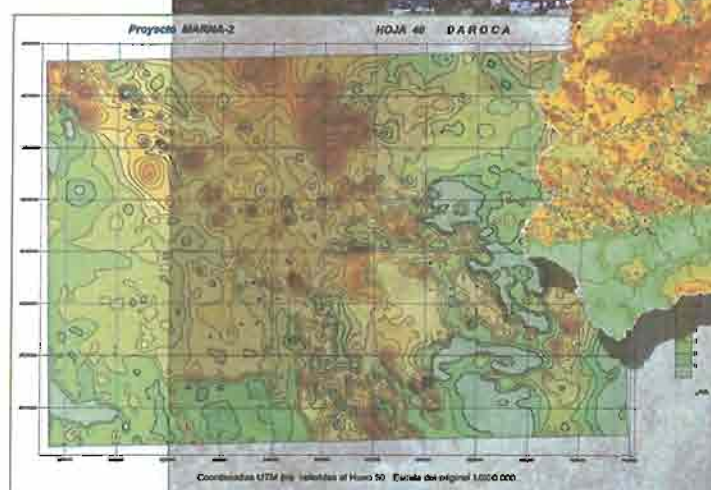


Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural

CSN



Colección
Informes Técnicos
5.2000

Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural

Enrique Suárez Mahou (Consejo de Seguridad Nuclear)

José Ángel Fernández Amigot (Enusa)

Antonio Baeza Espasa (Universidad de Extremadura)

María Candelas Moro Benito (Universidad de Salamanca)

Dionisio García Pomar (Xunta de Galicia)

José Moreno del Pozo (Universidad Politécnica de Extremadura)

José María Lanaja del Busto (Universidad de Vigo)

Colección
Informes Técnicos
5. 2000



Colección: Informes Técnicos
Referencia: INT-04-02

© Copyright 2000, Consejo de Seguridad Nuclear

Edita y distribuye:
Consejo de Seguridad Nuclear
Justo Dorado, 11. 28040 Madrid. España
<http://www.csn.es>
peticiones@csn.es

Maquetación: Ediciones Doce Calles, S.L.
Impresión: Artegraf, S.A.

ISBN: 84-95341-12-3
Depósito Legal: M-668-2001

A la antigua Junta de Energía Nuclear y a sus técnicos que con su buen hacer obtuvieron información básica para estudiar los niveles de radiación natural en España.

Los autores quieren expresar su agradecimiento a los promotores e impulsores del proyecto Marna que con su actuación han permitido el desarrollo del proyecto en sus fases sucesivas.

Presidentes del Consejo de Seguridad Nuclear:

Juan Manuel Kindelán Gómez de Bonilla
Donato Fuejo Lago

Presidentes de Enusa:

José Luis González Martínez
Alfredo Llorente Legaz

Consejeros del Consejo de Seguridad Nuclear:

Aníbal Martín Marquínez
Agustín Alonso Santos
José Ángel Azuara Solís
Rafael Caro Manso
Eduardo González Gómez
Luis Echávarri Lozano
Fabio Sarmiento Almeida

El proyecto Marna (Mapa de radiación gamma natural) es un proyecto de I+D que evalúa los niveles de radiación gamma natural en España, desarrollado según un acuerdo de colaboración entre el Consejo de Seguridad Nuclear y Enusa, y en el que han colaborado la Universidad de Extremadura, la Universidad Politécnica de Extremadura y la Universidad de Salamanca. Actualmente colaboran la Xunta de Galicia y la Universidad de Vigo en cuanto a Galicia se refiere y el Instituto Tecnológico y Geominero de España en la zona de Huelva.

Durante la década de los años 80, principalmente a raíz del accidente de la central nuclear de Chernóbil, la Unión Europea y la Agencia Internacional de Energía Atómica, promovieron la elaboración de atlas dosimétricos nacionales para estimar la exposición a las distintas fuentes radiactivas de origen natural.

Siguiendo estas directrices, se inició en España el proyecto Marna, que en una primera fase se basó en los resultados obtenidos durante los treinta años de vigencia del Plan Nacional de Exploración e Investigación de Uranio (PNEIU), que en las fases posteriores se ha ampliado con más de 300.000 nuevas medidas de tasa de exposición en distintas regiones del territorio peninsular.

El proyecto Marna se inició en 1991 y hasta el momento se desarrolla en tres fases.

En una primera fase se obtuvieron los siguientes resultados:

- Un mapa piloto de tasa de exposición de la España peninsular a escala 1/1.000.000.
- Diversos mapas para las comunidades autónomas de Extremadura y de Castilla y León, a escala 1/200.000, abarcando una superficie total de 130.000 km².

En una segunda fase (proyecto Marna-2) se amplió la zona de investigación detallada, obteniendo mapas a escala 1/200.000 para 90.000 km² adicionales, con lo que se alcanzó una superficie total de 220.000 km².

Actualmente se continúa en una tercera fase extendiendo la obtención de mapas detallados de tasa de exposición a escala 1/200.000 a una superficie adicional de 160.000 km². A la conclusión de esta tercera fase existirá información detallada sobre 380.000 km² del territorio peninsular.

En el momento actual se dispone de más de 450.000 medidas, esperándose alcanzar más de 700.000 medidas al concluir la tercera fase en el año 2000.

En el mapa 1 puede apreciarse la superficie cubierta por cada una de estas fases.

Los resultados del proyecto Marna pueden ser de gran utilidad para:

- Los estudios epidemiológicos diseñados para investigar los efectos que producen, por sí mismos o en relación con otros factores, las bajas dosis de radiación recibidas durante un largo tiempo.

- La evaluación y control de los incrementos de la radiación de fondo debidas a causas naturales o no naturales.
- La optimización de la selección del emplazamiento adecuado para equipos de medida de la radiación.
- Estimar las tasas de dosis absorbida y dosis equivalente que recibe la población en relación con sus hábitos de vida.
- Estimar el potencial de emisión de radón por un terreno en función de la información geológica y meteorológica complementaria que se posea.

Esta publicación no contiene información sobre las Islas Baleares y Canarias. Está previsto que al concluir la cuarta y última fase del proyecto Marna se incluirá información sobre tasa de exposición y dosis debidas a la radiación gamma natural en las citadas islas, así como de Ceuta y Melilla.

Sumario

Introducción	9
Estructura de la publicación	13
Introducción y objetivos del proyecto Marna ..	15
La radiación natural ambiental. Fuentes de radiación externa e interna	19
Consideraciones dosimétricas	53
Proyecto Marna. Mapa de radiación gamma natural	61
Mapas provinciales de Tasa de Exposición ..	89
Índice de contenidos	139

Estructura de la publicación

Esta publicación se ha estructurado en cuatro capítulos:

- En el primero se exponen resumidamente los objetivos del proyecto Mama y se justifica su realización.
- En el segundo se describen las características de la radiación natural incluyendo tanto las fuentes externas a los seres vivos –radiación cósmica y terrestre– como las fuentes internas.
- En un tercer capítulo se realizan una serie de consideraciones dosimétricas para poder comprender mejor la utilidad de las medidas de radiación natural.
- En el cuarto capítulo se describe el proyecto Mama, incluyendo la metodología de trabajo, los principales resultados y la utilidad del proyecto.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO MARNA



1

El proyecto Marna es un proyecto de I+D que evalúa la tasa de exposición a la radiación gamma de origen natural⁽¹⁾, referida a un metro de altura sobre el nivel del suelo. Se desarrolla según un convenio de colaboración suscrito en diciembre de 1991, entre el Consejo de Seguridad Nuclear (CSN) y Enusa, en el que han colaborado la Universidad de Extremadura, la Universidad Politécnica de Extremadura y la Universidad de Salamanca. Actualmente colaboran la Xunta de Galicia y la Universidad de Vigo, en cuanto a Galicia se refiere, en un proyecto específico que se ha denominado Marna-Galicia. El Instituto Tecnológico y Geominero de España colabora en la zona de Huelva. Está también prevista la colaboración futura de otras universidades. Las razones que promovieron la firma del convenio entre ambos organismos, estuvieron por una parte en el interés del CSN por conocer los niveles ambientales de radiación gamma en España, y por otra parte, en la amplia experiencia que Enusa tenía en la medida de radiación, adquirida como consecuencia de su actuación en los sucesivos planes nacionales de exploración de minerales radiactivos, disponiendo consecuentemente de fondos documentales, generados durante más de 35 años de trabajos de exploración, y de los expertos, medios y tecnologías necesarias para la realización del presente proyecto.

El interés de este proyecto es comparable al que tienen otros proyectos de investigación básica, como el mapa geológico, el mapa de peligrosidad sísmica, el mapa de suelos, el mapa tectónico, etc.; es decir, es un documento de partida para realizar otro tipo de investigaciones que permite, a través del conocimiento de los niveles de radiación gamma del fondo ambiental, y teniendo en cuenta las particularidades asociadas a las distintas zonas, determinar la dosis de radiación natural asociada y sus posibles efectos para la salud.

¹ La contribución del *fall-out* en este tipo de medidas es relativamente escasa ya que valores de deposición superficial del orden de 10^{-2} $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ proporcionarían tasas de exposición inferiores a $0,01$ $\mu\text{R}/\text{h}$ a un metro del suelo.

El convenio suscrito para la realización del proyecto Marna comprendía los siguientes objetivos:

- Obtención de mapas de radiación natural sobre cuatro hojas del mapa topográfico nacional a escala 1/50.000, que presentaban un elevado nivel de radiación gamma natural. Las hojas seleccionadas fueron las números: 475, 476, 525 y 623 correspondientes a Lumbrerales, Villavieja de Yeltes, Ciudad Rodrigo y Malpartida de Plasencia, respectivamente.
- Obtención de un mapa piloto peninsular a escala 1/1.000.000.
- Obtención de dos mapas a escala 1/200.000 para dos comunidades autónomas. Se seleccionaron para tal fin las de Extremadura y Castilla y León, que abarcan en total unos 130.000 km^2 .

El proyecto concluyó en diciembre de 1994, pero a la vista de los resultados obtenidos se firmó un nuevo convenio, desarrollado entre 1995 y 1996, para la realización de una segunda fase que se denominó proyecto Marna-2, que ampliaba en 90.000 km^2 la extensión de cobertura a escala 1/200.000, con áreas exteriores a las comunidades de Extremadura y Castilla y León.

Además, contemplaba la actualización del mapa piloto peninsular a escala 1/1.000.000 obtenido anteriormente, con la incorporación de los nuevos datos. Con ello se reunía información sobre tasa de exposición a la radiación gamma natural para una superficie aproximada de unos 220.000 km^2 .

Concluida esta segunda fase se firmó un nuevo acuerdo para la realización de una tercera fase que ampliaba en 160.000 km^2 la extensión de cobertura a escala 1/200.000 sobre nuevas áreas no incluidas en los proyectos Marna y Marna-2. Esta tercera fase, que cubre el periodo 1997-2000, se denominó proyecto Marna-3. A la conclusión del proyecto Marna-3 existirá información detallada sobre una extensión de 380.000 km^2 . Las superficies que cubren cada fase están representadas en el mapa 1.1.

Los sucesivos proyectos Marna están incluidos en los programas de I+D que lleva a cabo el CSN

Mapa 1.1. Zonas cubiertas por los proyectos Marna-1 y Marna-2 y zonas sobre las que se realiza el proyecto Marna-3



desde 1991. Se realizan siguiendo recomendaciones del Organismo Internacional de Energía Atómica y de la Comisión de las Comunidades Europeas, que promueven la ejecución de un proyecto de investigación relativo a la elaboración de un atlas de radiación natural de Europa, así como a la realización de estudios que mejoren el conocimiento sobre la radiación natural, sus efectos y riesgos, con el objeto de poder utilizarlos en futuros estudios de naturaleza aplicada.

La realización del proyecto Marna se justifica además por:

- La Ley 15/1980, de 22 de abril, de creación del Consejo de Seguridad Nuclear, que en su artículo 2 asigna al CSN, entre otras funciones, el «estudiar y vigilar los niveles de radiación».
- El IV Programa Marco (1994-1998) de la Unión Europea (94/268/Euratom) para actividades comunitarias en materia de investigación y enseñanza, y la decisión del Consejo de la Unión Europea de 15 de diciembre de 1994

(94/920/Euratom-Anexo 1) que prevén entre sus objetivos científicos y tecnológicos: «mejorar la comprensión y la cuantificación del riesgo global asociado a la utilización de la energía nuclear, teniendo en consideración el ciclo completo, es decir, todas las exposiciones a las radiaciones ionizantes debidas no sólo a la energía nuclear, sino también a aplicaciones médicas y otras, así como a la radiactividad natural».

- La Resolución de 30 de julio de 1997 de la Secretaría de Estado de Universidades, Investigación y Desarrollo que entre sus objetivos de interés general incluye los estudios de radiología ambiental.
- La demanda de datos y resultados del tipo de los que produciría el proyecto Marna, puesto que al disponerse de un gran número y densidad de datos referentes a la radiación gamma de origen natural, pueden aplicarse a estudios epidemiológicos diseñados para valorar los efectos y riesgos de los bajos niveles de dosis.

- La demanda de información en todos los ámbitos relacionados con el proyecto, que sin duda contribuye al desarrollo de una cultura sobre la presencia natural de las radiaciones ionizantes.
- El Real Decreto 296/1979 de 7 de diciembre (BOE 14 de enero de 1980) que encomendó a Enusa la realización del Plan Nacional de Exploración e Investigación del Uranio (PNEIU), que venía desarrollando anteriormente la Junta de Energía Nuclear (JEN). Este hecho motivó que la totalidad de la documentación producida por los sucesivos programas sobre la cuestión, se halle actualmente en los archivos de Enusa.
- La Directiva 96/29 de Euratom, título VII, referente a incrementos significativos de la exposición debida a fuentes naturales de radiación.

Finalmente, el proyecto Marna adquiere en la actualidad un interés relevante, con motivo de la trasposición a la reglamentación nacional de la Directiva 96/29 de Euratom sobre normas básicas relativas a la protección sanitaria de los trabajadores y de la población contra los riesgos de las radiaciones ionizantes. Concretamente, en el Título VII de dicha Directiva, se trata de establecer un marco regulador para la exposición de las personas a las fuentes naturales de radiación. En este sentido, los resultados obtenidos por el proyecto Marna son una referencia primaria para llevar a cabo las investigaciones que se requieren en la citada directiva, con objeto de estimar la exposición que las personas reciben en las zonas con mayor relevancia radiológica.

LA RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL EN EL AMBIENTE.
FUENTES DE RADIACIÓN EXTERNA E INTERNA

De todas las fuentes de radiaciones ionizantes a las que están sometidos los seres vivos, la más importante es la de origen natural.

Desde que existe la Tierra, la radiación ionizante natural se encuentra por todas partes. No hay lugar de la misma que escape a su presencia. Los radionucleidos naturales se encuentran en el aire, agua, rocas, suelo, en los seres vivos y en nosotros mismos. Cada día los inhalamos e ingerimos con el aire que respiramos y con los líquidos y alimentos que tomamos. Nuestro cuerpo es alcanzado no sólo por la radiación ionizante de origen natural procedente de la Tierra, sino también por la procedente de la desintegración de los elementos radiactivos naturales que están presentes en nuestro entorno, así como en nuestro propio cuerpo y además por las radiaciones ionizantes procedente del sol y de las estrellas.

Existen en la Tierra elementos en estados inestables, que por un proceso de desintegración se transforman a otros elementos y liberan radiación ionizante en forma de partículas y/o energía.

Como consecuencia, pueden formarse partículas subatómicas tales como las alfa, beta, neutrones y también radiación electromagnética como los rayos X o la radiación gamma. A todo este conjunto de partículas y radiaciones se les denomina radiación ionizante, porque cuando interacciona con la materia que la rodea pueden disociarla creando iones.

Las *partículas alfa* son núcleos de helio que poseen una gran energía cinética (2 a 9 MeV) y un escaso poder de penetración. Solamente son capaces de atravesar unos centímetros de aire y se absorben en los tejidos epidérmicos de los seres vivos. De hecho, una simple hoja de papel detiene este tipo de radiación.

Las *partículas beta* son electrones emitidos desde el núcleo de los átomos, su energía cinética es menor que la de las partículas alfa (raramente supera los 2 MeV) y son capaces de penetrar algunos metros en el aire. Se absorben totalmente por unos dos cm de agua o de tejidos biológicos.

La *radiación gamma* son ondas electromagnéticas o fotones de la misma naturaleza que la luz visible pero mucho más energética que ésta. Es por ello que tiene un poder penetrante de hasta unos 200 metros de aire o de unos 40 cm de suelo. Concretamente, el 90% de la radiación gamma que originada en el suelo, interacciona con los seres vivos, procede de los primeros 25 cm del mismo.

Los *rayos X* son también ondas electromagnéticas o fotones que tienen esencialmente las mismas propiedades que la radiación gamma, pero diferente origen. Los rayos X se producen como consecuencia de procesos que tienen lugar entre las capas electrónicas más internas de los átomos, mientras que la radiación gamma se origina dentro del núcleo. Por su menor energía, el poder de penetración de los rayos X es así mismo inferior al de la radiación gamma.

Los *neutrones* son partículas sin carga eléctrica, contenidas en el núcleo de los átomos que pueden escapar de los mismos por procesos de interacción, colisión o fisión.

Las principales fuentes naturales de radiaciones ionizantes a las que todos estamos en mayor o menor medida expuestos, son las siguientes:

- La radiación cósmica.
- Los radionucleidos existentes en la Tierra o primordiales.
- Los radionucleidos cosmogénicos.

La radiación cósmica se origina en el universo, tiene un gran poder de penetración y una elevada energía cinética, la mayor parte posee energías comprendidas² entre dos y 100.000 MeV y es por tanto capaz de atravesar los espacios interestelares, la atmósfera terrestre y alcanzar el suelo.

Los radionucleidos de origen natural presentes en nuestro planeta tienen dos procedencias. Unos son de origen terrestre propiamente dicho o primordiales. Se trata de elementos de periodo de

² La energía de la radiación cósmica puede ser mayor que 10¹² MeV.

semidesintegración muy largo que están presentes desde los orígenes de la Tierra. Son principalmente uranio-238, torio-232, potasio-40 y rubidio-87. Además, la desintegración del uranio-238 y del torio-232 da lugar a otros elementos radiactivos de vida más corta, que contribuyen significativamente a la dosis de radiación recibida por los seres vivos. Los niveles de radiación oscilan dentro de un rango muy amplio, debido a las variaciones de contenido en estos elementos que presentan los diferentes terrenos, las rocas y los suelos derivados.

Otros radionucleidos de origen natural presentes en el aire, el agua y las capas superficiales del suelo, proceden de la interacción entre la radiación cósmica que llega a la atmósfera y los elementos que en ella se encuentran, se originan así los denominados radionucleidos cosmogénicos; ejemplo de los cuales son: tritio, carbono-14, berilio-7 y sodio-22. Existe un cierto equilibrio entre la formación y desintegración de estos elementos, por lo que el

nivel de radiación de este origen es en cada punto de nuestro planeta prácticamente constante.

En la tabla 2.1 se resumen las principales componentes de la radiación ambiental típica medida a un metro de altura.

Fuentes de radiación externa e interna

Las fuentes de radiación externas a los organismos vivos se deben por una parte a la existencia de emisiones cuyo origen es externo a la propia Tierra en que vivimos, agrupadas bajo el nombre general de *radiación cósmica* y por otra a emisiones específicamente terrestres, debidas a la presencia de los *elementos radiactivos naturales* antes citados que se encuentran en las rocas, el suelo, el agua, el aire, los alimentos y los seres vivos. Además, existe una tercera fuente debida a los *radionucleidos cosmogénicos* producidos por la interacción de la radiación cósmica con átomos presentes en la atmósfera.

Tabla 2.1. Componentes de una radiación ambiental⁽¹⁾ típica a un metro de altura

Partícula o emisión	Fuente	Rango de energías	Densidad de flujo	Tasa de Kerma (aire) ⁽²⁾
		(MeV)	(cm ² s ⁻¹)	(mSv a ⁻¹)
α	Radón en aire	0-9	$\sim 10^4$	30
β (e ⁻)	Radón en aire	0-3,3	$\sim 10^3$	~ 1
β	Terreno	1-100	$\sim 10^2$	~ 10
β	Radiación cósmica	1-100	6×10^2	6
γ	Radón en aire	0-2,6	0,3	2
γ	Terreno	0-2,6	6	40
γ	Radiación cósmica	1-10	$\sim 10^1$	0,5
protones	Radiación cósmica	10-1.000	2×10^4	0,5
neutrones	Radiación cósmica	0-100	7×10^3	0,1
muones ⁽²⁾	Radiación cósmica	100-10.000	2×10^2	25
piones ⁽²⁾	Radiación cósmica	100-100.000	2×10^5	$\sim 0,1$

¹ EUR-14411, en Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment, 1993.

² Kerma está definida por la relación $K = dE_{\text{in}}/dm$ donde dE_{in} es la suma de las energías cinéticas iniciales de todas las

partículas ionizantes cargadas liberadas por partículas ionizantes no cargadas en un material de masa dm . La palabra Kerma es un acrónimo de las palabras inglesas Kinetic Energy Released for unit MAass. La unidad en el Sistema Internacional es el Gray (NCRP-82).

Complementariamente a las fuentes externas al ser humano antes indicadas, existen también fuentes internas debidas a la incorporación a nuestro propio cuerpo de elementos radiactivos naturales. Estos son principalmente el potasio-40, carbono-14, rubidio-87 y los productos de desintegración de las series del uranio y torio, fundamentalmente los procedentes de la desintegración de los gases nobles radón y torón.

