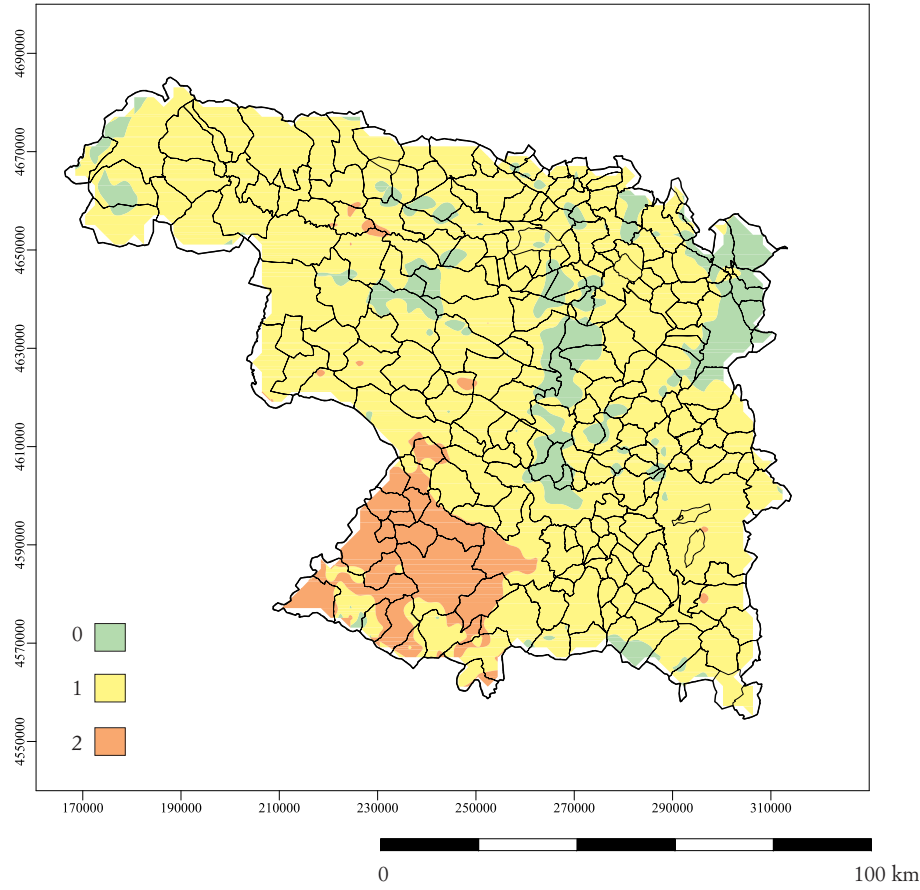
Vizcaya

Categorías de exposición potencial al radón

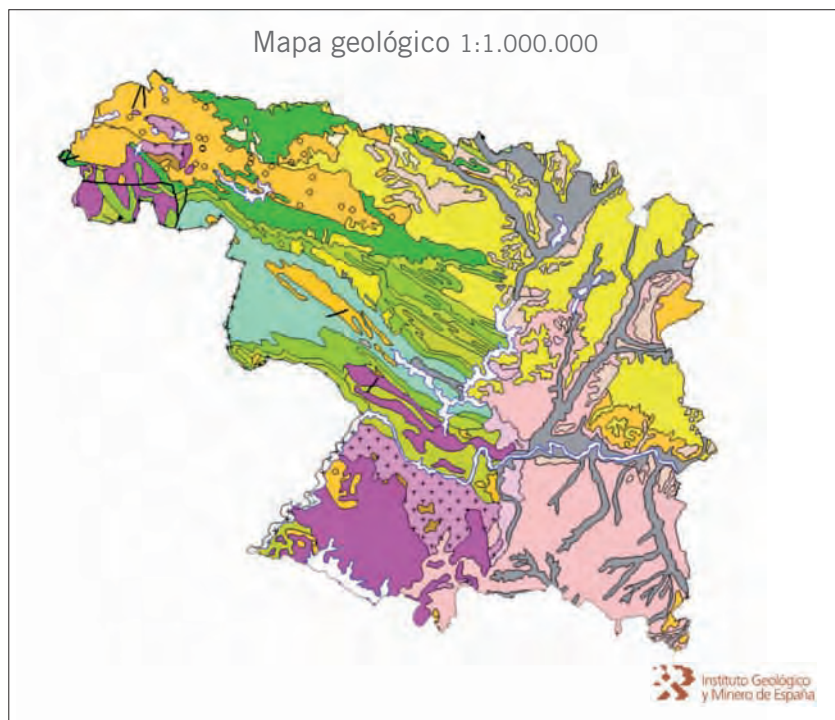