En general, las fuentes internas dependen de la intensidad de la fuente externa, es decir si en el ambiente existen concentraciones altas de uranio (fuente externa) también se recibirán dosis frecuentemente importantes procedentes de los descendientes de radón, que actuarán como una fuente interna de radiación, al ser incorporados por inhalación y depositados en el epitelio pulmonar. El potasio es una excepción, puesto que el organismo humano regula su contenido, manteniéndolo en una concentración próxima al dos por mil, dos gramos por kilo de peso.

1. Radiación cósmica

El universo estuvo durante mucho tiempo considerado como algo inmutable hasta que Tycho Brahe en 1572 atestiguó la aparición de una nueva estrella en la constelación de Casiopea, como una evidencia de que el cielo experimenta cambios.

Más tarde, en 1606, Johannes Kepler publica *De Stella Nova* donde informa de la aparición en 1604 de una nueva estrella, una supernova aparecida en la constelación Ophiucus. Este fenómeno de creación de nuevas estrellas se considera como uno de los factores que da origen a la emisión de radiación cósmica, pero la existencia de la radiación cósmica no se demuestra hasta 1912, momento en que Victor Hess descubre la existencia de una radiación muy penetrante, de origen exterior a la atmósfera terrestre, mediante medidas realizadas en un globo a 5.000 metros de altura. Por este descubrimiento recibió el premio Nobel en 1936.

Robert Millikan, en 1923, es quien empleó por primera vez el nombre de radiación cósmica y

estudió su intensidad a varias altitudes. En 1957, A. Van Allen, investigando la intensidad de la radiación cósmica a varias altitudes y latitudes, identificó en la misma la presencia de núcleos pesados. Esto lo consiguió colocando placas fotográficas sensibles a dicha radiación, en globos que ascendían hasta la parte alta de la atmósfera; observaba posteriormente mediante el microscopio sus huellas y trayectorias, identificando de esta forma las partículas que las originaron.

A partir de 1960 evoluciona muy rápidamente el conocimiento sobre la radiación cósmica, especialmente como consecuencia de la información obtenida por las sondas espaciales.

Nuestro planeta desde su comienzo, está recibiendo una «ducha» de radiaciones de gran energía e intensidad casi constante, procedente del sol y de los espacios interestelares del universo, que está respectivamente originada por la actividad del sol y por la de otras estrellas. El conjunto de estas dos componentes, solar y galáctica, recibe el nombre de radiación cósmica primaria, compuesta por partículas cargadas eléctricamente, esencialmente protones, que forman la denominada componente ionizante y por partículas neutras, fundamentalmente neutrones, que dan lugar a la componente neutrónica.

1.1. Radiación cósmica primaria: rayos cósmicos galácticos y solares

Los rayos cósmicos primarios están formados por protones (87%), iones de helio (4%) y partículas más pesadas, así como por electrones (1%), fotones y neutrinos, que se suponen formados en explosiones del tipo producido en una supernova y que se aceleran por procesos aún no bien conocidos hasta velocidades próximas a la de la luz.

La radiación cósmica galáctica proviene tanto de fuera del sistema solar como, y principalmente, de nuestra propia galaxia (Vía Láctea). Son núcleos atómicos que se han desprovisto de los electrones que los rodeaban durante su paso a través de la galaxia, que incluso han viajado varias veces por la misma al haber sido atrapados por los campos

magnéticos de las estrellas y los planetas que se encuentran en su camino.

Se estima que los rayos cósmicos de energía inferior a 10^{12} MeV se originan en nuestra galaxia y que los de energía superior podrían formarse fuera de la misma. Dado las diferentes características de masa, carga y energía existentes, se clasifican los distintos componentes de la radiación cósmica primaria en función de su poder de penetración, distinguiéndose una componente blanda, capaz de atravesar algunos centímetros de plomo de una componente dura, que puede llegar a atravesar espesores de un metro de plomo. La protección que nos ofrece la atmósfera a la radiación cósmica es equivalente a la que produciría una capa de hormigón de algunos metros de espesor.

Según mediciones directas realizadas por las sondas Pioneer 10 y 11 dentro del sistema solar, la densidad de flujo de los rayos cósmicos galácticos aumenta al aumentar la distancia al sol. Para los rayos cósmicos de energía inferior a 10^4 MeV, la densidad del flujo se modifica por dos procesos, uno debido al campo magnético terrestre y otro debido a la modulación producida por el ciclo de actividad solar.

La actividad del sol es una fuente más de radiación cósmica, dependiendo su intensidad de la actividad solar. Las tormentas solares se presentan con mayor frecuencia durante los periodos de máxima actividad solar. El máximo brillo en las erupciones se alcanza en unos 10 minutos y después se atenúan lentamente. Se emiten entonces grandes cantidades de energía en forma de radiaciones visibles, ultravioleta, rayos X y un gran número de protones, partículas alfa y partículas cargadas. La mayor parte de los protones emitidos tienen energías entre 1 y 40 MeV. Solamente las grandes erupciones solares pueden aumentar la dosis absorbida en las capas superiores de la atmósfera⁶ en un factor 100, concretamente se han observado 13 grandes tormentas solares durante 20 años.

1.1.1. Variaciones de la radiación cósmica con el espacio y tiempo

La composición e intensidad de la radiación cósmica depende de varios factores, los más significativos son los siguientes:

Los ciclos de actividad solar. La actividad solar origina variaciones que se ordenan según ciclos de 11 años, que dan lugar a cambios de la intensidad de la radiación cósmica total, del orden de un 10%. Las tormentas solares⁽⁶⁾ producen cambios significativos en el flujo de la radiación cósmica. Frecuentemente, se observa primero un aumento de dicho flujo durante los quince minutos iniciales de la tormenta, momento en el que se emiten protones de energía superior a 100 MeV, para luego producirse una disminución del citado flujo. Concretamente, durante la intensa tormenta⁽⁷⁾ solar habida en septiembre de 1989, se produjo un incremento del 200% en la tasa de radiación, al nivel del mar, procedente de la componente neutrónica y un incremento del 35% de la componente ionizante.

La latitud geomagnética. El campo magnético terrestre afecta a la radiación cósmica primaria de forma tal que el flujo cósmico es mínimo en el ecuador geomagnético y aumenta con la latitud, siendo máximo en los polos. Las variaciones son del orden de un 10% en la baja atmósfera.

La altitud. La tasa de dosis equivalente aproximadamente se duplica por cada 1.500 m de altitud. En realidad no depende únicamente de la altitud, sino también de la presión atmosférica, debido a que la atmósfera actúa como un escudo protector de la radiación cósmica. De hecho, se estima que las variaciones diarias de la radiación cósmica debidas a los cambios de presión atmosférica son del orden de $0,15 \mu\text{Rh}^{-1}$ ($\approx 0,001 \mu\text{Sv}^{-1}$). Durante las altas presiones se aumenta el efecto de pantalla, disminuyendo el flujo de radiación cósmica. La

⁶ NCRP n° 50. Environmental Radiation Measurements. 1985.

⁷ El NUREG-1493, volumen 2, USNRC. 1993, hace referencia a este hecho que toma de Environmental Measurements Laboratory. Annual Report. USDOE. EML-545 (1992).

⁸ UNSCEAR. Report 1997.

temperatura de la atmósfera también modifica el nivel de radiación cósmica, ya que su aumento supone expandir la atmósfera.

El tipo de vivienda constituye, en mayor o menor grado, una pantalla a la radiación cósmica, de tal forma que en una pequeña vivienda de madera se calcula que recibiría la radiación cósmica correspondiente al aire libre multiplicada por un factor de 0,96, mientras que en un edificio de hormigón, el factor correspondiente sería de 0,45.

1.1.2. Contribución de la radiación cósmica a la dosis equivalente anual de origen cósmico

Puede calcularse la dosis procedente de las dos componentes de la radiación cósmica, utilizando las fórmulas⁽⁸⁾ siguientes:

Para la componente ionizante:

$$E_i(z) = E_i(0) [a_i \exp(-\alpha_i z) + b_i \exp(\beta_i z)]$$

Donde:

$E_i(z)$ es la tasa de dosis efectiva expresada en $\mu\text{Sv/año}$ para la componente ionizante medida a una altura z , expresada esta última en km.

$E_i(0)$ es el valor de referencia al nivel del mar, del orden de $240 \mu\text{Sv/año}$.

$$a_i = 0,21$$

$$\alpha_i = 1,6 \text{ km}^{-1}$$

$$b_i = 0,80$$

$$\beta_i = 0,45 \text{ km}^{-1}$$

Para la componente neutrónica:

$$E_N(z) = E_N(0) \exp(\alpha_N z) \quad (1)$$

$$E_N(z) = E_N(0) [b_N \exp(\beta_N z)] \quad (2)$$

La primera ecuación (1) se aplica para altitudes menores que dos kilómetros, mientras que la ecuación (2) es utilizable para altitudes mayores que dos kilómetros.

En las ecuaciones (1) y (2):

$E_N(z)$ es la tasa de dosis efectiva expresada en $\mu\text{Sv/año}$ para la componente neutrónica correspondiente a una altura z , expresada esta última en km.

$E_N(0)$ es el valor de referencia al nivel del mar, del orden de $30 \mu\text{Sv/año}$.

$$\alpha_N = 1,0 \text{ km}^{-1}$$

$$b_N = 2,0$$

$$\beta_N = 0,70 \text{ km}^{-1}$$

En nuestras latitudes, la radiación cósmica primaria medida al nivel del mar equivale a una tasa de exposición de unos $3,0 \mu\text{R/h}$. En la figura 2.1 se representa la variación de la tasa de exposición equivalente debida a la radiación cósmica y la de la tasa de dosis absorbida en función de la presión y altitud para latitudes medias⁽⁹⁾. En la figura 2.2 se muestra la variación con la altitud de la dosis equivalente procedente de las componentes ionizante y neutrónica de la radiación cósmica.

1.2. Radiación cósmica secundaria: radionucleidos cosmogénicos

El flujo de rayos cósmicos procedente de la radiación cósmica primaria, al llegar a la atmósfera terrestre puede interactuar con la materia que encuentra en su camino, produciendo su activación mediante dos tipos de reacciones que se denominan espalación y captura de neutrones.

En la *espalación* la radiación incidente libera uno o más nucleones resultando un radionucleido residual de igual o inferior masa que la del núcleo con el que colisionó.

⁽⁸⁾ UNSCEAR. Report 1993. Annex A.

⁽⁹⁾ EUR-14411. En Fifth International Symposium on the Natural Radiation Environment, 1993.

Figura 2.1. Tasa de exposición a la radiación cósmica y tasa de dosis en el aire en función de la presión atmosférica y la altitud para latitudes medias

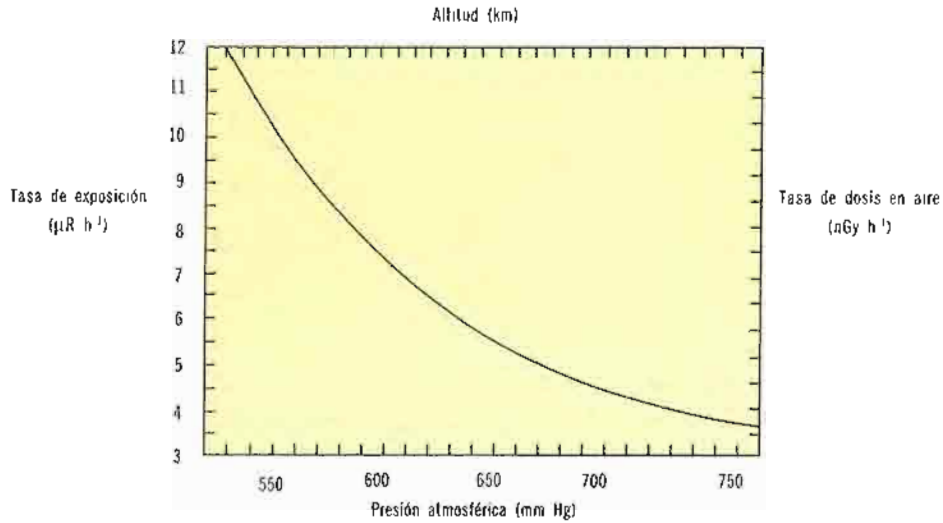
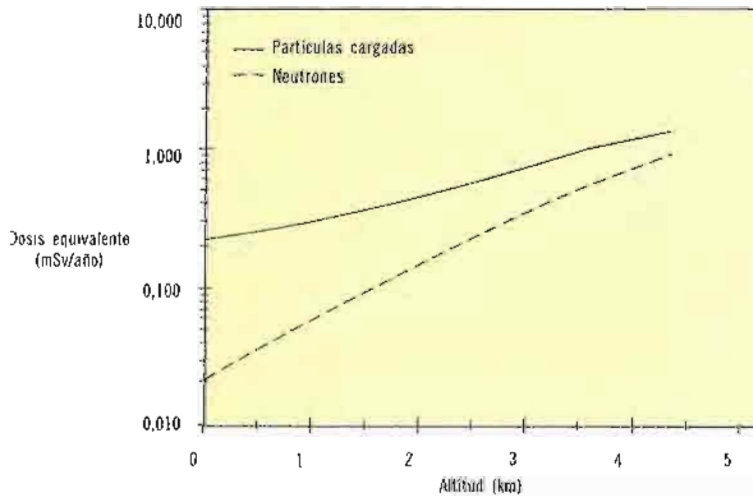


Figura 2.2. Variación con la altitud de la dosis equivalente procedente de la radiación cósmica



En la *captura de neutrones* se produce un nuevo radionucleido de masa mayor a la del núcleo con el que ha interactuado.

La materia impactada por la radiación cósmica puede ser tanto de origen terrestre como extra-terrestre. En la tabla 2.2 se relacionan los elementos cosmogénicos más significativos producidos como consecuencia de la interacción descrita anteriormente.

1.2.1. Radionucleidos producidos por espalación

Cuando la radiación cósmica primaria alcanza la parte alta de la atmósfera terrestre, puede colisionar con los núcleos de los átomos de nitrógeno-14, oxígeno-16 y argón-40 presentes en la estratosfera y en la troposfera superior. Como consecuencia, se producen principalmente los siguientes radioelementos: tritio, sodio-22, berilio-7, azufre-35, fósforo-33 y silicio-32, que salvo el tritio son sólidos y

Tabla 2.2. Radionucleidos cosmogénicos más significativos

Nucleido	Periodo de semidesintegración	Origen	Tipo de radiación	Actividad natural
Carbono-14	5.730 años	Interacción con nitrógeno-14 (captura de neutrones)	beta	6 pCi/g (220 Bq/kg) en materia orgánica
Tritio	12,3 años	Interacciones con N y O (espalación)	beta	0,032 pCi/kg ($1,2 \times 10^{-3}$ Bq/kg)
Berilio-7	53,3 días	Interacciones con N y O (espalación)	gamma	0,27 pCi/kg (0,01 Bq/kg)
Sodio-22	2,6 años	Interacción con argón (espalación)	beta (+) gamma	

se fijan o depositan en los aerosoles, que son partículas de polvo muy fino, con diámetro próximo o inferior a 1 μm , generalmente comprendidos entre 50 y 500 nm, que tienen un tiempo medio de permanencia en la atmósfera de unos siete días a menos que exista un porcentaje significativo de vapor de agua, en cuyo caso aumenta el tamaño de dichas partículas y se acelera su deposición al suelo. Este es el proceso más importante de limpieza de la atmósfera.

Otra parte de la radiación cósmica primaria interacciona con la materia extraterrestre, que se denomina también polvo extraterrestre y supone un aporte de unos 10^7 kg/año, con una actividad del orden de 450 pCi/kg. Los radionucleidos producidos son principalmente berilio-7, sodio-22, aluminio-26, escandio-46, vanadio-48, cromo-51, manganeso-53, manganeso-54, cobalto-56, cobalto-57, cobalto-58, níquel-59 y cobalto-60.

Todos estos elementos presentes en la atmósfera, contribuyen a la radiación y a la dosis fundamentalmente interna de los seres vivos. Uno de los radioelementos así formados más representativos es el tritio, cuya tasa de producción debida a esta vía natural es de unos $1,3 \times 10^{18}$ Bq/año. Este valor se incrementó como consecuencia de las explosiones nucleares atmosféricas.

La contribución del tritio a la dosis interna⁽¹⁰⁾ equivalente efectiva anual es de 0,01 $\mu\text{Sv/año}$ (incorporación

de 500 Bq/año), 0,03 $\mu\text{Sv/año}$ para el berilio-7 (incorporación de 1.000 Bq/año), 0,15 $\mu\text{Sv/año}$ para el sodio-22 (incorporación de 50 Bq/año).

1.2.2. Radionucleidos producidos por captura de neutrones

El elemento más importante que se forma por este proceso es el carbono-14, que es un emisor β con un periodo de semidesintegración de 5.730 años. En la atmósfera⁽¹¹⁾ se forman anualmente $1,0 \times 10^{15}$ Bq/año de carbono-14. Este radioelemento puede originarse también como consecuencia de las explosiones nucleares atmosféricas.

Muchas de las partículas secundarias formadas tienen energía suficiente para iniciar secuencias de reacciones nucleares con los átomos de oxígeno y nitrógeno que encuentran en la atmósfera.

Como el flujo cósmico primario es prácticamente constante, también lo es la producción de radiación cósmica secundaria y por tanto, la dosis recibida que procede de los radionucleidos cosmogénicos es relativamente constante.

Como se aprecia en la tabla 2.2, el carbono-14 es, entre los radionucleidos cosmogénicos, el que más influye en las dosis al hombre. El carbono-14 contribuye a la dosis equivalente anual en zonas con

⁽¹¹⁾ F. Cogné, Principales données chiffrées, L'énergie nucléaire dans notre environnement radioactif, *Revue générale nucléaire*, 1993, n° 2.

⁽¹⁰⁾ UNSCEAR, Report 1993.

valores del fondo calificables de normal, con unos 12 $\mu\text{Sv/año}$ (incorporación de 20.000 Bq/año). Este carbono-14, una vez formado, se oxida rápidamente pasando a $^{14}\text{CO}_2$ (anhídrido carbónico) en la atmósfera y desde allí se integra en el ciclo de carbono, de forma que se absorbe por las plantas y después por los animales.

Los radionucleidos cosmogénicos contribuyen a la radiación y a la dosis fundamentalmente interna. En todo caso, la citada contribución de los radionucleidos cosmogénicos a la dosis equivalente anual es muy pequeña, en comparación con la producida por la radiación cósmica primaria y la terrestre.

2. Radiación terrestre

Como ya se indicó, la radiación emitida por las rocas y el suelo se debe a la presencia en los mismos de los denominados radionucleidos primordiales, que son principalmente: el uranio y sus descendientes, el torio y sus descendientes y el potasio natural.

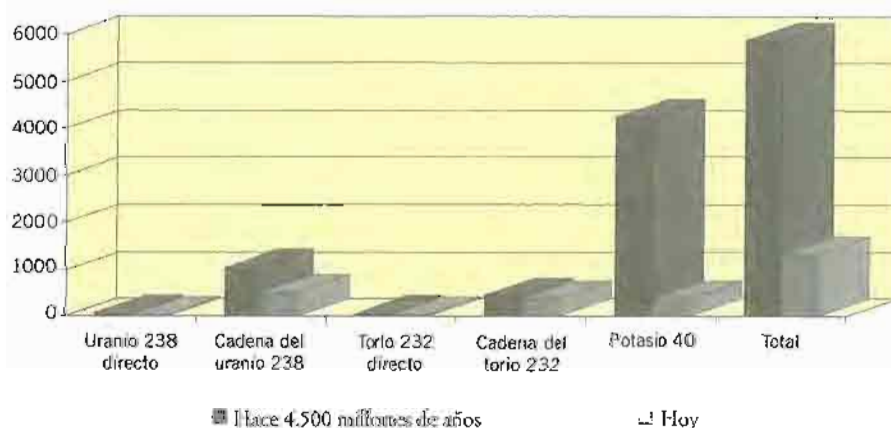
Existen también otros elementos naturales primordiales radiactivos, que suponen una contribución

insignificante a las dosis recibidas. Entre ellos se encuentran: rubidio-87, vanadio-50, cadmio-113, indio-115, lantano-138, etc. En total unos 60 radionucleidos.

La radiación terrestre ha existido siempre, si bien hoy en día la actividad media de la corteza terrestre es unas cuatro veces menor que hace 4.500 millones de años. En la figura 2.3 se ha representado⁽¹²⁾ la actividad media total de la corteza terrestre y la debida al uranio-238 y su serie de desintegración, al torio-232 y su serie de desintegración y al potasio-40.

Según diversas medidas ambientales de la tasa de exposición, los valores del fondo⁽¹³⁾ natural debido a la radiación terrestre, se encuentran comúnmente entre los 3 y 30 $\mu\text{R/h}$ (26,1-261 nGy/h)⁽¹⁴⁾. Sin embargo, pueden existir algunas zonas extensas con niveles radiactivos mucho más elevados; esto sucede por ejemplo en los estados de Kerala y Tamil Nadu en la India, donde en una franja costera de 55 km de largo y 0,5 km de ancho, se presentan concentraciones de mineral de torio (monacita) del orden del 8%, que dan lugar a tasas de exposición superiores a los 200 $\mu\text{R/h}$. También en la costa

Figura 2.3. Actividad de la corteza terrestre (Bq/kg) hace 4.500 millones de años y hoy día



¹² E. Cogné. Principales données chiffrées. L'énergie nucléaire dans notre environnement radioactif. *Revue générale nucléaire*, 1993, n° 2.

¹³ Fondo son concentraciones o niveles de radiación naturales presentes en las condiciones ambientales actuales sin que exista influencia de actividades humanas.

¹⁴ Para radiación ambiental el NUREG 1501 (USNRC) aplica la equivalencia 1 roentgen = 0,0087 grays

atlántica del Brasil, en Guarapari, Meaípe y Cumuruxatiba, se han medido valores muy altos debidos a depósitos de monacitas en las arenas de las playas. Asimismo, en el interior de Brasil, en el estado de Minas Gerais y también en las regiones volcánicas de Poços de Caldas y Araxá-Tapira se han detectado niveles que a veces han superado los 400 $\mu\text{R/h}$ e incluso puntualmente los 2.000 $\mu\text{R/h}$. En este caso se trata de una zona volcánica con mineralizaciones extensas de apatito, en las que los minerales radiactivos, en forma de óxido de torio y óxido de uranio, se encuentran formando parte de otro mineral, el pirocloro.

A continuación se describen resumidamente las características correspondientes a los radionucleidos naturales más significativos que no presentan serie de desintegración, potasio-40 y rubidio-87, y a los radionucleidos naturales que presentan serie de desintegración, uranio y torio.

2.1. Potasio⁽¹⁵⁾

El potasio natural es el séptimo elemento más abundante en la corteza terrestre, representando el 2,1% en peso. Es uno de los constituyentes fundamentales de los seres vivos y es completamente necesario en la dieta humana. En el hombre se encuentra en una proporción próxima a 2 g por kilo de peso. Esta proporción se mantiene prácticamente constante por medio de procesos de regulación interna del organismo (homeostasis).

El potasio natural debe su comportamiento radiactivo al contenido en potasio-40, que es uno de sus isótopos naturales.

2.1.1. Características

- Número atómico: 19
- Peso atómico: 39,02
- Isótopos del potasio natural y abundancia relativa en la naturaleza:
 - Potasio-39 (no radiactivo) 99,988%.
 - Potasio-40 (radiactivo) 0,0118%.
 - Periodo de semidesintegración $1,26 \times 10^9$ años.
- Abundancia media relativa del potasio natural (potasio-39 + potasio-40) en las rocas de la corteza terrestre: 2,1%.
- Desintegración del potasio-40: el potasio se desintegra dando lugar a la formación de argón-40 y una emisión gamma (1.460 MeV); además se produce calcio-40 y una emisión beta (1.314 MeV). Así pues, el espectro gamma del potasio presenta un pico característico en 1.460 MeV, que se utiliza en espectrometría gamma para determinar el contenido en potasio de suelo y rocas.
- El potasio-40 es emisor beta y gamma.
- Contribuye en áreas⁽¹⁶⁾ de fondo calificables de normal, como fuente de radiación externa e interna, con 0,15 mSv/año y 0,18 mSv/año respectivamente, a la dosis equivalente efectiva anual.
- Al presentarse el potasio-40 en una proporción del 0,0118% del potasio natural, su abundancia media en la corteza terrestre es de unas 2,5 ppm y su actividad media en las rocas es de unos 529 Bq/Kg.
- La presencia del potasio-40 hace que se detecten radiométricamente las capas potásicas en los sondeos. En determinados granitos, sienitas y rocas volcánicas de leucita pueden alcanzar los 2.000 Bq/kg, teniendo en cuenta solamente la actividad debida al potasio-40.
- El potasio natural produce 3,3 emisiones gamma por segundo y gramo.
- Su actividad específica es: 853 pCi/g para el elemento potasio.

¹⁵ Todos los datos referentes al contenido de potasio en minerales, aguas y rocas que figuran en tablas sin referencia específica han sido extraídos de *Handbook of Geochemistry*, Springer-Verlag-Heidelberg-New York, 1969

¹⁶ UNSCEAR, Report, 1988.

- La actividad en el cuerpo humano es: 60 Bq por kilo de peso.
- Un 1% de potasio natural produce una tasa de exposición⁽¹⁷⁾ de 1,505 $\mu\text{R}\cdot\text{h}^{-1}$.
- Un 1% de potasio natural produce una tasa de dosis absorbida en aire de 13,1 nGy $\cdot\text{h}^{-1}$.
- Un 1% de potasio natural produce una tasa de dosis absorbida en aire de 3,633 pGy s^{-1} .
- Un 1% de potasio corresponde⁽¹⁸⁾ a una actividad de 310 Bq/Kg de potasio natural.
- Un 1% de potasio corresponde a una actividad de 8,37 pCi/g de potasio natural.

2.1.2. Potasio en los minerales y rocas

Potasio en los minerales

Los minerales en los que más frecuentemente se presenta el potasio son los silicatos y cloruros. En la tabla 2.3 se indican, para diferentes tipos de minerales, los contenidos medios y la actividad debida al potasio.

Tabla 2.3. Abundancia del potasio en los minerales

Mineral	Potasio (39+40) Contenido en %	Bq/kg ⁽¹⁹⁾	PCi/g
Feldespatos	14,6	4.526	122
Biotita	6,7	2.077	56
Moscovita	9,79	3.034	82
Flogopita	5,81	1.801	49
Leucita	17,8	5.518	149
Silvina	52,4	16.244	439
Polihalita	12,9	3.999	108
Alunita	9,37	2.904	78
Jarosita	7,31	2.266	61
Nitro	46,5	14.415	390

¹⁷ IAEA-Tecdoc-566. The use of Gamma Ray Data to Define the Natural Radiation Environment. Vienna 1990.

¹⁸ Radiation Protection Dosimetry. Vol. 24. Nuclear technology Publishing. Radiological Characteristics of a Village on Uraniferous Granitic Ground in Finland. 1988.

¹⁹ 1 pCi = 37 mBq. (1pCi/g equivale a 37 Bq/kg, 1Bq/kg equivale a 0,027 pCi/g).

Contenido de potasio en rocas ígneas efusivas o plutónicas

Los contenidos promedio de potasio en rocas ígneas o plutónicas se han representado en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Contenido de potasio en rocas ígneas o plutónicas

Rocas	Potasio (39+40) Contenido en %	Bq/kg	PCi/g
Dunitas y peridotitas	0,0054	0,16	4,3 10^{-3}
Gabros	0,55	170	4,6
Dioritas y cuarzodioritas	1,53	471	13
Granodioritas	2,47	765	21
Granitos alcalinos	3,80	1.178	32
Sienitas alcalinas	4,26	1.320	36
Sienita nefelínicas	3,98	1.233	33
Monzonitas	3,51	1.088	29

La tasa de exposición debida al potasio oscila entre menos de 1 $\mu\text{R}/\text{h}$ en las dunitas, noritas y gabros y 8 $\mu\text{R}/\text{h}$ en las sienitas calcoalcalinas leococráticas.

Contenido de potasio en rocas efusivas o volcánicas

Los contenidos medios de potasio en rocas efusivas o volcánicas se han representado en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Contenido de potasio en rocas efusivas o volcánicas

Rocas	Potasio (39+40) Contenido en %	Bq/kg	PCi/g
Basaltos	1,25	387,5	10
Andesitas	1,31	406,1	11
Dacitas	2,22	688,2	19
Traquitas	4,76	1.475,6	40
Traquitas calcoalcalinas	6,13	1.900,3	51
Riolitas calcoalcalinas	6,13	1.900,3	51
Riolitas alcalinas	4,50	1.395	38

Es decir, según el tipo de roca efusiva la tasa media de exposición procedente del potasio varía entre menos de 1 $\mu\text{R/h}$ en los basaltos toleíticos y 9 $\mu\text{R/h}$ en las traquitas y riolitas calcoalcalinas.

Contenido de potasio en rocas carbonatadas

Tabla 2.6. Contenido de potasio en rocas carbonatadas

Rocas	Potasio (39+40) Contenido en %	Bq/kg	PCi/g
Calizas puras	0,0150	4,6	0,12
Calizas	0,31	96	2,6
Dolomías	0,68	210	2,7

En la tabla 2.6 se han representado los contenidos en potasio de las rocas carbonatadas.

El potasio se concentra en la fracción no carbonatada. El aporte medio del potasio a la tasa de exposición es inferior a 1 $\mu\text{R/h}$.

Contenido de potasio en sedimentos arcillosos

En los sedimentos, el contenido en potasio depende más del contenido en minerales presentes en la arcilla que del contenido en feldespato potásico. En sedimentos no carbonatados el contenido en potasio es función de la relación arena/arcilla. La variación del contenido de potasio en las arcillas es muy fuerte.

Se concentra en los horizontes profundos de los suelos lixiviados, debido primeramente a la movilización del potasio en la superficie y su posterior absorción en profundidad por las arcillas caolínicas. La intensa lixiviación de los suelos da lugar a fuertes concentraciones de potasio en profundidad.

El contenido en potasio de las arcillas se utiliza para determinar el carácter continental o marino del medio geológico. El medio continental, con contenidos más altos, está definido por aguas dulces y ácidas, que coinciden con un medio de mayor abundancia de minerales micáceos y con el predominio de las arcillas caolínicas. El medio marino presenta

Tabla 2.7. Contenido de potasio en rocas limosas y arcillosas

Rocas	Potasio (39+49) Contenido en %	Bq/kg	PCi/g
Arcillas negras	7,9	2.449	68
Arcillas con illita	3,8	1.178	32
Limos lacustres reducidos	2,2	682	18
Limos lacustres oxidados	2,0	620	17
Sedimentos lacustres alcalinos	5,0	1.550	42

un contenido en potasio mucho más bajo. En la tabla 2.7, se presentan los contenidos de potasio en diferentes tipos de arcillas.

El aporte del potasio a la tasa de exposición oscila entre menos de 3 $\mu\text{R/h}$ en los limos lacustres oxidados y 12 $\mu\text{R/h}$ en las arcillas negras.

Contenido de potasio en las areniscas

El contenido de potasio en las areniscas depende del origen geológico de éstas, puesto que es función del contenido en feldespato potásico, mica potásica y glauconita. Aumenta el potasio al disminuir el tamaño de grano, disminuye en las zonas húmedas en relación con las secas y también en las fases inicial y final del ciclo tectónico. El contenido medio de potasio en las areniscas es de 1,48%, que representa unos 2,2 $\mu\text{R/h}$.

Tabla 2.8. Contenido de potasio en rocas metamórficas

Rocas	Potasio (39+40) Contenido en %	Bq/kg	PCi/g
De alto grado de metamorfismo	2,86	886	24
De bajo grado de metamorfismo	2,32	719	19

Contenido de potasio en rocas metamórficas

Se ha representado en la tabla 2.8

El aporte del potasio a la tasa de exposición oscila entre menos de 3,6 $\mu\text{R/h}$ y 4,2 $\mu\text{R/h}$.

Potasio en suelos

El potasio existente en los suelos es resultado de los materiales a partir de los cuales se ha formado y de los procesos de alteración que han sufrido. Durante los procesos de meteorización la disolución del potasio contenido en los feldespatos es función del pH y de la concentración en las aguas de aluminio y sílice y de la tasa de formación de silicatos de aluminio hidratados. Una vez que entra el potasio en solución, se absorbe por las arcillas o emigra con las aguas.

Minerales primarios tales como moscovita, biotita, y muchos feldespatos contienen altas cantidades de potasio. Durante los procesos de alteración de estos minerales se forman arcillas que también tienen un alto contenido en potasio y si la lixiviación es excesiva, se produce una pérdida de potasio.

Tabla 2.9. Contenido de potasio en las aguas

	Valor medio (ppm K)	Rango (ppm K)
Agua del mar	392	
Lagos	233	0,2-7.560
Ríos	6,5	0,1-238
Aguas subterráneas	6,2	0,1-98
Aguas hidrotermales	116	1-2.325
Aguas formacionales	1.441	2-9.120

Potasio en aguas

En la tabla 2.9 se ha presentado el contenido medio de potasio en diferentes tipos de aguas.

2.2. Rubidio

El rubidio natural debe su radiactividad a su contenido en rubidio-87, que es uno de sus isótopos naturales.

2.2.1. Características

- Número atómico: 37
- Peso atómico: 85,47

- Isótopos del rubidio natural y abundancia relativa en la naturaleza:
 - Rubidio-85: 72,15% (no es radiactivo).
 - Rubidio-87: 27,85% (es radiactivo).
 - Periodo de semidesintegración del rubidio-87: $4,7 \times 10^{10}$ años.
 - Concentración en la corteza terrestre: 2 pCi/g.
 - La desintegración del rubidio-87 da lugar a estroncio-87 (estable).
- Abundancia relativa del rubidio natural (rubidio-85 + rubidio 87) en la corteza terrestre: de 75 a 90 ppm⁽²⁰⁾, (tabla 2.10).
- Abundancia relativa en suelos⁽²¹⁾ 40 $\mu\text{g g}^{-1}$, es decir 40 ppm.
- Actividad específica: 0,02 pCi/g de rubidio natural.
- Es emisor β (0,274 MeV).
- Contribuye, como fuente de radiación interna, en zonas de fondo normal, con 6 $\mu\text{Sv/año}$, a la dosis equivalente anual.

Tabla 2.10. Concentraciones de rubidio-87 en los principales tipos de rocas.

Tipo de roca	ppm de rubidio	Bq/kg	pCi/g
Rocas ígneas:			
Basaltos:	40	30	0,9
Máficos	10-50	1-40	0,2
Sálidos	170-200	150-180	4,5
Granitos	170-200	150-180	4,5
Rocas sedimentarias			
Grauvacas:	120	110	3
Cuarzo claro	<40	<40	<1
Cuarzo oscuro	90	80	2
Arcosas	80-120	80	2
Arenas de playa	<40	<40	<1
Rocas carbonatadas	10	8	0,2
Suelos	65	50	1
Promedio en la parte superior de la corteza	112	100	2

²⁰ NCRP, n° 45.

²¹ NCRP n° 50. Environmental Radiation Measurements. 1985.

²² NCRP 1994.

2.2.2. Rubidio en las rocas

En la tabla 2.10 se han representado las concentraciones de rubidio en los principales tipos de rocas.

Entre los radionucleidos naturales que presentan serie de desintegración se encuentra los más significativos son uranio y torio.

2.3. Uranio²³¹

El uranio se encuentra presente en todas partes. El contenido medio en la corteza terrestre es de dos partes por millón (dos gramos por tonelada). Es más frecuente que el oro, la plata, o el mercurio, pero menos que el cobalto, el molibdeno o el plomo.

2.3.1. Características

Se presenta en la naturaleza con las valencias +4 y +6, al contrario que el torio que sólo se presenta con valencia +4. En las condiciones oxidantes que existen en la superficie terrestre, forma compuestos de valencia +6 que son muy móviles y forman numerosas especies minerales cuando se alcanzan altas concentraciones de uranio. En condiciones ambientales reductoras el uranio produce precipitados insolubles de valencia +4.

En los procesos de diferenciación magmática, tanto el uranio como el torio tienen un comportamiento geoquímico paralelo, debido a la similitud de su estado de valencia y a su radio iónico en tales condiciones (0,93 para el estado +4 del uranio y 0,99 para el estado +4 del torio). Los compuestos de uranio +4 cristalizan en los magmas graníticos y son insolubles en agua. En condiciones oxidantes se oxidan fácilmente dando compuestos de valencia +6.

La relación media entre los contenidos en ppm de torio y uranio en las rocas es de $Th/U = 3$, con un rango entre 3 y 4 para las rocas graníticas.

El uranio se encuentra en una serie de minerales muy frecuentes entre los que destacan, los óxidos (pechblenda, uraninita, óxidos negros), fosfatos y arseniatos (autumnita, sabugalita, torbernita, zeunerita), sulfatos (uranopilita), carbonatos, vanadatos (carnotita, tyuyamonita, francevillita) y silicatos (cofinita, uranofano), niobatos y tantalatos (brannerita). De todos ellos, los más frecuentes son torbernita, autumnita y tyuyamonita.

Los minerales de uranio en medio oxidante se alteran y oxidan dando lugar a complejos de uranio+6 que se transportan por las aguas superficiales y subterráneas. Si esas aguas pasan por un medio reductor se forman de nuevo sales de uranio+4 más insolubles, esto sucede por ejemplo en las arcillas bituminosas, las arcillas negras y las ampelíticas.

La presencia de estos minerales suele estar asociada a concentraciones locales específicas, que pueden formar parte de pequeñas manifestaciones uraníferas o de yacimientos económicamente importantes.

Lo fundamental es que el uranio se encuentra presente en todas partes, como elemento traza en los minerales más frecuentes, como son por ejemplo el cuarzo, los feldespatos, las micas y las plagioclasas, etc. Unas veces forma sustituciones isomorfas en la red cristalina de los minerales, otras se ubica en los defectos de la red, otras es absorbido a lo largo de la superficie de los cristales, como en las arcillas o en los bordes de los granos o en inclusiones con microcristales de minerales de uranio. El uranio+4, por su radio medio próximo a un angström²³⁴ (0,93 angström) puede originar reemplazamientos isomorfos con otros cationes de índice de coordinación 8 y similar radio, como sucede con el torio+4, potasio+1 (hidratado), sodio+1, estroncio+2. El uranio+6 por su parte, tiene un índice de coordinación 2 y un radio iónico 0,45 angström.

En la tabla 2.11 puede verse la abundancia del uranio en los minerales más frecuentes.

En las rocas fosfatadas se encuentran también concentraciones de uranio+4, sin embargo el mecanismo de reducción de uranio+6 a uranio+4 no está

²³ Todos los datos referentes al contenido de potasio en minerales, aguas y rocas que figuran en tablas sin referencia específica han sido extraídos de «Handbook of Geochemistry». Springer-Verlag-Heidelberg-New York, 1969.

²⁴ 1 angström = 10^{-10} m.

bien conocido en estas condiciones. Se supone que la concentración de uranio está asociada a la presencia de calcio+2 que tiene un radio iónico (0,99 angström) similar al del uranio+4. En la tabla 2.12 se han representado los contenidos medios en las rocas más frecuentes.

Uranio en las aguas. En las aguas superficiales el contenido medio de uranio es de 0,2 ppb, oscilando entre 0,02 y 6,6 en los grandes ríos. En las aguas de mar el contenido oscila entre 1 y 6 ppb⁽²⁶⁾.

Las aguas subterráneas de zonas mineralizadas en uranio pueden alcanzar 500 ppb.

Tabla 2.11. Abundancia del uranio en minerales frecuentes

Mineral	Partes por millón	Bq/kg procedentes del uranio	Rango (ppm)
Cuarzo	1,7	20,91	0,1-10
Feldespatos y plagioclasas	2,7	33,21	0,1-10
Biotita	8,1	99,63	1-60
Moscovita	11,8	145,14	2-8
Hornblenda	7,9	97,17	0,2-60
Piroxenos	3,6	44,28	0,1-50
Olivino	0,005	0,0615	
Alanita	200	2.460	30-1.000
Apatito	65	799,5	10-100
Epidota	43	528,9	20-200
Monacita	3.000	36.900	500-3.000
Esfena	280	3.444	10-700
Zircón	1.330	16.359	100-6.000

Tabla 2.12. Contenido medio de uranio y torio en las rocas más frecuentes⁽²⁸⁾

Tipo de roca	Th (ppm*)	U (ppm*)	Th/U
<i>Rocas ígneas</i>			
Ultrabásicas	0,1	0,02	5
Intrusivas y efusivas básicas	3	0,6	5
Intrusivas y efusivas intermedias	5	2	2,5
Intrusivas y efusivas ácidas	15	4,5	3,3
<i>Rocas sedimentarias</i>			
Arenitas y ruditas (areniscas, arcosas, grauwaças y conglomerados)	5	1,5	3,3
Lutitas (arcillas y pizarras)	12	3,5	3,4
Precipitados (calizas, dolomías, sideritas)	1	1,5	0,6
Precipitados (chert y chert de hierro)	3	2	1,5
Evaporitas (yesos y anhidritas)	0,2	0,1	2
Evaporitas (halita y silvina)	0,2	0,1	2
<i>Rocas metamórficas</i>			
Cuarcitas, metagrauwaças y metaconglomerados	5	1,5	3,3
Mármoles y dolomías cristalinas	1	0,5	2
Filitas, metaargilitas, pizarras	10	2,5	4
Esquistos formados a partir de rocas ígneas	6	2	3
Esquistos de origen sedimentario	10	2	5
Anfibolitas formadas a partir de rocas ígneas	2	0,5	4
Anfibolitas de origen sedimentario	8	2	4
Neises y granulitas	10	3	3,3
Serpentinitas	0,1	0,02	5
Hornfelds (formados a partir de rocas sedimentarias)	10	2	5
Skarn (formados a partir de rocas sedimentarias)	15	3	5

* ppm = partes por millón

²⁸ I.A.E.A. Technical Reports Series n° 284. Geochemical Exploration for Uranium, Vienna, 1988

²⁶ 1 ppb = 1 microgramo/litro.

De los análisis de uranio realizados en aguas se concluye que éste se encuentra como mínimo en una de las siguientes tres formas: disuelto, absorbido en los coloides y formando compuestos orgánicos.

En cuanto a las formas químicas en que se presenta, las principales son:

- Como ión uranio+4 (^{4+}U) y uranilo [$^{+2}(UO_2)$] formando complejos con carbonatos, fosfatos fluoruros, nitratos, hidróxidos, silicatos y sulfatos en un amplio rango de pH, comprendido entre 4 y 8,5.
- Complejos húmicos y urano-orgánicos.
- Absorbido por coloides orgánicos e inorgánicos.
- Absorbido por microorganismos.

Tabla 2.13. Contenido de uranio en las aguas

	Uranio (partes por billón)	Rango (partes por billón)
Océano Atlántico, Pacifico	1,15	
Mar de Azof	3,3	
Mar Caspio		3-10
Acuíferos mineralizados		10-460
Águas superficiales		0,03-120

Entre los absorbentes más importantes se encuentran: óxidos de hierro y manganeso, hidróxidos de hierro, geles, coloides de sílice y aluminio, coloides de arcilla, complejos arcillosos orgánicos y complejos húmicos.