Zamora

Categorías de exposición potencial al radón

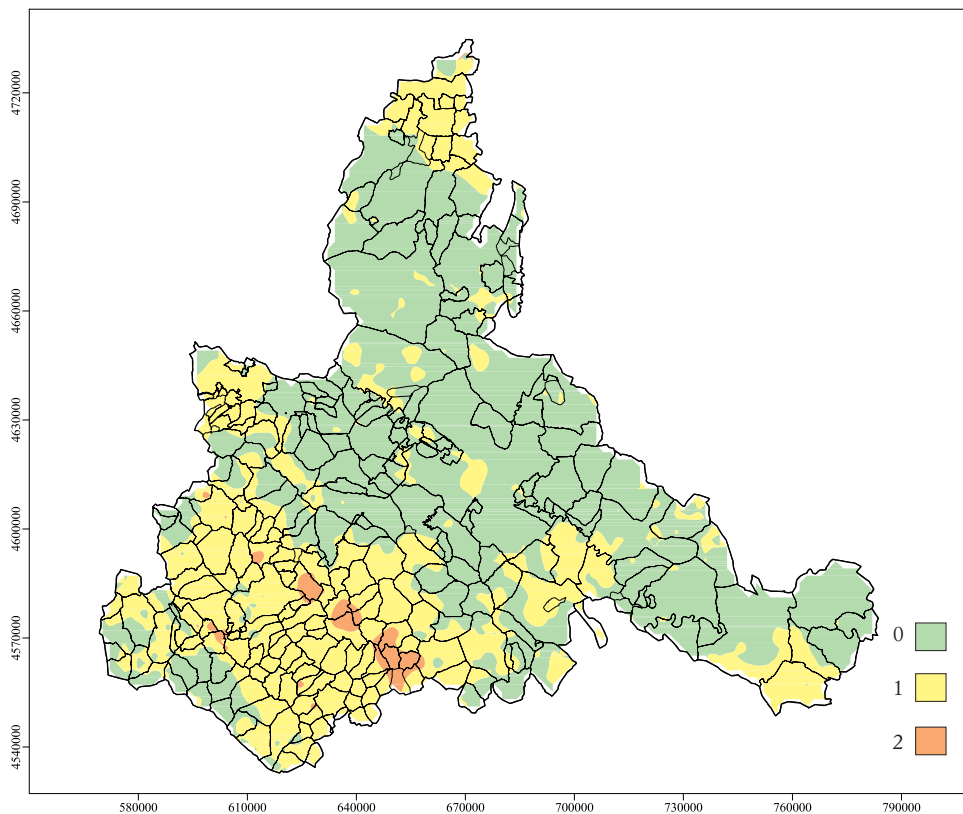


Coordenadas UTM
HUSO 30