En la tabla 2.13 se ha representado el contenido medio de uranio, expresado en partes por billón⁽²⁷⁾, en diferentes tipos de aguas.

2.3.2. Isótopos del uranio

Características del uranio natural

- Número atómico: 92
- Actividad específica (elemental): 3×10^5 pCi/gr. de uranio natural.
- Peso atómico: 238,03.
- Actividad del uranio natural: 1 ppm de uranio natural⁽²⁸⁾ equivale a 12,3 Bq/kg.

El espectro gamma del uranio natural presenta dos picos muy característicos, uno en 0,609 MeV y otro en 1,760 MeV correspondientes ambos al bismuto-214, que se utilizan en medidas ambientales para determinar el uranio equivalente (expresado habitualmente en partes de uranio por millón).

En la naturaleza se encuentran tres isótopos diferentes de uranio: uranio-238, uranio-235 y uranio-234.

El uranio-238 y el uranio-235 son las cabezas de sus respectivas series de desintegración, que terminan en el plomo-206 y en el plomo-207 respectivamente.

Tabla 2.14. Isótopos naturales del uranio

Isótopo	Masa	Abundancia %	Período de semidesintegración	Modo de desintegración	Serie de desintegración
Uranio-238	238,05	99,2745	4.500 millones de años	α y γ torio-234	Uranio-238
Uranio-235	235,04	0,7200	710 millones de años	α y γ torio-231	Uranio-235
Uranio-234	234,04	0,0055	244.500 años	α y γ torio-230	Uranio-238

²⁷ 1 billón = mil millones.

²⁸ Radiation Protection Dosimetry. Vol. 24. Nuclear Technology Publishing. Radiological Characteristics of a Village on Uraniferous Granitic Ground in Finland. 1988.

El uranio-234 es un elemento intermedio de la serie de desintegración del uranio-238.

La abundancia de cada uno de ellos, su periodo y modo de desintegración están resumidos en la tabla 2.14.

La serie de desintegración del uranio-238

En la tabla 2.15 se ha representado la serie de desintegración del uranio-238. En ella se han diferenciado cinco subseries atendiendo a la movilidad del elemento cabeza de cada una de ellas, a su comportamiento físico o químico y al periodo de desintegración más largo del cabeza de serie, que condicionan la distribución en la naturaleza del resto de la subserie.

Tabla 2.15. Esquema principal de desintegración de la serie del uranio-238

Primera subserie				
1ª subserie: uranio 238 → uranio 234				
^{238}U ($4,47 \times 10^9$ años)				
$\alpha, \gamma \downarrow$				
^{234}Th (24,1 días)	$-\beta, \gamma \rightarrow$	^{234}Pa (1,17 min)	$-\beta, \gamma \rightarrow$	^{234}U ($2,45 \times 10^5$ años)
				$\alpha, \gamma \downarrow$
Segunda subserie				
2ª subserie: torio-230				
^{230}Th ($7,7 \times 10^4$ años)				^{230}Th ($7,7 \times 10^4$ años)
$\alpha, \gamma \downarrow$				
Tercera subserie				
3ª subserie: radio 226				
^{226}Ra (1600 años)				
^{226}Ra (1.600 años)				
$\alpha, \gamma \downarrow$				
Cuarta subserie				
4ª subserie: radón 222 (subserie de los descendientes de vida corta del radón)				
^{222}Rn (3,83 días)				
$\alpha, \gamma \downarrow$				
^{218}Po (3,05 minutos)	0,02%	$-\beta \rightarrow$	^{218}At (2,0 seg.)	
$\alpha, \gamma \downarrow$ 99,98%			$\downarrow \alpha$	
^{214}Pb (26,8 minutos)		$-\beta, \gamma \rightarrow$	^{214}Bi (19,9 minutos)	$-\beta, \gamma \rightarrow$
(antes radio B)			(antes radio C)	^{214}Po ($1,6 \times 10^{-4}$ seg.)
				(antes radio C')
				$\alpha, \gamma \downarrow$
Quinta subserie				
5ª subserie: plomo-210 (subserie de los descendientes de vida larga del radón)				
^{210}Pb (22,3 años)				^{210}Pb (22,3 años)
(antes radio D)				(antes radio D)
	$-\beta \rightarrow$	^{210}Bi (5,01 días)	$-\beta \rightarrow$	^{210}Po (138 días)
		(antes radio E)		(antes radio D)
				$\alpha \downarrow$
				^{206}Pb (estable)

Primera subserie. Uranio-238 → uranio-234

Por la elevada vida media del uranio-238 y del uranio-234 podría ponerse de manifiesto su separación isotópica en la naturaleza, pero no existen tales evidencias, probablemente por las variaciones de concentración del cabeza de serie. No obstante el primero, uranio-238, se concentra en formaciones geológicas de origen sedimentario (relación entre actividades uranio-238/uranio-234 $\approx 0,6$) mientras que el segundo lo hace en sedimentos oceánicos. La relación uranio-238/uranio-234 $\approx 1,14$.

Segunda subserie. Torio-230

Comienza y termina en el torio-230, que fue conocido con el nombre de iónio. Tiene menos movilidad química que sus precursores y precipita en medio marino.

Tercera subserie. Radio-226

El radio como el uranio se encuentra en todas partes. El radio-226 se separa como subserie porque en presencia de aguas sulfatadas da lugar a la precipitación de sulfato de radio, muy insoluble. La formación de este precipitado, condiciona la presencia del resto de los radionucleidos de la serie que quedan asociados inicialmente al lugar donde se formó el precipitado.

El radio se absorbe por las plantas y los animales y alcanza la cadena alimenticia humana. Se deposita en los huesos donde se acumula un porcentaje superior al 70% del radio incorporado. La dosis equivalente efectiva anual resultante en áreas con valores del fondo calificables de normal es de unos $7\mu\text{Sv/a}$. En zonas de alto contenido en radio puede llegar a dosis entre 65 y $250\mu\text{Sv/a}$.

El radio-226 es el más importante de los isótopos naturales del radio, en cuanto a la dosis de radiación aportada al hombre por él mismo y sus descendientes. Procede del torio-230, que a su vez es un producto intermedio de la serie de desintegración del uranio-238. Es emisor α y γ . En su desintegración da lugar al radón-222. Está siempre presente en los minerales que contienen uranio.

Cuarta subserie. Radón-222

El radón-222 es un gas incoloro, inodoro e insípido, que no puede detectarse por los sentidos humanos. Se encuentra por todas partes, en las rocas, en los suelos y en los seres vivos. Al ser un gas, su movilidad es muy superior a la de los radioisótopos de que procede, uranio y radio, que se movilizan en medio acuoso.

En el suelo el radón puede emigrar grandes distancias, del orden de centenares de metros. Es sobradamente conocido en la exploración de uranio que las anomalías de radón están frecuentemente desplazadas, decenas o incluso centenares de metros, de las zonas de enriquecimiento en uranio que fueron su origen. Esto es debido a que la permeabilidad de las rocas juega un papel fundamental.

Se ha calculado que la inhalación de radón y de sus productos de desintegración de vida corta, suponen más de la mitad de la dosis que se recibe procedente de todas las fuentes naturales y en algunos casos puede conducir a dosis que sean perjudiciales para la salud, especialmente en lugares cerrados, dando lugar así a las mayores dosis procedentes de la radiación natural.

El radón, que es un emisor alfa, es el radionucleido que más contribuye a la radiación interna, puesto que es absorbido por inhalación durante la respiración y porque sus productos de desintegración se ionizan fácilmente y se fijan a las partículas de polvo atmosférico cargadas electrostáticamente y a los tejidos internos. Se estima que en zonas con valores del fondo normales, la dosis equivalente efectiva anual es de $70\mu\text{Sv/a}$ para los isótopos de vida corta del radón en los exteriores de los edificios y de $1.000\mu\text{Sv/a}$ en recintos cerrados.

La piel humana está formada en su parte más superficial por células muertas cuyo espesor es suficiente para absorber la radiación alfa, pero al ser el radón un gas pasa por inhalación a los pulmones y al tejido pulmonar, se aloja en su epitelio y en los alveolos, poniéndose en contacto el radón y sus descendientes emisores alfa, beta y gamma de vida corta, con las células vivas a las que pueden

causar daños. La dosis que recibe la mucosa bronquial depende del radionucleido depositado y del tiempo de residencia del aire en los pulmones.

La mayor parte de la dosis de radiación recibida no depende del radón en sí, sino de sus descendientes de corto periodo de semidesintegración, de ellos los más importantes son: polonio-218, polonio-214, bismuto-214, plomo-214 y plomo-210.

La subserie de desintegración encabezada por el radón-222 se ha denominado como la de los descendientes de vida corta del radón. La desintegración del radón-222 da lugar a radionucleidos de periodo de semidesintegración muy corto, entre los cuales se encuentran el polonio-218 (tres minutos) y el polonio-214 (0,16 milisegundos) que son emisores alfa y el plomo-214 (26,8 minutos), bismuto-214 (19,9 minutos) y plomo-210 (22,3 años) que son emisores beta y gamma. Todos juntos contribuyen con cerca del 99% de la dosis absorbida por el ser humano procedente de la serie de desintegración del uranio. Se considera que tanto el radón como estos radioisótopos, principalmente los emisores alfa, tienen relación con el cáncer de pulmón en las personas.

El radón-222 (radón) aunque emana en proporción mucho más baja que el torón (radón-220), es el isótopo más frecuente, dado que su mayor periodo de semidesintegración (3,8 días) le permite emigrar desde las rocas y el suelo para pasar al agua y al aire. Es emisor alfa y gamma.

Factores que influyen en la emisión de radón al aire. La emisión de radón desde las rocas y suelo está controlada por varios factores, entre los que destacan:

- La existencia de una fuente de radón (presencia de radio-226 en la roca o el suelo).
- La posibilidad del paso del radón a los poros de aire que rodean los granos de suelo o roca (poder de emanación).
- La existencia de vías o caminos que faciliten el movimiento del radón (permeabilidad y difusión).
- La ausencia de pantallas que dificulten su paso (humedad).

A continuación se tratarán brevemente cada uno de estos factores.

• Contenido de radio-226 en las rocas

El radón se origina por la desintegración del núcleo del radio-226 que emite una partícula alfa, compuesta de dos neutrones y dos protones. Al formarse esta partícula alfa es emitida en dirección opuesta a la emisión de radón, de forma similar a como retrocede la culata de un fusil cuando se produce el disparo, siendo este proceso el que ocasiona el escape del radón de los granos de un mineral.

El retroceso hace que el átomo de radón formado penetre más hacia el interior del mineral o que por el contrario, salga hacia los poros, fisuras o espacios libres que rodean al grano de mineral. Las condiciones en las que se encuentren estos poros, condicionarán que se transporte el gas más o menos fácilmente hasta alcanzar la superficie. Así, si existe agua en los poros, el movimiento del radón se ralentiza, por una parte porque se difunde en el agua y por otra, porque el agua actúa como una barrera que impide el movimiento de dicho gas.

Resulta evidente que al estar ligada la formación de radón a la cantidad de radio-226 existente en las rocas o el suelo, cuanto más radio-226 exista mayor cantidad de radón podrá formarse. Como a su vez la formación de radio-226 está ligada a la presencia de uranio. A efectos de estimación del potencial de emisión de radón, se asume que 1 ppm de uranio equivale a 0,33 pCi/g de radio-226 en equilibrio con el uranio ($1 \text{ pCi/g} = 37 \text{ Bq/kg}$). (El agua del mar⁽²⁹⁾ contiene $3 \times 10^{-5} \text{ pCi/g}$ de radio-226).

Entre las rocas con altas concentraciones de uranio a efectos de estimar el potencial de emisión de radón, superiores a 3 ppm, se encuentran las arcillas y calizas arcillosas negras, las areniscas de glauconita y algunas areniscas de origen fluvial, entre otras.

⁽²⁹⁾ Gerard Lambert, La Recherche n° 157. Vol. 15, 1984

Los contenidos mayores de radón se localizan en determinadas rocas graníticas y en metamórficas con alto grado de metamorfismo como por ejemplo: neises, rocas metamórficas derivadas de sedimentos calizos, arcillas negras, rocas fosfatadas y rocas sedimentarias derivadas de otras con mayor contenido en uranio. En la tabla 2.16 se presentan contenidos en radio-216 en muestras de granitos naturales.

Casos especiales de rocas que pueden presentar un potencial entre moderado a alto de emisión de radón, se encuentran en determinadas rocas calizas, en determinadas rocas calizas con fosfatos o materia orgánica que hayan fijado uranio. También en los suelos conocidos como «terra rossa», de origen calizo, se encuentran horizontes con enriquecimiento en óxidos de hierro, que ocasionan enriquecimientos relativos en uranio y radio.

• Poder de emanación

El poder de emanación o fracción o coeficiente de emanación de una roca o suelo, es la cantidad relativa de radón que sale de los granos que constituyen la roca o suelo y se incorpora a los poros que rodean dichos granos. Es por tanto la fracción del radón formado en el suelo que escapa a los poros.

El poder de emanación está controlado por el tamaño de los granos y la distribución de radio en los granos minerales del suelo y la roca. Si el radio está distribuido homogéneamente en los granos minerales, el poder de emanación será menor si los granos son gruesos y mayor si son finos.

Si el radio se distribuye como una película alrededor de los granos, es decir en la parte más externa de los mismos, el poder de emanación será mayor que si el radio-226 se encuentra

Tabla 2.16. Contenido de radio-226 en muestras de granitos nacionales³⁰

Provincia	Número de muestras	Bq/kg	
		Valor medio	Rango
Ávila	2	86,1	59,7-112,6
Badajoz	23	66,3	7,1-143,7
Cáceres	10	78,2	37,4-103,6
La Coruña	3	92	78-114
Huelva	1	32,6	32,6
Huesca	1	282,1	282,1
Lugo	6	93,1	42,3-168,9
Madrid	13	90,9	44-171,9
Orense	5	78,4	43,1-98,1
Pontevedra	12	112	36,4-197,5
Salamanca	3	61,3	43,8-81,8
Segovia	3	126,7	90-165,8
Sevilla	1	30,3	30,3
Toledo	1	191,2	191,2
Zamora	3	73,9	58,8-94,5

³⁰ Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes. Página 24. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección Otros Documentos, 6.1998.

distribuido uniformemente dentro del grano. Esta distribución pelicular del radio se observa frecuentemente en mineralizaciones de uranio diagenéticas o secundarias, formadas en un medio reductor, asociadas a una matriz formada posteriormente que rodea los granos, así por ejemplo, el coeficiente de emanación es más grande en un granito alterado que en un granito sano.

Normalmente el coeficiente de emanación en los suelos se encuentra en el rango de 0,2 a 0,5.

• La permeabilidad

Si los espacios porosos no están interconectados, el radón no puede movilizarse o emigrar desde donde se ha formado. Así pues, la permeabilidad de la roca infrayacente y del suelo controlan la movilización y el transporte del radón.

La permeabilidad representa la interconexión entre los espacios porosos. Si la permeabilidad es elevada, el radón se moverá más fácilmente. Por eso se facilita su emisión en los suelos permeables como son los suelos arenosos, las zonas de fractura, las cuevas, y se dificulta en los más impermeables como son los arcillosos.

• Movilización y transporte del radón

El movimiento del radón desde los poros se realiza por:

- Difusión molecular o movimiento desde un área de alta concentración de radón a un área de baja concentración a presión constante. Este es un movimiento lento.
- Flujo convectivo o movimiento de radón desde una zona de alta presión a una zona de baja presión, este movimiento es más importante que el de la difusión molecular en la superficie.
- El transporte advectivo o movimiento forzado desde el exterior, afecta al flujo de radón en la naturaleza, estas fuerzas son los ciclos térmicos y barométricos y el viento. Por esta

razón, la liberación de radón aumenta en las zonas de fisuras que alcanzan la superficie como sucede por ejemplo en los terremotos y erupciones volcánicas. En condiciones normales, pequeñas cantidades de radón se liberan en las grandes zonas de fracturas y sus variaciones son útiles en la predicción de los terremotos. Se ha estimado que unos tres millones de curios de radón se liberaron a la atmósfera durante la erupción del volcán Santa Elena en 1980 en los Estados Unidos.

La tasa de exhalación de radón por unidad de superficie y tiempo puede estimarse⁽³¹⁾ mediante la fórmula:

$$R = C_{Rn} \lambda_{Rn} f \rho [Dc / (\lambda_{Rn} \epsilon)]^{0.5}$$

En la que:

R = La densidad de flujo del radón (tasa de exhalación) expresada en $Bq m^{-2} s^{-1}$.

λ_{Rn} = La constante de desintegración del radón-222 ($2,1 \times 10^{-6} s^{-1}$).

C_{Rn} = La concentración de actividad de radio-226 en el suelo o roca (en $Bq kg^{-1}$).

ρ = La densidad del material, suelo, roca, etc., expresado en $kg m^{-3}$.

f = El coeficiente de emanación del material.

Dc = El coeficiente de difusión efectiva del material expresado en $m^2 s^{-1}$.

ϵ = La porosidad del material.

Formaciones geológicas con bajo contenido en radón, como por ejemplo son las calizas o las dolomías, pueden presentar ocasionalmente contenidos altos en radón asociados a fracturas, fisuras o cavernas, que constituyan vías obligadas para el movimiento del radón, que en algún caso puede proceder de la desgasificación de aguas subterráneas que lleven contenidos altos de radón.

• La humedad del suelo

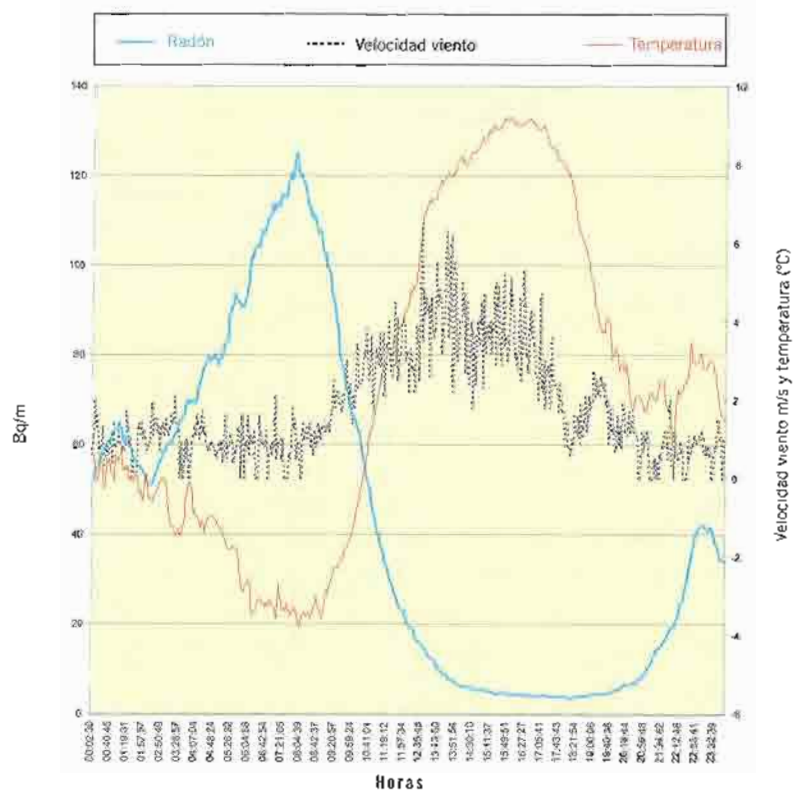
La humedad del suelo es el factor más importante que afecta al potencial de emisión de

³¹ UNSCEAR Report, p. 46, 1993.

Tabla 2.17. Factores que influyen en la emisión de radón al aire

Factor	Concepto	Rango normal de variación	Consecuencia al aumentar el valor del factor
Actividad del uranio y radio-226 (Bq/kg, pCi/g)	Número de desintegraciones por unidad de masa. (1 ppm de uranio en equilibrio → 12,3 Bq/kg → 0,33 pCi/g)	1-3,000	Aumento de radón
Fracción de emanación	Fracción de radón 222 emitida desde los granos de roca o suelo a los poros que los rodean	0,1-0,4	Aumento de radón
Permeabilidad, coeficiente de difusión m² s⁻¹	Trasmisividad del radón para atravesar la capa de suelo	10⁻⁶ a 10⁻¹¹	Aumento de radón
Porosidad (p)	$P = 1 - \rho / \gamma \cdot \rho_{\text{agua}}$	0,25 a 0,45	Aumento de radón
Humedad (q)	Porcentaje de humedad en peso	6 a 35%	Disminución de radón
Densidad seca (r)	g/cm³	1,5 a 1,8	Disminución de radón
Peso específico (g)	$\rho \text{ (roca o suelo) } / \rho_{\text{(agua)}}$	2,5 a 2,8	Disminución de radón

Figura 2.4. Oscilaciones medidas en la estación de vigilancia de Saucedilla del contenido de radón en el aire, velocidad del viento y temperatura ambiente. Los datos corresponden al día 10 de enero de 2000



radón, ya que influye tanto en el poder de emanación, disminuyéndolo, como en el transporte de radón, dificultándolo. El agua reemplaza el gas de los poros impidiendo la salida de radón y además retiene el radón que se incorpora al agua. La emisión de radón en zonas encharcadas es muy baja, a menos que se trate de aguas con concentraciones significativas de radio disuelto.

El radón en el aire. En la tabla 2.17 se han representado resumidamente los factores, ya descritos anteriormente, que influyen en la emisión de radón de un suelo hasta alcanzar el aire.

Una vez que el radón-222 escapa del suelo, puede concentrarse en el aire, fijándose en el polvo y en los aerosoles. La concentración de radón varía según las condiciones atmosféricas y sigue las leyes de difusión de los gases. Las concentraciones máximas de radón

se han medido en condiciones de inversión atmosférica. Su contenido diario oscila entre los niveles máximos, que suelen medirse a primeras horas del día, y los mínimos que se miden hacia el mediodía y comienzo de la tarde. La lluvia disminuye el contenido de radón del aire. La figura 2.4 corresponde a medidas de velocidad de viento, temperatura y actividad del radón registrados el día 10 de enero de 2000, en la estación⁽¹²⁾ de vigilancia de Saucedilla.

En 1990 se firmó un acuerdo específico entre el CSN y la Universidad de Cantabria (Departamento de Física Médica de la Facultad de Medicina de Santander) para la determinación de niveles de radón en España, en la tabla 2.18 se resumen los resultados referentes a concentraciones de radón medidos en diferentes comunidades autónomas.

Tabla 2.18. Valores de las concentraciones de radón obtenidos en las diferentes comunidades autónomas

Comunidad autónoma	Número de medidas	Valor medio * (Bq/m ³)	Rango de valores
Andalucía	278	31	LID** - 848,4
Aragón	130	39	LID - 921,3
Asturias	54	43	18,5 - 947,2
Baleares (Mallorca)	27	27	LID - 160,6
Canarias (Tenerife)	60	64	14,8 - 1.875,8
Cantabria	103	40	LID - 1.972,4
Castilla-La Mancha	168	43	LID - 395,9
Castilla y León	309	68	LID - 15.402,7
Cataluña	78	23	LID - 1.775,9
Extremadura	111	90	LID - 1.258
Galicia	112	118	18,5 - 2.068,3
Madrid (Guadarrama)	29	95	28,1 - 492,1
Murcia	59	25	LID - 104,7
Navarra	49	26	LID - 1.072,9
La Rioja	26	19	LID - 1.072,9
País Vasco	79	28	LID - 303,8
Comunidad Valenciana	124	18	LID - 214,2
España	1.796	43	LID - 15.402,7

* Media geométrica

** LID = Límite inferior de detección = 10 Bq/m³

⁽¹²⁾ Registro procedente de la red de alerta radiológica de Extremadura.

El radón en el agua

• Radón en aguas superficiales

En las aguas superficiales el contenido en radón suele ser bajo debido a dos razones fundamentales: una el corto periodo de desintegración del radón, 3,8 días, y otra la aireación a que se ve sometida el agua que facilita la emisión del radón al aire. La concentración de radón en estas aguas suele ser inferior a 2 Bq/l.

• Radón en aguas subterráneas

Los niveles de radón en las aguas subterráneas son, en general, muy superiores a los que se miden en las aguas superficiales.

En ausencia de fenómenos que den lugar a concentraciones de uranio –y por consiguiente de radio-226 en las rocas– el contenido de radio-226 en las aguas subterráneas es coherente con el contenido en radio-226 en las rocas. Así por ejemplo las rocas con bajo contenido en radio-226, comprendido generalmente entre 5 y 25 Bq/kg, suelen dar lugar a concentraciones

Tabla 2.19. Concentraciones de radón-222 y radio-226 en aguas de diferentes balnearios⁽³³⁾

Balnearios	Concentración de actividad en Bq/l	
	Radón-222	Radio-226
Cantabria		
Alceda	2	0,064
Caldas de Besaya	824	0,840
Lierganes	6	0,020
Puente Viesgo	34	0,510
Aldea de Ebro	5	0,018
Fontibre	2	n.d
La Hermida	840	0,120
Hoznayo	19	0,016
Puente Nansa	4	n.d
Galicia		
Acuña	104	0,006
Arteixo	181	-
Caldas de Molgas	355	0,226
Caldelas de Tuy	112	-
Dávila	29	n.d
La Toja	266	3,66
Extremadura y Salamanca		
Alange	112	-
Baños de Montemayor	13	0,043
El Raposo	6	n.d
Ledesma	35	0,016
Retortillo	147	0,087

³³ *Medidas de radón en viviendas españolas Caracterización de sus fuentes*, página 28. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección otros Documentos. 6.1998.

de radón que están en un rango comprendido entre 5 y 50 Bq/l. Dentro de estas rocas se encuentran algunas areniscas, limos, arcillas, calizas, y rocas intrusivas y volcánicas ultrabásicas.

Rocas con contenido más alto en radio-226, comprendido entre 10 y 60 Bq/kg, suelen dar lugar a concentraciones de radón en las aguas subterráneas que están en un rango comprendido entre 20 y 150 Bq/l.

Para que los niveles de radón en las aguas subterráneas sean altos, superiores a 1.000 Bq/l, es necesario que el agua haya pasado por rocas que presenten altas concentraciones de uranio o que circule a través de fracturas que contengan elevadas concentraciones en radio-226, en estos casos se pueden superar los 10.000 Bq/l y alcanzar incluso valores superiores a 50.000 Bq/l de radón, es decir superar concentraciones 2 a 100 veces mayores que las que pueden encontrarse en la roca encajante.

En la tabla 2.19 se han representado las concentraciones de radón 222 y radio-226 en aguas de diferentes balnearios.

El radón en las aguas subterráneas puede constituir un problema en el caso en que el sumi-

nistro de agua proceda de pozos o sondeos perforados en terrenos con alto contenido en radio. La aireación que se produce durante la ducha o al calentar el agua origina el escape o pérdida de radón que puede ser superior a un 70%.

Quinta subserie. Plomo-210

Se inicia con el plomo-210. A sus descendientes se les ha denominado descendientes de vida larga del radón. Se encuentran en los lugares en que se libera el radón, es decir, en el aire y en el suelo. Se incorporan a las aguas y de aquí a los animales y plantas, de tal forma que la vía de ingestión constituye la vía más importante de incorporación al organismo humano.

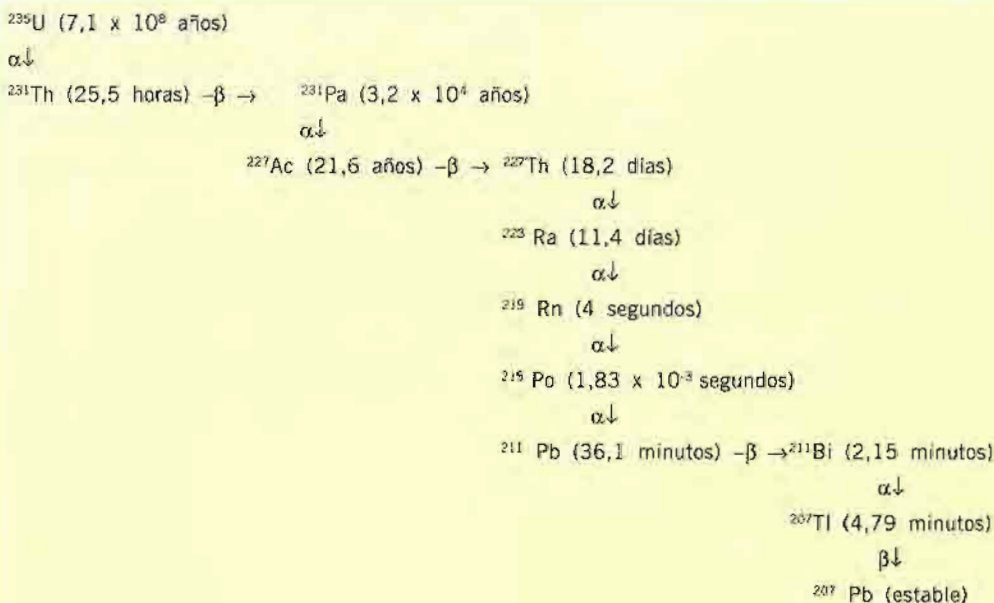
El aporte de esta subserie a la dosis efectiva equivalente anual es de unos 120 μ Sv/año.

La serie de desintegración del uranio-235

Características del uranio-235:

- Período de semidesintegración: $7,1 \times 10^8$ años.
- Actividad específica (elemental): $1,54 \times 10^4$ pCi/g de uranio natural.

Tabla 2.20. La serie de desintegración del uranio 235



El uranio-235, llamado también actinio, supone un 0,72% en peso del uranio natural. La relación de actividades $^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ es menor que 0,05.

En la tabla 2.20 se ha representado esquemáticamente la serie de desintegración del uranio-235.

La serie del uranio-235 no tiene significación desde el punto de vista de la radiación natural, puesto que el contenido de uranio-235 en las rocas sólo supone el 0,72% del uranio natural y por tanto, no se encuentran concentraciones significativas en el medio ambiente.

El radio-223 procede del torio-227 que es un elemento intermedio de la serie de desintegración del uranio-235. Al desintegrarse da lugar a radón-219, que fue conocido con el nombre de actinón. Este es también un emisor α .

El reactor natural de Oklo

En 1956 el físico japonés Paul Kuroda publicó un estudio sobre las condiciones naturales que habrían de presentarse para que pudiera existir un reactor natural, la edad geológica aproximada, las concentraciones de uranio, la relación entre uranio-235/uranio-238 y otros requisitos naturales que deberían satisfacerse, pero no encontró ningún yacimiento de uranio en el que se reunieran dichas condiciones. Escapó a su observación la posibilidad de que el agua pudiera actuar como un moderador y que algunos yacimientos de uranio pudieran ser lo suficientemente porosos para contener suficiente agua para moderar los neutrones y sostener la reacción.

En Oklo, Gabón, hace 2.000 millones de años, se originó un reactor natural cuando había 3.000 átomos de uranio-235 por cada 100.000 de uranio-238 como sucedía en el resto del sistema solar, es decir el uranio-235 se encontraba en una proporción del 3% respecto del uranio natural.

La edad del yacimiento de Oklo fue estimada mediante medidas sobre uraminas con alto contenido en plomo radiogénico que permitieron atribuir al yacimiento una antigüedad de 1.968 más o menos 50 millones de años. En la actualidad se conoce la existencia en la zona de Oklo de varios reactores fósiles.

El reactor se localiza en unas areniscas del francovillense que presentan alternancias de capas de grano fino y grueso, ricas en materia orgánica, que dieron lugar a un yacimiento de 15.000 toneladas de uranio con una ley media del 5% de uranio. Lo más significativo es que en algunas zonas las concentraciones de uranio superaron el 60% y que se comportaron como un reactor natural, hoy fósil, cuyo núcleo es uraninita (óxido de uranio).

Se originó el reactor natural al cumplirse varias condiciones importantes:

- Existir en el momento de su formación una relación uranio-235/uranio-238 alta (3/100).
- Existir una alta concentración de uranio natural (localmente se alcanzan enriquecimientos del 60%).
- Baja concentración de absorbentes de neutrones.
- Alta concentración de un moderador (agua y materia orgánica).
- Alcanzar un tamaño crítico o mínimo para mantener las reacciones de fisión. Entre las causas de la criticidad se incluyen las concentraciones de uranio entre el 20 y 60%, existentes en las mineralizaciones.

El reactor fue crítico hace unos 1.700 millones de años, liberando alguna decena de megavatios y consumiendo algunas toneladas de uranio. El reactor operó durante varios centenares de miles de años a baja potencia.

El reactor de Oklo fue descubierto en 1972 por un químico francés (Bouzigues) que trabajaba en la planta de procesamiento de combustible de Pierrelatte (Francia) y que observó un contenido en uranio-235 inferior a lo normal. Hoy en día el fisiónable uranio-235 se presenta con una abundancia del $(0,7202 \pm 0,00006)\%$ en el uranio natural (720 átomos de ^{235}U por cada 100.000 de uranio natural), proporción que incluso se mantiene en centenares de yacimientos de uranio investigados e incluso en los meteoritos. En Oklo la relación era inferior a 0,7171 lo que le hizo pensar que sucedía algo anormal. Esta disminución del 0,44% se explica porque el uranio-235 dio lugar a reacciones

de fisión y lo que ahora se encuentra es «el combustible gastado» empobrecido en ^{235}U .

Investigaciones posteriores han demostrado que existen cantidades anormalmente altas de productos de fisión en las zonas donde existió el reactor natural. Se observa la presencia de elementos de fisión como neodimio, samario, rutenio-99 y tecnecio-99 identificados en 16 zonas y evidencias de retención de nucleidos ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{135}Cs , ^{137}Cs producidas a partir de ^{90}Zr , ^{99}Ru , ^{135}Ba y ^{137}Ba .

2.4. Torio⁽³⁴⁾

2.4.1. Características

El torio, al igual que el uranio, se encuentra muy disperso en la naturaleza puesto que se localiza en los minerales como sustituciones isomorfas de otros elementos.

El torio presenta una geoquímica más simple que el uranio, debido a que su comportamiento está condicionado por su única valencia +4, su alta carga, radio iónico de 0,99 angström y su ausencia de participación en reacciones de óxido-reducción. El catión torio en solución es un catión pequeño fuertemente cargado, que interacciona en medio acuoso con muchos iones, dando lugar a iones complejos.

El torio presenta diferencias geoquímicas notables respecto del comportamiento del uranio, puesto que este último por su facilidad a oxidarse pasa a ión uranilo exavalente fácilmente movilizable por las aguas a partir de las cuales se concentra.

El torio, al contrario que el uranio, no se oxida fácilmente y su comportamiento es comparativamente similar al que tendría el uranio si sólo se considerara su ión tetravalente. Esto hace que acompañe al uranio cuando se trata de concentraciones de

uranio 4, entonces forma torianita (óxido de torio), torita (silicato de uranio y torio), torogumita (óxido de torio y uranio), que son minerales fundamentalmente de torio. Otras veces forma concentraciones que también pueden llevar uranio, como sucede en la monazita, (fosfato de torio, cerio, lantano, neodimio, itrio, etc.). La monacita tiene densidad muy alta, por lo que se encuentra asociado a placeres, depósitos arenosos que también presentan rutilo, ilmenita, zircón, xenotima, columbita, etc.

En la tabla 2.21 se ha representado la abundancia de torio en los minerales más frecuentes en las rocas plutónicas.

Tabla 2.21. Abundancia del torio en los minerales

Mineral	ppm	Rango
Cuarzo		0,5-10
Feldespatos (incluidas plagioclasas)		0,5-10
Biotita		0,5-50
Hornblenda		5,0-50
Piroxenos	0,02	0,1-50
Allanita	9.100	1.000-20.000
Apatito	70	50-250
Epidota	200	50-500
Estena	510	100-1.000
Monacita		20.000-200.000
Zircón	560	100-10.000

Si las condiciones externas no son oxidantes, el comportamiento geoquímico del torio y del uranio son similares. En las aguas superficiales y subterráneas el torio se disuelve como $\text{Th}(\text{OH})_4$, pero la escasa solubilidad de este compuesto, hace que apenas emigre del lugar donde se originó. Su producto de solubilidad es de 10^{-35} .

En la naturaleza, el torio y el uranio se encuentran según una relación promedio Th/U de 3/1 (entre 2/1 y 4/1), que domina en las rocas graníticas, sedimentarias y metamórficas derivadas. La relación Th/U varía en general según las condiciones de movilización del uranio. Así, si el uranio ha sido movilizado la relación Th/U será alta como consecuencia de la pérdida de uranio, lo que sucede por ejemplo: en algunas

³⁴ Todos los datos referentes al contenido de potasio en minerales, aguas y rocas que figuran en tablas sin referencia específica han sido extraídos de *Handbook of Geochemistry*, Springer-Verlag-Heidelberg-New York, 1969.

arcillas residuales. La relación es mínima (aproximadamente=1) debido a la escasa proporción de torio, en ciertas rocas sedimentarias y de deposición química, tanto marinas como continentales, como sucede por ejemplo con las sales y los carbonatos.

Los valores más altos de la relación Th/U, 4 o superior, se encuentran en las rocas ígneas básicas y ultrabásicas. Esto es debido fundamentalmente a su bajo contenido en uranio, en general inferior a 1 ppm y no a incrementos en el contenido en torio. Los valores bajos de la relación, 2 o inferior, se localizan en rocas de precipitados (calizas y dolomías), en evaporitas (anhidrita, yeso, halita, etc.) o en rocas detríticas y metamórficas derivadas de ellas. En estos casos el contenido en torio es muy bajo, en general inferior a 1 ppm.

En la tabla 2.12 se han representado los contenidos medios de torio, uranio y el valor de la relación Th/U en las rocas más frecuentes.

2.4.2. Isótopos del torio

En la naturaleza se encuentran dos isótopos de vida larga del torio que son: torio-232 y torio-230 y cuatro isótopos de vida corta, que son: torio-234, torio-231, torio-228 y torio-227.

De ellos, el más importante es el torio-232 que tiene un periodo de semidesintegración de 13.900 millones de años.

lones de años (tres veces mayor que el del uranio-238) y es el cabeza de una serie de desintegración que termina en el plomo-208.

El torio-230, que tiene un periodo de semidesintegración de 75.400 años, es un producto intermedio en la serie de desintegración del uranio-238, por lo que está generalmente presente en los minerales que contienen uranio.

En la tabla 2.22 se muestran las características de los isótopos naturales del torio.

Características del torio-232

- Número atómico: 90
- Peso atómico: 232,04
- El espectro gamma del torio natural presenta un pico característico en 2.615 MeV que corresponde al talio-208, pico que se utiliza en medidas ambientales para determinar el torio equivalente expresado generalmente en partes por millón (ppm).
- Actividad específica del torio-232: 1.11×10^5 pCi/g de torio.
- Actividad de 1 ppm de torio natural⁽³³⁾ equivalente a 4 Bq/kg.

La serie de desintegración del torio-232 está representada en la tabla 2.23. Habitualmente se distinguen tres subseries.

Tabla 2.22. Isótopos naturales del torio

Isótopo	Masa	Período de semidesintegración	Modo de desintegración	Serie de desintegración
Torio-234	234,04	24,1 días	β y $\gamma \rightarrow$ radio-234	Uranio-238
Torio-232	232,04	13.900 millones de años ($1,39 \cdot 10^{10}$ años)	α y $\gamma \rightarrow$ radio-228	Torio-232
Torio-231	231,04	1,06 días	β y $\gamma \rightarrow$ paladio-231	Uranio-235
Torio-230	230,03	75.400 años	α y $\gamma \rightarrow$ radio-226	Uranio-238
Torio-228	228,03	1,913 años	α y $\gamma \rightarrow$ radio-224	Torio-232
Torio-227	227,03	18,7 días	α y $\gamma \rightarrow$ radio-223	Uranio-235

³³ Radiation Protection Dosimetry, Vol. 24. Nuclear Technology Publishing, Radiological Characteristics of a village on Uraniferous Granitic Ground in Finland, 1988.

Tabla 2.23. Serie de desintegración del torio 232

Primera subserie: torio-232	
^{232}Th (1,41 · 10 ¹⁰ años)	
$\alpha, \gamma \downarrow$	
Segunda subserie: radio-228	
^{228}Ra (5,75 años) $-\beta, \gamma \rightarrow$	^{228}Ac (6,13 horas) $-\beta, \gamma \rightarrow$
	^{228}Th (1,91 años)
	$\alpha, \gamma \downarrow$
	^{224}Ra (3,66 días)
	$\alpha, \gamma \downarrow$
Tercera subserie: radón-220	
	^{220}Rn (55,6 segundos, Torón)
	$\alpha, \gamma \downarrow$
	^{216}Po (0,15 segundos)
	$\alpha, \gamma \downarrow$
	^{212}Pb (10,6 horas) $-\beta, \gamma \rightarrow$
	^{212}Bi (60,6 min.) $-\beta, \gamma \rightarrow$
	^{212}Po (3,05 10 ⁻⁷ seg)
	$\alpha \downarrow$
	^{208}Tl (3,07 min) $-\beta, \gamma \rightarrow$
	^{208}Pb (estable)

Primera subserie. Torio-232

Tiene poca significación desde el punto de vista dosimétrico, unos 3 $\mu\text{Sv/año}$ en zonas de fondo calificable de normal, lo que supone un 0,12% de la dosis total.

Segunda subserie. Radio-228 a radio-224

En esta subserie los elementos más significativos son el radio-228 y el radio-224. La correspondiente dosis equivalente efectiva anual es de 13 $\mu\text{Sv/año}$ en zonas de fondo normal.

El *radio-228* es de periodo de semidesintegración relativamente largo. Es emisor β y γ y está presente en los minerales que contienen torio, también se encuentra en mineralizaciones de uranio tetravalente, puesto que, según se indicó anteriormente, ambos elementos tienen comportamientos geoquímicos similares si las condiciones no son oxidantes, así se encuentra asociado con el uranio en rocas o suelos que presenten monacita, rutilo, ilmenita, zircón, allanita, etc.

El *radio-224* es uno de los isótopos del radio de corto periodo de semidesintegración. Procede del torio-228 (1,96 años). El radio-224 al desintegrarse da lugar al radón-220, denominado torón, por proceder de la serie de desintegración del torio. Es emisor α y γ .

Tercera subserie. Radón-220 a talio-208

El *radón-220* (torón) descendiente del radio-224, es el más abundante de los tres isótopos del radón. Su poder de emanación es unas 100 veces superior al radón-222, pero desaparece rápidamente de la atmósfera, debido a su corto periodo de semidesintegración (55,6 segundos). Es emisor α y γ . En su desintegración da lugar a polonio-216.

La correspondiente dosis equivalente efectiva anual, es para esta subserie de 160 $\mu\text{Sv/año}$, en zonas de fondo normal. En conjunto, la serie del torio-232 contribuye⁽³⁶⁾ como fuente de radiación externa, en áreas de fondo normal con un 6,56% de la radiación total, lo que supone unos 0,16 mSv/año. Como fuente de radiación interna contribuye con un 7,39% de la radiación total, lo que supone unos 0,18 mSv/año. En total, la dosis externa e interna recibida de la serie del torio-232 supone el 13,95% (0,34 mSv/año) del total recibido por otras fuentes.