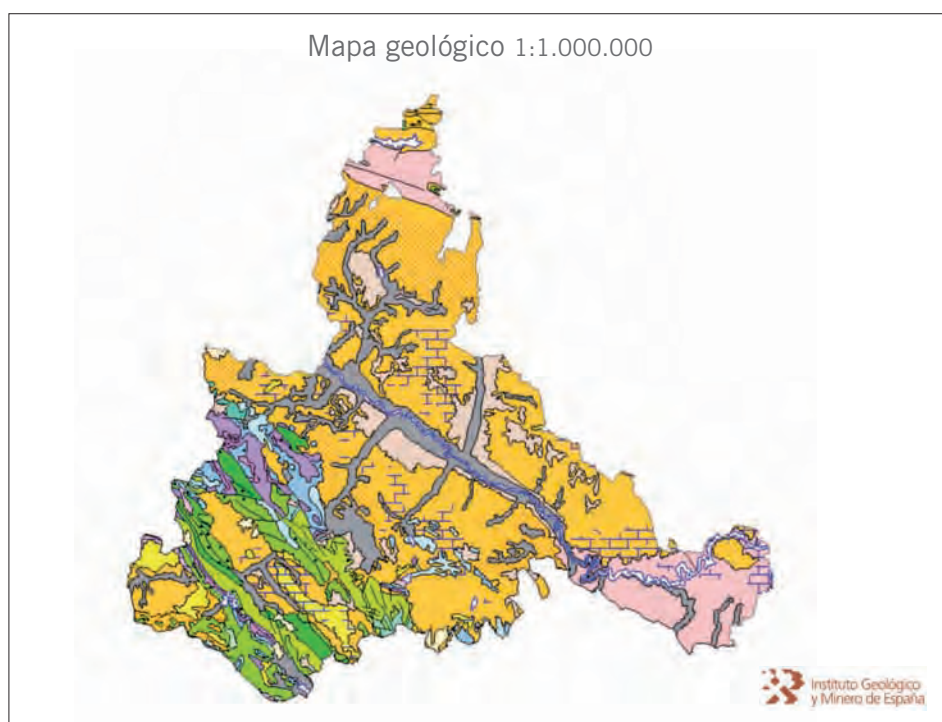


Zaragoza

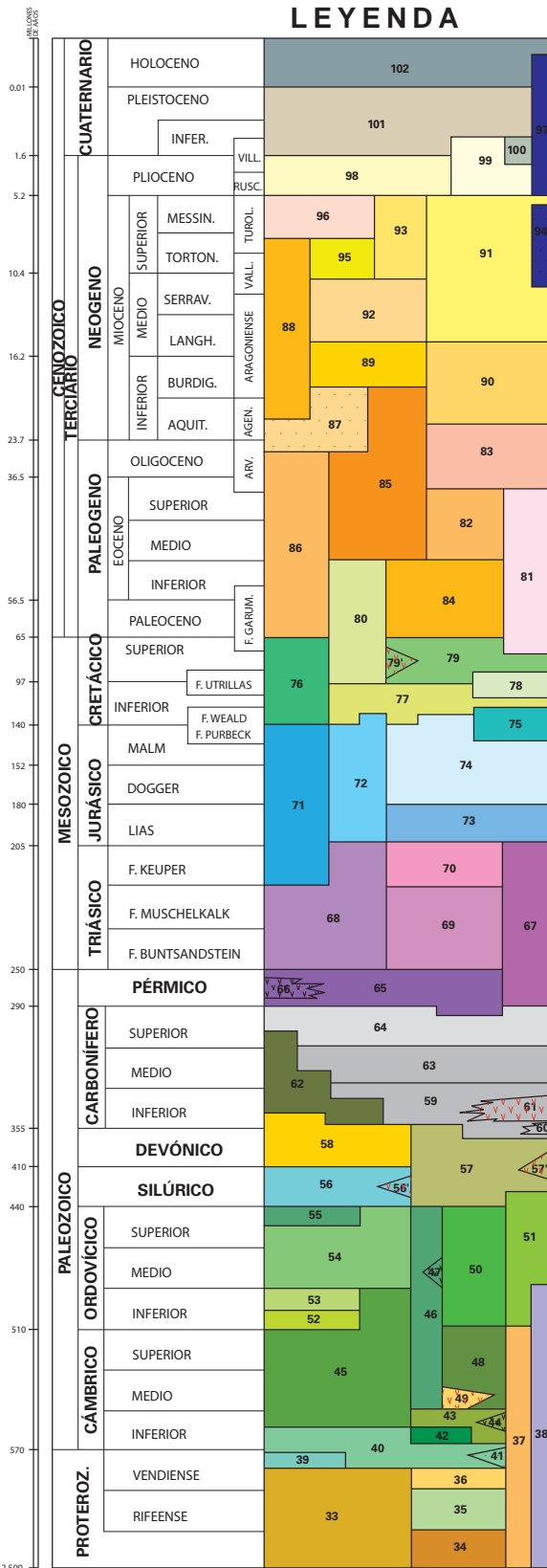
Categorías de exposición potencial al radón