Los contenidos de torio en las aguas marinas y continentales presentan valores generalmente inferiores a 0,05 ppb.

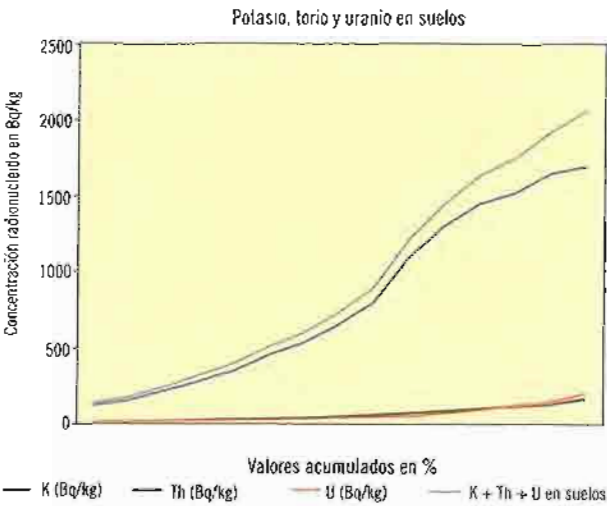
³⁶ UNSCEAR, 1998

2.5. Correlaciones entre los contenidos de uranio, torio y potasio

En general, en las rocas existe una correlación positiva³⁷⁾ entre los contenidos de uranio, torio y potasio, de tal forma que cuando aumenta el contenido de uno de ellos también aumenta el de los otros dos como se aprecia en la figura 2.5.

La principal causa de esta correlación positiva estriba en que los tres elementos son oxífilos y de radio iónico similar. Además, siguen una evolución paralela en las etapas de diferenciación geológica, concentrándose al aumentar el contenido en sílice en las rocas ígneas. Así pues, se alcanzan contenidos elevados en rocas metamórficas con alto grado de metamorfismo, en rocas metamórficas derivadas de rocas calizas, en arcillas y pizarras negras, en rocas fosfatadas y en areniscas con materia orgánica. Los valores mínimos se encuentran en las calizas, en las areniscas de composición no arcósica y en las rocas ígneas básicas. Además, tanto uranio como torio y potasio contribuyen a la producción de calor en la

Figura 2.5. Concentraciones de radionúclidos (Bq/kg) en suelos españoles



tierra. La tabla 2.24 muestra la distribución de uranio, torio y potasio en la corteza y manto terrestres así como la producción total de calor. La cantidad de calor generado por los elementos radiactivos

Tabla 2.24. Distribución de los elementos radiactivos (ppm) en la tierra y su producción³⁸⁾ de calor

	Potasio	Uranio	Torio	Th/U	K/U	Producción de calor	
						W·kg ⁻¹	W3·m ⁻³
Condritas carbonatadas	545	0,0074	0,029	3,92	73.649	1,54·10 ⁻¹²	4·10 ⁻⁵
Manto primitivo	250	0,021	0,085	4,05	11.905	4,37·10 ⁻¹²	1,14·10 ⁻⁵
Silicatos	240	0,023	0,0795	3,46	10.435	4,42·10 ⁻¹²	1,15·10 ⁻⁵
Corteza continental							
Superior	27.500	2,5	10,5	4,20	11.000	5,30·10 ⁻¹⁰	1,38·10 ⁻³
Media (arcaico)	17.500	2,2	8,4	3,82	7.954	4,44·10 ⁻¹⁰	1,15·10 ⁻³
Inferior (arcaico)	8.333	0,05	0,42	8,40	166.660	1,67·10 ⁻¹¹	4,33·10 ⁻⁵
Inferior y media (postarcaico)	20.000	1,25	6	4,80	16.000	2,86·10 ⁻¹⁰	7,43·10 ⁻³
Promedio (1)	17.500	1,3	5,7	4,38	13.461	2,82·10 ⁻¹⁰	7,34·10 ⁻³
Promedio (2)	12.500	1,25	4,8	3,84	10.000	2,53·10 ⁻¹⁰	6,58·10 ⁻³
Corteza oceánica							
Normal cordilleras basálticas centrales	600	0,047	0,12	2,55	12.766	7,88·10 ⁻¹²	2,05·10 ⁻⁵
Islas oceánicas basálticas	12.000	1,02	4	3,92	11.765	2,09·10 ⁻¹⁰	5,43·10 ⁻³

³⁷⁾ Ver tablas 2.12, 2.24 y 2.26 a 2.28.

³⁸⁾ Uranium: Mineralogy Geochemistry and the Environment. Review of Mineralogy nº 38. Mineralogical Society of America. 1999.

naturales más los productos en equilibrio reales de la serie de desintegración del uranio y torio es:

Potasio: $2,7 \times 10^{-5}$ cal./g/año

Torio: 0,2 cal./g/año

Uranio: 0,73 cal./g/año

En cuanto a la contribución a la tasa de exposición de cada uno de estos tres elementos, una concentración del 1% de potasio produce una tasa de exposición de 1,505 μ R/h, mientras que 1 ppm de torio da lugar a 0,310 μ R/h, y por último 1 ppm de uranio a 0,625 μ R/h. Es decir:

Tabla 2.25 Actividad del potasio, uranio y torio natural⁽³⁹⁾

Elemento	Actividad
1% de potasio	10 Bq/kg
1 ppm uranio natural	12,3 Bq/kg
1 ppm torio natural	4 Bq/kg

Tasa de exposición (μ R/h) = $1,505 \times \%$ de potasio + $0,310 \times$ ppm torio + $0,625 \times$ ppm uranio⁽³⁸⁾.

En la tabla 2.25 se han presentado las actividades del potasio, uranio y torio natural.

En la tabla 2.26 se han presentado los contenidos medios y la tasa de exposición debida al potasio, torio y uranio en las rocas ígneas y sedimentarias.

En la tabla 2.27 se presentan, por comunidad autónoma y en la totalidad del país, las concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 en suelos españoles.

En la tabla 2.28 se representan las concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 determinadas en diferentes materiales de construcción en España.

En la tabla 2.29 se han representado las concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 en diferentes cementos españoles.

Tabla 2.26. Tasa de exposición debida a rocas ígneas y sedimentarias⁽⁴⁰⁾

Rocas	Potasio		Torio		Uranio		Tasa de exposición
	%	μ R/h	%	μ R/h	%	μ R/h	Total μ R/h
Basálticas							
valor medio	0,8	1,2	4,0	1,2	1,0	0,6	3,0
rango	0,2-2,0	0,3-3,0	0,5-10	0,1-3,0	0,2-4	0,0-2,4	0,5-8,5
Graníticas							
valor medio	3,0	4,5	12	3,6	3,0	1,9	10,0
rango	2,0-6,0	3-9	1,0-25	0,3-7,7	1,0-7,0	0,6-4,5	4,0-21
Arcillosas							
valor medio	2,7	4,1	12,0	3,6	3,7	2,3	10,0
rango	1,6-4,2	2,5-6,4	8,0-18,0	2,4-5,4	1,5-5,5	1-3,5	6-15
Areniscas							
valor medio	1,1	1,7	1,7	0,5	0,5	0,3	2,5
rango	0,7-3,8	1-5,8	0,7-2	0,2-0,6	0,2-0,6	0,1-0,3	1,0-7,0
Carbonatadas							
valor medio	0,3	0,4	1,7	0,5	2,2	1,3	2,2
rango	0,0-2,0	0,0-3,0	0,1-7	0,0-2,1	0,1-9,0	0-5,5	0-10

ppm=partes por millón, mR/h = microrentgen/ hora.

³⁹ Radiation Protection Dosimetry. Vol. 24. Nuclear Technology Publishing. Radiological Characteristics of a village on uraniferous granitic ground in Finland. 1988.

⁴⁰ Adaptado de Adams J.A.S. y Colbs, Physics and Chemistry of the Earth, Pergamon Press.

Tabla 2.27. Concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 en suelos⁽⁴¹⁾

Comunidad autónoma	Nº de medidas	Radio-226 (Bq/kg)		Torio-232 (Bq/kg)		Potasio-40 (Bq/kg)	
		Valor medio	Rango	Valor medio	Rango	Valor medio	Rango
Andalucía	126	29	8-82	30	5-79	426	46-1.660
Aragón	44	35,8	48-72	34,7	16-77	485	141-1.120
Asturias	17	43,7	20-167	44,5	21-81	410	64-800
Baleares (Mallorca)	11	34,5	23-70	31,2	10-58	367	153-600
Canarias (Tenerife)	30	51,2	21-136	64,7	32-169	832	270-1.990
Cantabria	94	44,3	10-141	45,8	8-87	565	107-1.560
Castilla-La Mancha	119	29,4	9-65	42,4	9-108	526	93-1.390
Castilla y León	144	38,8	9-300	41,4	8-128	674	87-1.710
Cataluña	45	39,5	13-138	38,4	7-96	598	33-1.200
Extremadura	73	49,5	11-240	56,8	9-258	712	118-1.840
Galicia	71	93,9	18-310	68,4	10-215	999	280-2.040
Madrid (Guadarrama)	37	48,6	12-158	57,7	7-139	1.113	113-1.720
Murcia	16	31,5	18-63	24,6	11-45	424	240-700
Navarra	15	33,5	19-80	28,6	16-39	410	230-670
La Rioja	12	42,2	16-69	50,4	27-85	653	360-1.060
País Vasco	45	45,1	9-93	46,5	8-92	516	31-1.380
Comunidad Valenciana	32	28,1	8-61	29,4	10-66	382	78-910
España	952	38,9	8-310	41	5-258	578	31-2.040

Tabla 2.28. Concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 en materiales de construcción⁽⁴²⁾

Tipo de material	Número de muestras	Concentración de actividad (Bq/kg)		
		Radio-226	Torio-232	Potasio-40
Arena de playa	6	5,9	3,7	55,5
Arena I	4	30,3	27,7	30,7
Arena II	7	7	2,9	11,5
Ladrillo I	3	55,1	43,6	747,4
Ladrillo II	8	73,2	59,9	292,3
Cemento I	3	25,1	19,6	59,2
Cemento II	7	421,8	266,4	599,4
Cemento III	5	94,7	66,6	44,1
Cemento IV	4	23,3	18,5	85,1
Cemento V	5	51,8	40,7	403,3
Cemento VI	6	35,5	29,6	203,5
Cemento VII	7	53,6	37,7	274,9
Yeso I	3	9,6	4,4	55,5
Yeso II	5	35,9	26,3	155,4
Yeso III	7	50,7	34,0	166,5
Yeso IV	5	11,1	7,4	70,3
Estuco	4	8,1	4,8	74
Hormigón	24	29,9	31,8	203,5
Suelo	12	14,8	11,8	214,6

⁴¹ *Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes*, página 22. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección otros documentos 6.1998.

⁴² *Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes*, página 23. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección otros documentos 6.1998.

2.6. Variaciones en la radiactividad natural terrestre

La tasa de exposición a la radiación gamma natural puede variar de acuerdo con la presencia o ausencia de factores que atenúan o incrementan el nivel de radiación gamma. Entre los primeros, los más importantes son la humedad del suelo y la presencia de nieve. Entre los segundos, el más importante corresponde a las variaciones del contenido de gas radón en el aire.

En cuanto a la *humedad del suelo* puede estimarse, para la radiación procedente del torio y del potasio, que el aumento de dicha humedad en un 30% produce una disminución del nivel de radiación gamma de un 30%. En el caso del uranio, que

como promedio contribuye solamente con un 10 a 20% del nivel de radiación total, el problema es más complejo por la influencia del radón presente en el suelo y sus condiciones de liberación al aire.

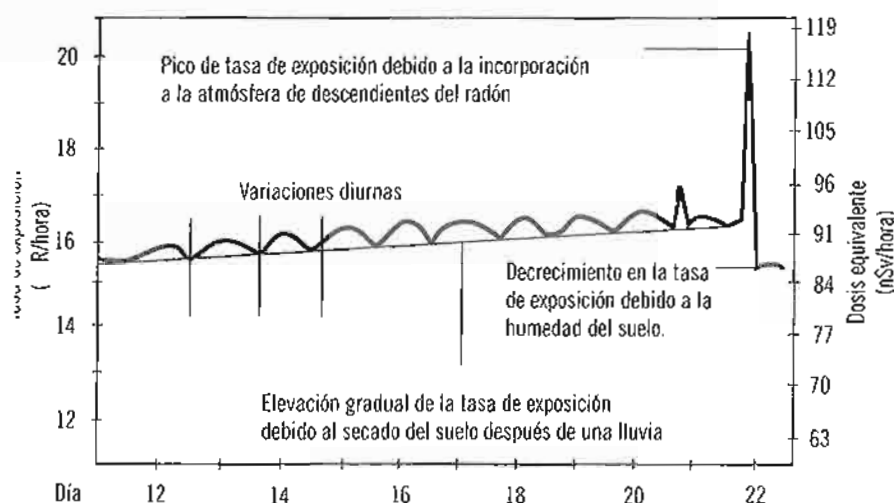
La *nieve* actúa siempre como una pantalla que atenúa la radiación emitida por el suelo. Sin embargo esa atenuación no es proporcional al espesor de la nieve, sino a la densidad de la misma, es decir a su contenido en agua. A efectos prácticos, en un granito con una cubierta de nieve equivalente a un espesor de 8 cm de agua, el nivel de radiación gamma se reduce en un 50%. Sin embargo, es necesario un espesor de 50 cm de nieve ligera o poco densa para reducir en un 50% el nivel de radiación. Este mismo efecto se alcanza con sólo 15 cm de nieve densa.

Tabla 2.29. Concentraciones de radio-226, torio-232 y potasio-40 en cementos españoles⁽⁴⁹⁾

Tipo de material	Número de muestras	Concentración de actividad (Bq/kg)		
		Radio-226	Torio-232	Potasio-40
Alicante	1	32	31	315
Alicante	8	30,7	22,9	244,6
Almería	3	72,7	45,3	287
Asturias	5	60,2	30,2	408,3
Barcelona	18	46,3	36,7	273
Cantabria	5	56,4	30,2	377,8
Córdoba	1	74	19	341
Guipúzcoa	6	55,7	30,8	315,3
Huelva	3	27,6	26,6	233,6
Huesca	3	92,3	40,7	330
Jaén	5	43,8	35,2	381
León	3	93	41,6	509
Lugo	2	28,5	45	438,5
Málaga	6	55,7	47,3	357
Mallorca	1	29	43	302
Madrid	9	38,6	25,7	330,1
Murcia	8	57,4	34,8	304,5
Navarra	6	42,6	31	350,2
Sevilla	2	23,5	15,5	169,5
Tarragona	4	33	14,7	290
Toledo	8	42,5	30,5	337,8
Valencia	11	31,7	22,8	284,8
Vizcaya	10	54,3	39,6	271,5
Zaragoza	4	74,5	32,5	387

⁴⁹ *Medidas de radón en viviendas españolas. Caracterización de sus fuentes*, página 24. Consejo de Seguridad Nuclear. Colección otros documentos 6.1998.

Figura 2.6. Típicas variaciones observadas a corto plazo en la tasa de exposición.



Nota: La conversión de la tasa de exposición a dosis se ha realizado usando $1R=0,087$ Gy. Para radiación ambiental la conversión de dosis absorbida en el aire a dosis efectiva al cuerpo es $Gy=0,7$ Sv.

El contenido de *radón* en el aire es uno de los factores, que unido al contenido de *torón*, pueden incrementar el nivel de radiación ambiental. En la figura 2.6 se muestra una representación gráfica de las variaciones típicas que a corto plazo experimenta la tasa de exposición⁽⁴⁴⁾. En ella se observan las variaciones diurnas, las variaciones graduales de la tasa de exposición debidas al se-

cado del suelo después de una lluvia y el aumento del contenido de radioisótopos procedentes del radón, inmediatamente después de una lluvia. La tabla 2.30 ilustra los rangos típicos de variación de las dosis equivalente efectiva anual, recibidas por el ser humano como consecuencia de su vida en entornos con diferentes niveles de radiación natural.

Tabla 2.30. Estimación de la dosis equivalente efectiva anual y rangos excluyendo⁽⁴⁵⁾ valores extremos

Fuente de radiación	Dosis equivalente efectiva anual en $\mu Sv/año$	
	Media	Rango típico
<i>Externa</i>		
Radiación cósmica	360	300 a 2.000
Fuentes terrestres	410	200 a 1.000
<i>Interna</i>		
Potasio-40	180	100 a 200
Uranio-238 a radio-226	20	10 a 50
Radón-222 a polonio-214	1.100	300 a 5.000
Plomo-210 a polonio-210	120	50 a 200
Torio-232 a radio-224	20	10 a 50
Radón-220 a talio-208	160	50 a 500
Total (redondeado)	2.400	1.500 a 8.000

⁴⁴ NUREG-1501. USNRC. 1994.

⁴⁵ UNSCEAR, Report 1993.

En este capítulo tercero se realizan una serie de consideraciones dosimétricas generales para poder comprender mejor las medidas de radiación natural ambiental que se realizan en el proyecto Marna.

1. Unidades de medida más frecuentes

Un elemento o material radiactivo contiene átomos que son inestables y dan lugar a desintegraciones, emitiendo partículas o energía electromagnética que constituyen la radiación ionizante.

Actividad. Becquerelio y curio. La actividad de un material o fuente radiactiva es el número de desintegraciones que se producen por unidad de tiempo. Se mide en *becquerelios*, unidad que corresponde a una desintegración por segundo. Hasta hace poco tiempo se utilizó una unidad treinta y siete mil millones de veces superior, el *curio*, que correspondía aproximadamente a la actividad de un gramo de radio. La fuente radiactiva que constituye el cuerpo humano tiene una actividad de unos 12.000 Bq⁽⁴⁶⁾, calculada para un adulto de 70 kg de peso, es decir se producen 12.000 desintegraciones cada segundo en nuestro cuerpo.

Cuando se utiliza el término concentración de actividad o de actividad específica, éste se expresa como bequerelios por gramo, por litro, por metro cúbico, etc, anteponiendo si ha lugar los prefijos mili (milésima), micro (millonésima) etc. En la tabla 3.31 se indican los prefijos utilizados y su símbolo.

Tabla 3.31. Prefijos utilizados

Factor	Prefijo	Símbolo	Factor	Prefijo	Símbolo
10 ¹⁸	exa	E	10 ⁻¹	deci	d
10 ¹⁵	peta	P	10 ⁻²	centi	c
10 ¹²	tera	T	10 ⁻³	mili	m
10 ⁹	giga	G	10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁶	mega	M	10 ⁻⁹	nano	n
1.000	kilo	k	10 ⁻¹²	pico	p
100	hecto	h	10 ⁻¹⁵	femto	f
10	deca	da	10 ⁻¹⁸	atto	a

Efectos de la energía emitida. Ionización y exposición: culombio/kilogramo y roentgen. Una de las consecuencias de las emisiones radiactivas es que éstas interaccionan con la materia causando ionizaciones, es decir se crean iones que son químicamente activos. Este hecho puede medirse y además pueden estimarse sus efectos sobre la materia o sobre los seres vivos. Si esa ionización se produjera en las células de nuestro cuerpo, podrían llegar a producirse daños dependiendo de la intensidad de la radiación.

Para medir el fenómeno de la ionización se utiliza una unidad que no tiene nombre propio, el *culombio/kilogramo*. El C/kg representa la carga total de iones de cualquier signo producidos por unidad de masa de aire al ser éste irradiado por rayos X o radiación gamma. Hoy en día se sigue utilizando habitualmente en medidas ambientales la antigua unidad, el roentgen, que es una medida de la exposición a la radiación X o gamma exclusivamente en el aire. El *roentgen* (R) se define como la cantidad de radiación X o gamma que produce una unidad electrostática de carga de cualquier signo en un mililitro de aire seco a presión y temperatura estándar. Originalmente el roentgen fue definido como la cantidad de radiación requerida para matar un ratón.

$$1 \text{ R} = 2,58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}^{-1}, \text{ o equivalentemente, } 1 \text{ C/kg} = 3.876 \text{ R}$$

Tasa de exposición. Microroentgen/hora. En las medidas ambientales, referidas exclusivamente al aire y concretamente en exploración de minerales radiactivos, se utilizó y se sigue utilizando la tasa de exposición por hora, concretamente el micro y el miliroentgen por hora, μR/h y mR/h.

Dosis de radiación. Tiene varias definiciones, pero las más usadas en relación con las medidas ambientales son: dosis absorbida, dosis equivalente y dosis equivalente efectiva.

Energía absorbida. Dosis absorbida. Rad y gray. La energía emitida por una fuente radiactiva es absorbida en parte por los materiales que la rodean, por lo que un sujeto o un material expuesto no absorbe

⁽⁴⁶⁾ Revue General Nucleaire, número especial. Mayo-junio, pág. 13, 1994.

más que una fracción de la energía de la radiación inicialmente emitida por la fuente radiactiva. En 1956 se definió una nueva magnitud para tener en cuenta este hecho y que es aplicable a cualquier tipo de radiación ionizante, la dosis absorbida, que cuantifica un fenómeno puramente físico como es la cantidad de energía suministrada por la radiación ionizante a la unidad de material absorbente irradiado, el cual puede ser: aire, agua, tejidos biológicos o cualquier otro tipo de material. Así pues, se denomina dosis absorbida al cociente d_e/d_m , donde d_e es la energía media cedida por la radiación a la materia en un elemento de un volumen y d_m la masa de la materia en dicho volumen.

A la unidad inicialmente adoptada para medir las dosis absorbidas se denominó rad (acrónimo de Radiation Absorbed Dose), que corresponde a 100 ergios de energía absorbida por gramo de materia irradiada. Actualmente, a la unidad utilizada dentro del Sistema Internacional se le denomina gray (Gy), que corresponde al depósito de 1 julio por kilogramo de material expuesto. Consecuentemente, esta nueva unidad de dosis absorbida es 100 veces mayor que el rad, es decir:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g} = 0,01 \text{ J/kg} = 0,01 \text{ Gy}$$

La tasa de dosis absorbida es la dosis absorbida por unidad de tiempo en el material absorbente considerado. En las medidas de radiación ambiental se utilizó el $\mu\text{rad/h}$, que corresponde a la tasa de dosis absorbida por hora en el aire. Hoy día se emplea más frecuentemente el gray /hora (Gy/h).

Dosis equivalente. Rem y sievert. La dosis absorbida originada por distintos tipos de radiación puede dar lugar a diferentes daños biológicos. El concepto de dosis equivalente tiene en cuenta dichos daños biológicos. Así pues, la dosis equivalente es la dosis absorbida corregida por el daño que producen los diferentes tipos de radiaciones. La dosis equivalente es pues una medida del efecto que la radiación ionizante produce sobre el organismo; es decir del daño biológico que causa.

De forma general, la dosis equivalente se cuantifica como el producto de la dosis absorbida (D), por el factor de calidad de la radiación ionizante

(Q) y por el producto de los demás factores modificantes (N) que tienen en cuenta entre otros aspectos, las características de la radiación y la distribución de los radionucleídos. Normalmente se considera que $N=1$.

La dosis equivalente expresada en sievert o rem es respectivamente el producto de las dosis absorbidas en grays o en rads por un factor de calidad que depende de la eficacia biológica relativa, RBE (Relative Biological Effectiveness) de la radiación considerada.

Actualmente, en el Sistema Internacional, se utiliza como unidad de dosis equivalente el sievert que corresponde a 1J/kg. Un sievert equivale a 100 rem.

Dosis equivalente en sievert = dosis absorbida en grays x factor de calidad

Dosis equivalente en rem = dosis absorbida en rads x factor de calidad.

El factor de calidad es 1 para la radiación beta y gamma, entre 5 y 10 para la radiación neutrónica y 20 para la radiación alfa. En la tabla 3.32⁽⁴⁷⁾ se presentan los factores de calidad correspondientes a diversos tipos de radiación y rangos energéticos.

La antigua unidad que mide este efecto se denominó rem, que responde a las iniciales de Roentgen Equivalent Man.

Tabla 3.32. Factores de calidad correspondientes a diversos tipos de radiación

Tipo de radiación ionizante	Rango de energía	Factor de calidad
Fotones	Todas energías	1
Electrones y muones	Todas energías	1
Neutrones:	Energías:	
	< 10 keV	5
	De 10 keV a 100 keV	10
	De > 100 keV a 2 MeV	20
	De > 2 MeV a 20 MeV	10
Protones	Energía > 2 MeV	5
Partículas alfa	Todas energías	20
Fragmentos de fisión	Todas energías	20
Núcleos pesados	Todas energías	20

⁽⁴⁷⁾ ICRP 60, 1990

El rem mide el daño biológico que puede causar un rad en el cuerpo humano. De forma más intuitiva, es la dosis procedente de cualquier tipo de radiación que produce los mismos efectos biológicos en las personas que un rad de rayos X o de radiación gamma.

Para los rayos X y para la radiación gamma, un roentgen de exposición equivale a un rad de energía absorbida, que equivale a un rem de daño biológico al ser humano.

Cuando se utiliza solamente la palabra dosis se trata generalmente de dosis equivalente.

Dosis efectiva. Si la exposición a la radiación de uno o varios tejidos no es uniforme, como sucede por ejemplo cuando un radionucleido se deposita en un órgano, se utiliza el concepto de dosis efectiva. La dosis efectiva es la dosis al cuerpo entero que ocasiona la misma dosis que recibe un órgano determinado.

Un ejemplo aclarará este concepto. Una persona recibe una dosis equivalente a D_t mSv en la glándula tiroides. La dosis efectiva, E , sería la dosis al cuerpo entero que produciría la misma dosis en el tiroides, donde F_c es igual al factor de calidad del tejido:

$$E = F_c \times D_t$$

Así pues, la dosis efectiva es la dosis equivalente ponderada en términos de susceptibilidad de causar daño a los diferentes tejidos o al cuerpo entero. El factor de conversión para pasar de dosis equivalente debida a radiación gamma isotrópica a dosis efectiva es de 0,7

Existen factores específicos para cada uno de los tejidos que pueden ser afectados por las radiaciones ionizantes.

2. Equivalencia entre unidades

En la tabla 3.33 se presenta un esquema que relaciona las diferentes unidades de medida de la radiación.

A continuación, en la tabla 3.34, se presentan las equivalencias entre las diferentes unidades utilizadas. No obstante debe advertirse que las equivalencias han de

Tabla 3.33. Esquema ilustrativo de los diferentes tipos de unidades de medida de radiación

Unidades	Emisión de radiación		Recepción de radiación	
	Actividad	Energía	Energía absorbida	Efectos biológicos
Antigua	Curio	Roentgen	Rad	Rem
Moderna	Becquerelio	Culombio/kg	Gray	Sievert

Tabla 3.34. Equivalencia entre diferentes unidades⁽⁴⁸⁾ empleadas para medir radiación ambiental

Elemento	Tasa de exposición	Tasa de dosis absorbida en aire				Actividad	Actividad
	$\mu R/h$	$\mu rad/h$	pGy/s	nGy/h	$\mu Gy/h$	Bq/kg	pCi/g
1 % de potasio	1,505	1,3	3,633	13,07	0,01310	310	8,37
1 ppm eq uranio	0,653	0,54	1,576	5,67	0,00543	12,3	0,332
1 ppm eq torio	0,287	0,26	0,693	2,49	0,00269	4,0	0,108

1 curio = $3,7 \times 10^{10}$ bequerelios
1 roentgen = $2,58 \times 10^4$ culombios/kg
1 rad = 0,01 gray
1 rem = 0,01 sievert
1 roentgen = 0,0087 gray⁽⁴⁹⁾
1 pGy/s = $2,21 \times 10^{-2}$ mSv/año
1 Bq/kg = 0,027 pCi/g

1 becquerelio = $2,7 \times 10^{-11}$ curios
1 culombio/kg = 3,876 roentgen
1 gray = 100 rad
1 sievert = 100 rem
1 gray = 0,7 sievert
1 pCi/g = 37 Bq/kg
1 $\mu R/h$ = 0,01 $\mu Sv/h$ ⁽⁵⁰⁾

⁴⁸ IAEA.-TECDOC-566. The use of gamma ray data to define the natural radiation environment. Vienna 1990.

⁴⁹ NUREG -1501 USNRC, 1994. Indica que para radiación ambiental, la conversión de exposición a dosis absorbida en aire es

1 R = 0,0087 Gy, mientras que la conversión de dosis absorbida en aire a dosis efectiva en el cuerpo humano es 1Gy = 0,7 Sv.

⁵⁰ Esta equivalencia de «dosis equivalente ambiental» está incluida en: Clasensjö B., Akerblom G. *Radon Book*, pág. 15. Swedish Council for Building Research. 1989.

emplearse según condiciones específicas de utilización, que no entran en el alcance de esta publicación.

3. Fuentes naturales que más influyen en la dosis al ser humano

La tabla 3.35 proporciona información comparada de los valores mundiales medios de las dosis recibidas por el ser humano debidas a fuentes de radiación naturales.

Esta tabla corresponde a valores medios mundiales. Los datos se han descompuesto en una serie de diagramas circulares, figuras 3.7 a 3.12, con el fin de presentar de una forma más intuitiva la contribución de los diferentes tipos de radiación a la dosis equivalente efectiva anual recibida por el ser humano.

3.1. Radiación cósmica y radiación terrestre. Contribución relativa

La figura 3.7 informa sobre la contribución relativa de la radiación terrestre y la cósmica a la dosis recibida por el ser humano.

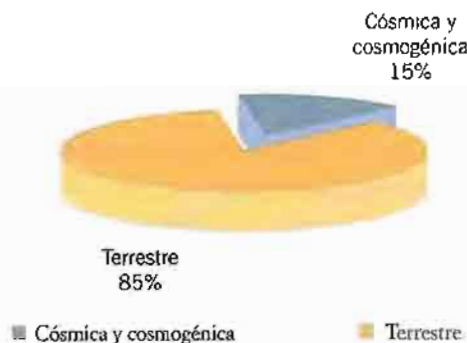
En zonas de fondo medio mundial, la radiación cósmica y cosmogénica da lugar a una dosis total de 0,355 mSv/año, mientras que la procedente de la radiación terrestre es de 2,045 mSv/año. Como puede apreciarse la radiación terrestre contribuye a la dosis total en un 85%, ello es debido a que los radionucleidos naturales actúan tanto como fuentes externas como internas, mientras que la radiación cósmica actúa fundamentalmente como fuente externa. El carbono-14, que es un radionucleido cosmogénico, actúa como fuente interna, ya que es inhalado e ingerido.

Tabla 3.35. Estimación de la dosis efectiva equivalente anual procedente de fuentes de radiación natural en áreas de fondo «calificable de normal»⁽⁵¹⁾.

Dosis efectiva equivalente anual (milisievert)				
Fuente	Irradiación externa	Irradiación interna	Total (mSv/a)	% del total
Radiación cósmica				
Componente ionizante	0,30	-	0,30	12,3
Componente neutrónica	0,055	-	0,055	2,0
Nucleidos cosmogénicos	-	0,015	0,015	6,1
Nucleidos primordiales:				
Potasio-40	0,150	0,18	0,33	13,5
Rubidio-87	-	0,006	0,006	0,2
Serie del U-238	0,1			4,06
* U-238 a U-234		0,005		0,2
* Torio 230		0,007		0,28
* Radio 226		0,007		0,28
* Radón 222 a polonio 214		1,1		45,16
* Plomo 210 a polonio 210		0,12		4,92
<i>Total serie del uranio 238</i>	0,1	1,24	1,34	55,0
Torio. Serie del Th-232	0,16			
* Torio 232		0,003		0,12
* Radio 228 a radio 224		0,013		0,53
* Radón 220 a talio 208		0,160		6,57
<i>Total serie del torio 232</i>	0,16	0,18	0,34	13,95
<i>Total (redondeado)</i>	0,82	1,616	2,436	100%

⁵¹ UNSCEAR-Report. 1988

Figura 3.7. Contribución de la radiación terrestre y radiación cósmica a la dosis equivalente efectiva anual (2,4 mSv/a)



3.2. Radiación externa y radiación interna. Contribución relativa

Los radionucleidos naturales actúan como fuentes externas de radiación, pero algunos de ellos pueden incorporarse al organismo y actuar como fuentes internas, por inhalación (vía respiratoria) o a través de los alimentos (vía digestiva). En la figura 3.8 se representa la contribución relativa de las fuentes externas e internas.

3.3. Radiación externa. Contribución relativa de las diferentes fuentes

Ampliando la información anterior, en la figura 3.9 se representa, la contribución relativa de las diferentes fuentes de radiación externa a la dosis recibida por

el ser humano. En figuras sucesivas se presentan los elementos y proporciones relativas de los mismos que contribuyen significativamente a la radiación externa e interna.

De los 0,8 mSv/año recibidos en zonas de fondo calificable como normal, 0,3 mSv/año corresponden a la componente ionizante de la radiación cósmica, 0,055 a la componente neutrónica, 0,15 al potasio-40, 0,1 a la serie del uranio, y 0,16 a

Figura 3.9. Contribución de la radiación externa a las dosis equivalente efectiva anual (0,8 mSv/año)



la serie del torio.

3.4. Radiación interna. Contribución de la serie del uranio

La radiación interna supone los dos tercios de la radiación natural total recibida. En la figura 3.10 se representa la contribución de cada una de las fuentes naturales internas a la dosis efectiva anual recibida por esta vía.

De los 1,6 mSv/año recibidos en zonas de fondo normal, 0,015 corresponden a radionucleidos cosmogénicos, 0,18 al potasio-40, 0,006 al rubidio-87, 1,24 a la serie del uranio y 0,18 a la serie del torio. De todos ellos, carbono-14 (cosmogénico) y potasio-40 son prácticamente constantes e independientes de su proporción en la dieta, porque ambos tienen actividades específicas prácticamente constantes y porque

Figura 3.8. Contribución de las fuentes de radiación externas e internas a la dosis equivalente efectiva anual (2,4 mSv/a)

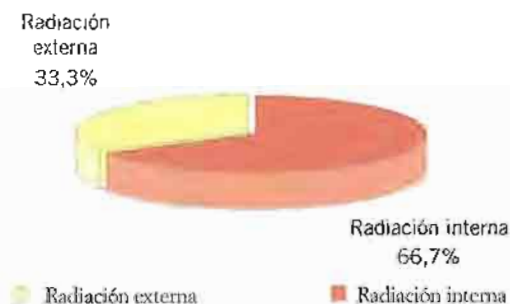
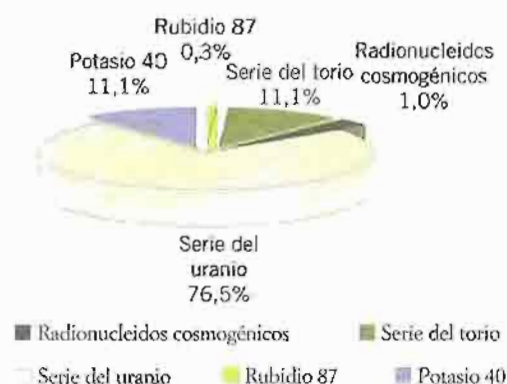


Figura 3.10. Contribución de las distintas fuentes de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual (1,6 mSv/año)

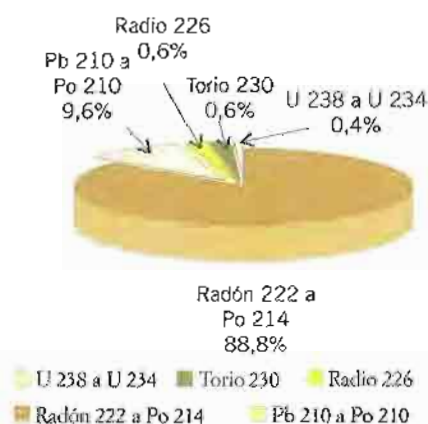


el propio organismo regula el contenido de ambos dentro de márgenes muy estrechos⁽³²⁾.

La figura 3.11 muestra la contribución de las diferentes subseries de la familia del uranio a la dosis interna anual.

De los 1,24 mSv/año, 0,005 mSv/año proceden de la subserie uranio-238 a uranio-234, 0,007 mSv/año de la del torio-230, 1,017 mSv/año de la del radón-222 a polonio-214, 0,007 del radio-226 y por último 0,12 mSv/a de la de plomo-210 a polonio-210.

Figura 3.11. Radiación interna. Contribución de la serie del uranio-238 a la dosis equivalente efectiva anual (1,24 mSv/año)



³² El contenido de potasio es de (136 ± 28) g en un hombre adulto de 70 kg.

3.5. Radiación interna. Contribución de la serie del torio

En la figura 3.12 se muestra la contribución de las diferentes subseries de la familia del torio a la dosis interna anual.

En cuanto a la radiación propia del cuerpo humano⁽³³⁾, en un hombre de 70 kg de peso, 4.500 Bq corresponden al potasio-40, 3.700 a carbono-14, 640 a rubidio-87 y 222 Bq a uranio, torio y radio, lo que supone un total de unos 9.060 Bq⁽³⁴⁾.

Figura 3.12. Contribución de la serie del torio 232 como fuente de radiación interna a la dosis equivalente efectiva anual (0,176 mSv/a)



³³ F. Cogné. «L'énergie nucléaire dans notre environnement radioactif. Principales données chiffrées». *Revue Generale Nucleaire*. Mai-Juin. 1994.

³⁴ M. Durr. *La radioactivité*. *Revue generale nucleaire*, n° 1. 1996. France.



Los sucesivos proyectos Marna-1, Marna-2, Marna-3 y Marna-Galicia forman de hecho parte de un programa más amplio que podría denominarse «Programa Marna» que tiene como objetivo conocer detalladamente los niveles ambientales de radiación gamma en España.

La justificación y objetivos del mismo ha sido ya descrita en la primera parte de esta publicación.

1. Antecedentes

La confusión creada por el accidente producido en uno de los reactores de la central nuclear de Chernóbil, concienció al público en general y a los gobiernos más concretamente, sobre la necesidad de conocer mejor los niveles de radiación ambiental. En Suecia, los niveles de radiación gamma total alcanzaron en algunos lugares valores tan altos, debido al mencionado accidente, como 400 $\mu\text{R/h}$ (microroentgen/hora), cuando los valores de fondo que corresponderían a las formaciones geológicas de las zonas afectadas debían oscilar entre los 5 y los 35 $\mu\text{R/h}$.

El accidente de Chernóbil supuso además el desarrollo de nuevas técnicas para evaluar y vigilar en tiempo cuasireal los posibles incrementos de los niveles de radiación. Así, los organismos internacionales recomendaron por una parte conocer los niveles de radiación natural y por otra implantar redes de vigilancia radiológica para poder detectar y cuantificar la evolución temporal de los niveles de actividad y/o dosis que se registran en estaciones de medida estratégicamente situadas. Ambas recomendaciones han sido satisfechas por el CSN mediante el desarrollo de proyectos tales como Marna y Revira.

En noviembre de 1986, año en el que se produjo el accidente de Chernóbil, el Organismo Internacional de Energía Atómica convocó una reunión de consultores, para discutir la posible contribución de los organismos especializados en la exploración de uranio al conocimiento de la radiación natural.

El grupo de consultores recomendó al OIEA que se publicara una descripción de la actuación sueca ante la emergencia producida. Dos fueron las razones fundamentales de tal recomendación: una para que la actuación del Instituto Geológico sueco sirviera de ejemplo en cuanto a la utilización rápida de personal experto y entrenado en la exploración de uranio, en la evaluación de la contaminación producida por otros elementos radiactivos. La segunda razón considerada fue que sirviera de ejemplo la rápida y fluida comunicación que se estableció entre las autoridades del Instituto Geológico sueco, que suministró equipos y personal especializado en la prospección de elementos radiactivos, las de protección y seguridad nuclear, que aportaron expertos en protección radiológica y las Fuerzas Aéreas suecas, que pusieron a disposición los aviones y helicópteros que se utilizaron en la evaluación de las consecuencias del accidente sobre el medio ambiente.

El OIEA también recomendó entonces a todos los países la conveniencia de disponer de mapas de radiación gamma natural, que permitan evaluar dichos niveles de radiación y sus posibles incrementos, así como la normalización de la información. Asimismo, transmitió la conveniencia de utilizar para este fin los datos procedentes de la exploración de uranio.

En ese mismo momento, la Comunidad Europea inició un estudio piloto que demostró que no existían dificultades técnicas insalvables para la producción de un atlas de niveles de radiación natural. De hecho el primer atlas de este tipo fue publicado en 1993.

Debe destacarse que los equipos de detección aérea utilizados en Suecia para evaluar los efectos de la contaminación procedente de Chernóbil, eran de igual tipo, configuración y geometría, que los empleados en España entre los años 1979 y 1981 por la Junta de Energía Nuclear y por la Empresa Nacional del Uranio en los sucesivos Planes Nacionales de Exploración de Uranio. La metodología empleada fue también la misma, con la única diferencia del calado de las ventanas de medida del espectrómetro gamma utilizado en cada caso, ya que

en lugar de emplearse las ventanas que permitieran identificar los radioelementos naturales, potasio 40, uranio y torio, que se utilizan en la prospección de minerales radiactivos, se emplearon tras el accidente de Chernóbil, fundamentalmente la del cesio-137 y las de otros elementos causantes de la contaminación radiactiva subsiguiente.

Para iniciar el proyecto de evaluación de la radiación gamma natural, se contaba en España con una importante información de base. La Junta de Energía Nuclear y Enusa, durante el período 1968-1982, habían realizado sucesivas campañas de prospección aérea de minerales radiactivos, en las que se obtuvieron medidas de muy buena calidad, tanto de radiación gamma total, como de espectrometría gamma. Había datos aéreos que cubrían aproximadamente el 60% de la superficie peninsular, obtenidos fundamentalmente siguiendo la metodología norteamericana, que por entonces era, junto con la metodología canadiense, la más avanzada del momento. Además de la información obtenida por la prospección aérea, se disponía de abundantes medidas terrestres sobre una buena parte de España.

Puestos en contacto el Consejo de Seguridad Nuclear y Enusa, se estudió, por parte de un equipo técnico mixto, la posible utilización de los datos obtenidos en los sucesivos planes de investigación de uranio para la elaboración de un mapa de tasa de exposición natural que tuviera en cuenta las recomendaciones internacionales, en relación con la producción de mapas de radiación natural.

Evidentemente, sería necesario realizar centenares de miles de nuevas medidas, que habrían de efectuarse sobre los lugares donde no existiera información o para establecer correlaciones en donde ya existieran datos. Las conclusiones del grupo de trabajo se tradujeron en una propuesta de proyecto que contemplaba el costo, el calendario y la metodología a seguir, para la realización de los mapas piloto de radiación natural.

2. Alternativas planteadas para cubrir los objetivos del proyecto Marna

2.1. Utilización de medidas de diferente representatividad. Medidas terrestres y aéreas

Resulta evidente que las medidas aéreas, por su forma de obtención, tienen unas características y significación diferente de las que se realizan desde el suelo, entre otras razones porque mientras que las medidas terrestres son puntuales, las aéreas integran de forma promediada la radiación procedente de la superficie vista por el ángulo sólido del detector. Esto significa que a 100 metros de altura se integra la radiación media procedente de una superficie de algo más de tres hectáreas.