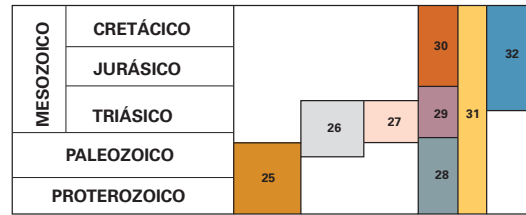
Coordenadas UTM
HUSO 30



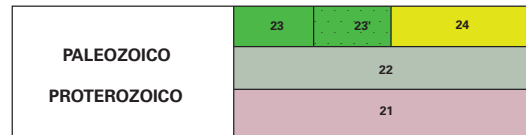
LEYENDA



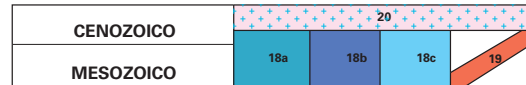
BLOQUE DE ALBORÁN



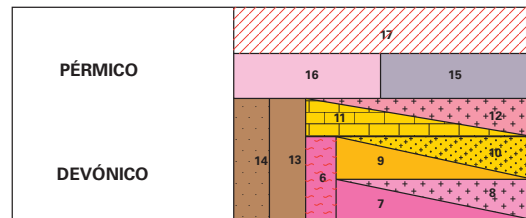
UNIDADES ALÓCTONAS DEL MACIZO HESPERICO



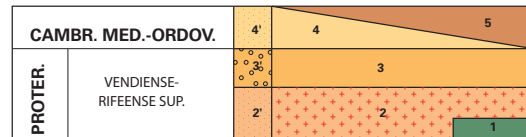
ROCAS PLUTÓNICAS ALPINAS



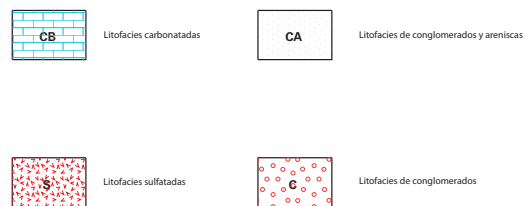
ROCAS PLUTÓNICAS HERCINICAS



ROCAS PLUTONICAS PREHERCINICAS



SOBRECARGAS USADAS PARA CAMBIOS DE FACIES



102. Gravas, arenas, arcillas y limos. Aluvial, playas, flechas litorales.
101. Conglomerados, gravas, arenas, areniscas, arenas, limos y arcillas. Terrazas fluviales y marinas.
100. Conglomerados, areniscas y arcillas.
99. Conglomerados, areniscas, arcillas, calizas y/o yesos.
98. Calcarenitas, arenas y limos amarillos.
97. Basaltos alcalinos.
96. Conglomerados, arenas, arrecifes, limos amarillos, yesos y sales haloideas. Conglomerados, arenas y calizas lacustres.
95. Conglomerados, calcarenitas, calizas arrecifales, areniscas y margas con niveles turbidíticos.
94. Rocas volcánicas calcoalcalinas (andesitas, dacitas, riolitas, shoshonitas, lamproitas).
93. Conglomerados, areniscas, arcillas, calizas y yesos.
92. Conglomerados, calizas y margas. Margas con olistotromas de origen diverso.
91. Conglomerados, areniscas, arenas arcósicas, arcillas, calizas y yesos.
90. Calizas arrecifales, calcarenitas y conglomerados. Arcillas con olistolitos.
89. Calizas, biocalcarenitas y margas. Margas y margocalizas blancas con radiolarios (moronitas o albarizas).
88. Areniscas silíceas turbidíticas. Calizas y margas arenosas.
87. Conglomerados, areniscas y arcillas. Calizas y/o yesos.
86. Conglomerados, areniscas, arenas, arcillas, margas y yesos.
85. Turbiditas calcáreas, calizas y margas. Pudingas, areniscas y margas arenosas. Areniscas y calizas lacustres.
84. Turbiditas calcáreas, calizas, margas, conglomerados, areniscas y arcillas. Calizas lacustres.
83. Turbiditas calcáreas. Calizas, calizas arenosas, areniscas y margas arenosas.
82. Areniscas silíceas y arcillas.
81. Conglomerados, areniscas, calizas, margas arcillas, yesos y/o sales sódico-potásicas.
80. Dolomías, calizas y margas. Margocalizas, calizas arenosas, areniscas y arcillas.
79. Margas y arcillas con niveles turbidíticos. Margocalizas y calizas margosas (Capas rojas).
78. Gravas, arenas, areniscas y arcillas. Carbón.
77. Margas y margocalizas. Margas arcillosas turbidíticas. Calizas arenosas, areniscas, arenas y margas.
76. Turbiditas silíceas, Margas con turbiditas y margocalizas. Calizas bioclásticas, calcarenitas, arenas, margas, dolomías y calizas.
75. Conglomerados, areniscas, arenas y margas.
74. Calizas, margas, calizas nodulosas y radiolaritas.
73. Dolomías, calizas y calizas nodulosas.
72. Dolomías, calizas, calizaso olíticas y nodulosas.
71. Dolomías, margas y calizas nodulosas.
70. Arcillas versicolores y yesos.

69. Conglomerados, areniscas, arcillas, dolomías, calizas y margas.
68. Areniscas, conglomerados, dolomías, calizas, arcillas y yesos.
67. Conglomerados, areniscas, arcillas, calizas, dolomías y yesos.
66. Vulcanitas básicas.
65. Lutitas, areniscas, conglomerados y vulcanitas o calizas.
64. Conglomerados, areniscas, lutitas y carbón.
63. Pizarras, areniscas, conglomerados, carbón y calizas.
62. Calizas y dolomías.
61. Vulcanitas y rocas vulcanoclásticas.
60. Vulcanitas bimodales.
59. Pizarras y grauwas; conglomerados y calizas.
58. Areniscas, pizarras, calizas, cuarcitas y rocas vulcanoclásticas.
57. Pizarras, esquistos, areniscas, calizas, ampelitas y liditas.
56. Ampelitas, cuarcitas, liditas y rocas vulcanoclásticas.
55. Pizarras y areniscas.
54. Pizarras, areniscas, cuarcitas y calizas o rocas vulcanoclásticas.
53. Ortocuarzitas, areniscas y pizarras.
52. Conglomerados, areniscas, cuarcitas y pizarras.
51. Pizarras y/o esquistos y cuarcitas.
50. Pizarras y/o esquistos; metavulcanitas.
49. Metavulcanitas básicas.
48. Pizarras y/o esquistos arenosos.
47. Metavulcanitas.
46. Esquistos y paragneises.
45. Areniscas, pizarras, cuarcitas calizas y conglomerados.
44. Rocas vulcanoclásticas.
43. Calizas y dolomías.
42. Areniscas, pizarras y calizas.
41. Vulcanitas ácidas y rocas vulcanoclásticas.
40. Pizarras, grauwas o arcosas, conglomerados y calizas.
39. Pizarras, areniscas, conglomerados y calizas.
38. Cuarcitas, gneises, esquistos, pizarras y grauwas.
37. Gneises, migmatitas, cuarcitas y mármoles.
36. Vulcanitas y/o rocas vulcanoclásticas y metasedimentos.
35. Esquistos o pizarras, grauwas y liditas.
34. Gneises y anfibolitas.
33. Pizarras, grauwas, conglomerados o porfiroides.
32. Dolomías, calizas, margas, areniscas y arcillas (M. Dorsal).
31. Filitas, areniscas, calizas, dolomías, margas.
30. Dolomías, calizas, margocalizas y margas arenosas.

29. Dolomías, areniscas, conglomerados, arcillas, y margas.
28. Filitas, pelitas, areniscas, grauwacas, calizas y conglomerados.
27. Genises, migmatitas, micaquistos, esquistos, filitas, mármoles, calizas y dolomías (M. Alpujarride).
26. Anfibolitas, serpentinitas, micaesquistos y mármoles (M. del Mulhacen).
25. Micaesquistos grafitosos con granates (M. del Veleta).
24. Esquistos y cuarcitas (metasedimentos meridionales).
23. Serpentinitas, metabasitas y metavulcanitas acidas (metasedimentos septentrionales).
22. Esquistos gneiseofélsicos y metabasitas.
21. Rocas básicas y ultrabásicas.
20. Peridotitas.
19. Diques doleríticos.
18. Metagranitos.
17. Granitoides de tendencia alcalina postcinemáticos.

Plutonismo orogénico calcoalcalino toleítico

16. Granitoides s.l. indiferenciado.
15. Rocas básicas y ultrabásicas.

Plutonismo orogénico colisional peralumínico

14. Complejos ácidos y básicos indiferenciados.
13. Rocas intermedias y básicas.

Granitoides postcinemáticos de emplazamiento epizonal

12. Granitoides biotíticos.
11. Granitoides de dos micas.

Granitoides de emplazamiento epimesozonal

10. Granitoides biotíticos.
9. Granitoides de dos micas.

Granitoides de emplazamiento mesocatazonal

8. Granitoides biotíticos.
7. Granitoides de dos micas.
6. Complejos migmatíticos-anatéticos.
5. Complejos alcalinos ácidos-básicos.
4. Granitoides alcalinos (marco extensional).
3. Granitoides peralumínicos (marco colisional).
2. Granitoides calcoalcalinos.
1. Rocas ultrabásicas (serpentinitas). Margen activo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

PREÁMBULO	5
SUMARIO	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. BASES EPIDEMIOLÓGICAS DE LA PROTECCIÓN CONTRA LA EXPOSICIÓN AL RADÓN	11
3. DESARROLLO NORMATIVO	13
1. Las nuevas recomendaciones internacionales	14
2. Desarrollo normativo en España	14
4. IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON MAYOR EXPOSICIÓN AL RADÓN	17
5. EL MAPA PREDICTIVO DE EXPOSICIÓN AL RADÓN EN ESPAÑA	21
1. Correlación de la tasa de radiación gamma con la concentración de radio-226	22
2. Predicción de la concentración de radón máxima esperable en viviendas	22
3. Definición de las categorías de exposición	25
4. Relación del mapa predictivo con la Geología	26
6. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL MAPA PREDICTIVO	31
1. Comparación del mapa predictivo con medidas en viviendas	32
2. Comprobación de la utilidad del mapa en viviendas gallegas	33
7. OTROS FACTORES CORRELACIONADOS CON EL RADÓN EN VIVIENDAS	35
1. La permeabilidad	36
2. La presencia de fallas activas	36
3. El régimen pluviométrico	37
4. La topografía	37
5. Las características constructivas de la vivienda	38
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39
ANEXO	43
1. Mapas provinciales	44

El mapa predictivo de exposición al radón en España

Colección Informes Técnicos
38.2013