Si una persona permaneciera permanentemente quieta en el sitio donde se realiza una medida puntual de tasa de exposición, esa medida sería representativa y exacta de la tasa de exposición a la que se encuentra sometida dicha persona, pero si la misma se moviera por su término municipal o por su entorno, entonces esa medida puntual sería tan sólo un estimador. En este caso la medida aérea de tasa de exposición sería más representativa de la exposición media a la que se encontraría sometida tal persona.

El problema fundamental para el desarrollo del proyecto Marna residía en poder utilizar conjuntamente tanto las medidas aéreas como las terrestres, siempre y cuando entre ellas existieran buenas correlaciones y que la densidad de datos fuera suficiente.

2.2. Utilización de registros brutos o en su lugar los mapas finales de exploración aérea

En el caso de las medidas aéreas, el primer dilema que se planteó fue el utilizar los registros brutos obtenidos en el avión o en su lugar, partir de la información ya elaborada existente en los mapas radiométricos producidos a escala 1/50.000 y reducirla a unas 500 medidas por cada hoja a escala 1/50.000. Se escogió la segunda opción por razones de eficacia y economía.

2.3. Utilización de medidas de radiación total o medidas de potasio, uranio y torio

La primera opción consistía en utilizar medidas de radiación total y la segunda, partir de la información existente en los mapas a escala 1/50.000 sobre contenidos de potasio, uranio y torio, producidos en la exploración aérea de minerales radiactivos. Se escogió la primera porque se disponía de datos de radiación total sobre algo más del 60% de la superficie peninsular, procedentes unos de la exploración terrestre y otros de la exploración aérea, porque el coste de la obtención de los datos para el proyecto era significativamente más bajo, unas ocho veces inferior y por último, porque la estimación de los errores sobre radiometría total media para una superficie unitaria que se utilizaría como soporte técnico para elaborar el mapa 1/1.000.000, era aceptable.

La segunda opción se abandonó por dos razones: primero por las incertidumbres derivadas de la heterogeneidad geológica asociada a la proporción variable de los radioelementos naturales en los diferentes medios geológicos y segundo porque las incertidumbres derivadas de las calibraciones sobre losas patrón, no garantizaban una mayor precisión del mapa de tasa de exposición.

El método de cálculo asume que el espectro gamma se mide bajo las condiciones de calibración, por lo que si la distribución de los radioelementos varía mucho en las formaciones geológicas del área «vista por el avión», podían producirse errores significativos en la estimación de los contenidos en los diferentes radioelementos.

Por otra parte, solamente se disponía de datos espectrométricos para aproximadamente un 30% de la superficie peninsular y por último, siempre se podía acudir a las medidas de potasio, uranio y torio en aquellas zonas sobre las que se poseyera un interés especial.

3. Datos de partida

Los datos del proyecto Marna proceden de las medidas aéreas y las medidas terrestres obtenidas

en sucesivos planes de exploración de uranio, más las series de medidas terrestres realizadas en las diversas campañas desarrolladas dentro del propio proyecto Marna.

3.1. Medidas aéreas y terrestres anteriores al inicio del proyecto Marna

Las medidas aéreas proceden de:

- Vuelos radiométricos sin discriminación de energía, realizados por la JEN (1968 a 1977).
- Vuelos radiométricos con espectrómetros multicanales contratados por la JEN (1979 a 1981).

Las medidas aéreas fueron de dos tipos: medidas de radiación total y medidas espectrométricas, obtenidas en todo caso a alturas de vuelo comprendidas entre 50 y 120 metros sobre el suelo, medidas que eran chequeadas todos los días sobre una línea de vuelo patrón para comprobar que los niveles de radiación se mantenían y para verificar la validez de los coeficientes de corrección, para reducir los datos a la altura de referencia. Las medidas siempre fueron obtenidas en tiempo seco, entre finales de la primavera y comienzos del otoño, cuando la humedad del suelo era mínima. El espaciado entre líneas de vuelo fue próximo a 1 km y en dirección perpendicular a las grandes formaciones geológicas de cada zona. Para controlar los datos obtenidos en el vuelo, se realizaban líneas de vuelo perpendiculares, que entrelazaban con las líneas anteriores según un espaciado que oscilaba entre 7 y 15 km.

- *Medidas de radiación total.* Las primeras medidas aéreas se realizaron a partir de 1968 y concluyeron en 1977. Para su obtención se emplearon detectores de conteo total que cubrían la banda de energía gamma comprendida entre 0,4 y 2,8 MeV. Los registros se efectuaron en banda continua y se corrigieron por altura de vuelo, para reducirlos a una altura patrón de 70 m. Se trata de vuelos realizados según líneas de vuelo separadas entre 600 y 1.000 metros que cubrieron una superficie de unos 200.000 km². Las medidas se registraban en

cuentas por segundo referidas a equipos específicos, de los que se conservan sus características. Los equipos utilizados fueron los SPAT-2 y SPAT-3 de Saphimo SRAT y Mount Sopris SC-160.

- *Medidas espectrométricas.* Se obtuvieron a partir de 1979. Se utilizaron espectrómetros multicanales de 256 y de 512 canales, que cubrían la banda de radiación gamma de energía comprendida entre 0,4 y 2,8 MeV. Se obtuvieron medidas: de radiación total representadas en cuentas por segundo, de potasio equivalente (en % de potasio), de torio equivalente (ppm de torio) y de uranio equivalente (ppm de uranio). Las medidas están corregidas y normalizadas por: la altura de vuelo, el fondo del sistema, la radiación cósmica y la contribución intercanal (dispersión por efecto Compton). Existen los correspondientes mapas a escala 1/50.000 de distribución de cada uno de los elementos. Los equipos utilizados fueron Geometrics Exploranium DiGRS y Geodata.

Las *medidas terrestres* comprenden los datos antiguos procedentes de las campañas de prospección regional y general, que se realizaban en mallas comprendidas entre 200 y 1.000 m, y la prospección detallada realizada según mallas comprendidas entre 200 y 5 m y en algunos casos menores. Las medidas corresponden a tasa de exposición y están expresados en microroentgen/bora, y en otros casos en cuentas/segundo. Existen además documentos sobre zonas de anomalías y/o yacimientos. También se dispone de información detallada de las características de los equipos utilizados en las mediciones que realizaron la Junta de Energía Nuclear y Enusa.

Además, se dispone también de medidas obtenidas por prospecciones radiométricas autoportadas, en las que los equipos de medida estaban instalados en coches todo terreno y que registraban los valores sobre un registro analógico continuo. También se dispone de información sobre las características de los equipos utilizados en este tipo de mediciones.

Todas las medidas terrestres cubrían la banda de energía gamma comprendida entre 0,4 y 2,8 MeV, que es la que se utiliza habitualmente para medir radionúclidos naturales.

3.2. Nuevas medidas de tasa de exposición realizadas en el proyecto Marna

Ha sido necesario realizar nuevas medidas durante la ejecución del proyecto Marna, las cuales han sido utilizadas para:

- a) El establecimiento de correlaciones entre las medidas de radiometría terrestre obtenidas por los diferentes equipos utilizados con anterioridad.
- b) El establecimiento de correlaciones entre las medidas aéreas y las terrestres.
- c) El establecimiento de correlaciones entre radiometría y geología.
- d) Cubrir zonas claramente localizadas en donde no existía una red suficiente de datos.

Para establecer las correlaciones se ha utilizado el rango de variación del fondo geológico que cubre aproximadamente un intervalo comprendido entre 3 y 50 $\mu\text{R/h}$. Los coeficientes de correlación en todos los casos fueron superiores a 0,960.

Las nuevas medidas de tasa de exposición realizadas durante el desarrollo del proyecto Marna han sido obtenidas con los escintilómetros de conteo total SPP2 de Saphimo SRAT y ES3 S, de la Junta de Energía Nuclear. Las medidas espectrométricas han sido obtenidas con el espectrómetro Exploranium Gr-1300 de 256 canales. Cada uno de estos equipos está conectado a un ordenador portátil en el que se registra automáticamente, mediante un GPS, la posición geográfica de cada punto medido, referido a coordenadas UTM correspondientes al huso 30.

En las nuevas medidas, las lecturas han sido tomadas en $\mu\text{R/h}$ y c/s con dos aparatos para controlar calibraciones y correlaciones. Los equipos utilizados han sido el SPP-2 y ES3 para el conteo total y el Exploranium GR-1300 para la espectrometría gamma. Las nuevas medidas han proporcionado más de 450.000 nuevos datos, estimándose que al concluir la tercera fase del proyecto, las nuevas medidas de tasa de exposición superen los 700.000 datos.

La tecnología y *software* desarrollada por Enusa permite obtener en el momento las isolíneas de distribución de los niveles de tasa de exposición

o dosis correspondientes a los itinerarios realizados *ad hoc*.

4. Equipos

Las características fundamentales de los diferentes equipos con los que históricamente se obtuvieron las medidas fueron las siguientes:

4.1. Medidas de radiación gamma total

Tanto en prospección aérea como en prospección autoportada se utilizaron los siguientes equipos:

a) Escintilómetro SPAT - 2 T y 3 T. (Saphymo)

- Sensor de I Na (TI) de 151,4 mm x 127 mm.
- Escalas de medida: 300-1.000-3.000-10.000 cps.
- Las constantes de respuesta eran: 1,2 s en la escala de 300, 0,6 s en la escala de 1.000 y 0,3 s en la escala de 3.000.
- Sensibilidad: $\pm 4\%$
- Umbral de conteo: entre 0,5 MeV y 2,8 MeV.

Existía la posibilidad de modificar los umbrales de conteo a 150, 250, 1.000 y 2.500 keV.

b) Escintilómetro Mount Sopris SC-160-124 A (US)

- Sensor de I Na (TI) de 127 mm x 91,6 mm.
- Escalas de medida: 20-50-100-200-500-1.000-2.000-5.000-10.000-20.000-50.000 cps.
- Error probable de selección: 1-2-4%.
- Las constantes de respuesta fueron: 0,56 y 0,28 s.
- Existía posibilidad de modificar los umbrales de conteo.

4.2. Medidas espectrométricas

a) Espectrómetro diferencial de 256 canales, modelo Geometrics Exploranium DiGRS 3001. Vuelos JEN campañas 1979-80:

- Volumen del cristal: 1.280 pulgadas³=20.975 litros.
- Unidad de medida: cps.
- Intervalo entre isolíneas para radiación total: 100 c/s.
- Calado de las ventanas del espectrómetro (energía expresada en MeV).
- Cuentas totales: 0,40-2,80.
- Potasio: 1,37-1,57.
- Uranio: 1,66-1,86.
- Torio: 2,45-2,80.

Los datos eran corregidos por:

Dispersión por efecto Compton.

Fondo y tiempo muerto.

Altura patrón de 120 m, a 760 mm y 0°C.

Los datos corregidos se expresaban como radiación total, equivalente torio (eTh) en ppm, equivalente uranio (eU) en ppm, y potasio en %.

b) Espectrómetro de 512 canales, modelo Geodata Int. Lama 4 (512 canales-Campaña 1981).

- Volumen del cristal de I Na (TI): 2.048 pulgadas³=33,5 litros.
- Cuentas correspondientes a las siguientes ventanas con energías expresadas en MeV:
 - Torio: 2,41-2,81.
 - Uranio: 1,66-1,87.
 - Potasio: 1,36-1,57.
 - Cuentas totales: 0,40-2,81.

Los datos están corregidos y normalizados por:

Radiación cósmica cada segundo.

Dispersión por efecto Compton.

Fondo y tiempo muerto.

Contribución del bismuto-214 atmosférico.

Altura patrón de 120 m, a 760 mm y 0°C.

Los datos corregidos se expresaban como radiación total, equivalente torio (eTh) en ppm, equivalente uranio (eU) en ppm, y potasio en %.

4.3. Nuevas medidas realizadas en el proyecto Marna

La tecnología y *software* desarrollado por Enusa, permite obtener actualmente las isolíneas de distribución de los niveles de tasa de exposición o dosis correspondientes a los itinerarios realizados *ad hoc*.

Así pues, con un espectrómetro portátil es posible identificar la fuente o fuentes causantes de una anomalía, ya que éste dispone de una librería que permite identificar de forma inmediata: americio-241, cesio-137, cobalto-60, potasio-40, iridio-192, radio-226 y torio-232. El sistema permite identificar además

otros radionucleidos, como por ejemplo: talio-201, gadolinio-67, indio-111, xenon-133, cadmio-109, cromo-51, manganeso-54, bario-133, yodo-131, etc. Para señalar la sensibilidad de los equipos basta hacer notar que durante las pruebas efectuadas con los citados equipos instalados en un automóvil, fue detectada incluso la actividad procedente de pacientes ambulatorios que estaban sometidos a tratamiento con radiosótopos. Identificándose el radioisótopo que se les había suministrado. Las figuras 4.13, 4.14 y 4.15 muestran a modo de ejemplo, tres de los tipos de espectro obtenidos. El primero corresponde al espectro de una caliza, el segundo al del yodo-131 y el tercero al del cesio-137.

Figura 4.13. Espectro de una caliza

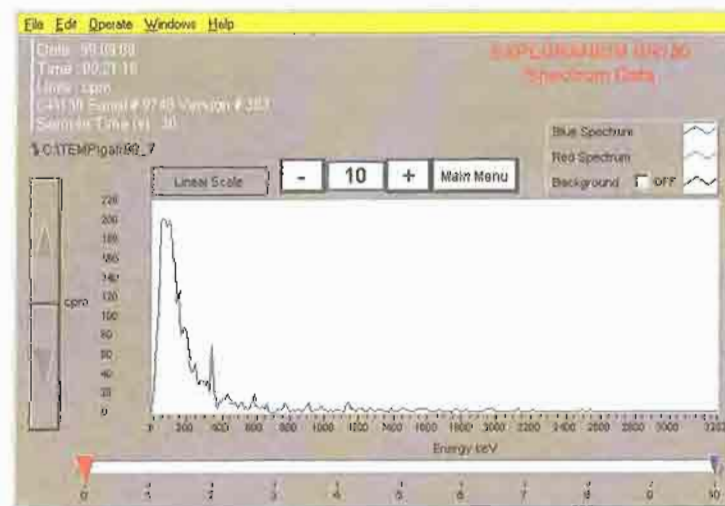


Figura 4.14. Espectro del yodo-131

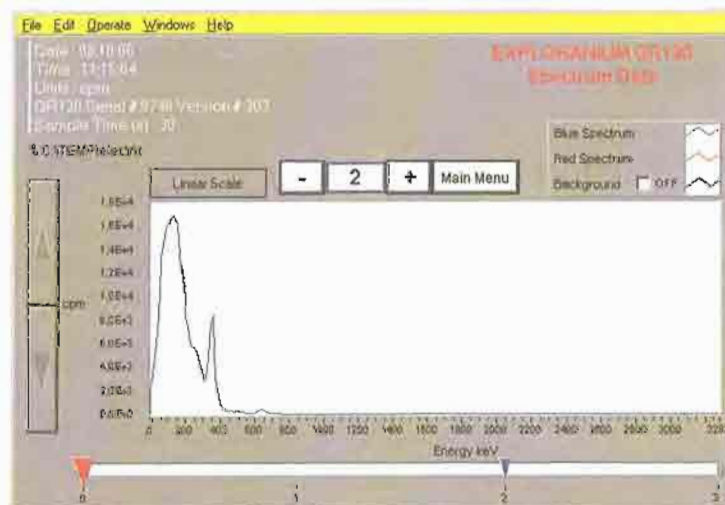
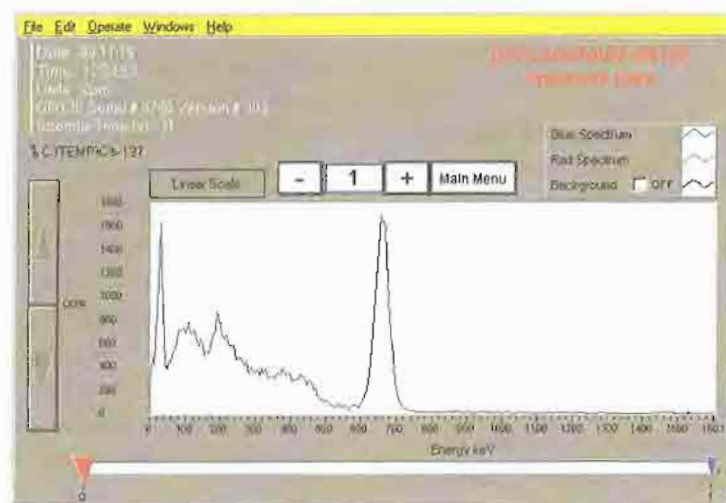


Figura 4.15. Espectro del cesio-137



El espectrómetro Exploranium Gr-130 de 256 canales es muy versátil y ligero. Sus principales características son las siguientes:

- Volumen del cristal: 4,5 pulgadas cúbicas (74 cm³). Cristal de NaI activado con talio.
- Resolución: mejor que el 9% para el cesio-137 en 662 keV.
- Ganancia controlada digitalmente
- Número de canales 256.
- Rango de energías, de 50 keV a 3,0 MeV.
- Umbral inferior ajustable internamente.
- Umbral superior fijo en el canal 256. Todos los impulsos por encima de este nivel corresponden a radiación cósmica, que se acumulan y leen en el canal 256.
- Precisión de las medidas: 0,1%.

4.4. Aviones, sistemas de navegación y de registro de las medidas

Siempre se utilizaron aviones ligeros de baja velocidad, tales como: Cessna 180, Piper Cherokee Arrow, y Cessna 337 «Super skymaster». En una campaña se utilizó el Douglas DC3 sobre zonas con una topografía muy suave.

Hasta 1978 se realizaron vuelos con navegación visual, situando las líneas de vuelo sobre mapas

1:50.000 y posterior restitución manual de los datos de medida de radiación total.

En los vuelos espectrométricos se utilizó navegación mediante Radar Doppler y la situación de las líneas de vuelo se efectuó mediante registro fotográfico continuo o con una video cámara.

Se utilizaron registradores gráficos tales como: Esterline Angus A-601-C, y Mechanics for Electronics MFE-2, en los vuelos en los que se realizaba un conteo total. En todos los vuelos espectrométricos se utilizó registro digital en cinta magnética.

5. Metodología

5.1. Extracción e informatización de datos

Los dos primeros años de desarrollo del proyecto se invirtieron prácticamente en la extracción del archivo de datos y en el establecimiento de las tecnologías y metodologías precisas para calcular las correlaciones entre las diferentes medidas obtenidas por los distintos equipos.

Fueron extraídos todos los datos correspondientes a las aproximadamente 100 hojas 1:50.000 de Extremadura (unos 50.000 km²) y a las 200 hojas de Castilla y León (unos 80.000 km²) en ficheros individuales DBase III, compatibles con Symphony, Golden y

StatGraph, reproduciéndose las medidas de radiación total sobre cada hoja a partir de los citados datos. Mediante un pequeño programa, se redujeron todos los datos a una base única, unificando coordenadas y normalizándose los valores (expresados en cps), de las campañas de prospección aérea realizados entre los años 1979 y 1981 a $\mu\text{R/h}$. En el caso de Extremadura la base de datos contiene unas 48.000 medidas y en el de Castilla y León unas 70.000.

Fue necesario establecer controles estadísticos de admisión o rechazo de datos. El rechazo requería un posterior examen de los datos originales para asegurar su validez. El examen requiere la comprobación de qué equipos y escalas de medida fueron utilizados, de la altura de vuelo y las correlaciones empleadas. Este proceso debe dar lugar a la aceptación o rechazo de los valores.

La primera elaboración de los mapas y controles sobre admisión de los datos, se llevó a cabo con la colaboración de profesores de Informática de la Escuela Universitaria Politécnica de Cáceres (EUPC). En el contraste y perfeccionamiento de equivalencias, colaboraron profesores de Física de la Facultad de Veterinaria de Cáceres.

La separación entre isolíneas se estableció en 1 $\mu\text{R/h}$ para el intervalo comprendido entre 4 y 25 $\mu\text{R/h}$.

En cuanto a la densidad de los datos a extraer para elaborar los mapas a escala 1:50.000, se realizaron pruebas partiendo de 2.500 datos por hoja 1:50.000 y finalmente se consideró suficiente el empleo de unos 500 datos por hoja, por entender que reproducían fielmente los mapas de los que fueron extraídos.

Las nuevas medidas de tasa de exposición realizadas en campo durante el desarrollo del proyecto Marna, se han incluido en ficheros en los que figura la tasa de exposición en microroentgen/hora y las coordenadas UTM correspondientes referidas al huso 30. Hasta el momento el número de nuevas medidas supera las 500.000.

5.2 Establecimiento de correlaciones

5.2.1. Correlaciones entre medidas de radiometría terrestre obtenidas con diferentes equipos

Como equipos patrón, a los que se han referido todas las medidas del proyecto Marna, se han utilizado aparatos ES-3 (microroentgen/hora) fabricados y calibrados por Ciemat. Además, se ha dispuesto de medidas de campo obtenidas por aparatos SPP-2 de Saphymo Srat y ES-4, utilizados por Enusa y la Junta de Energía Nuclear. Para establecer las oportunas correlaciones, se ha utilizado el rango de variación del fondo geológico, que cubre aproximadamente un intervalo comprendido entre 3 y 50 $\mu\text{R/h}$. Los coeficientes de correlación en todos los casos fueron superiores a 0,900.

A título de ejemplo en la tabla 4.36 se muestran los resultados conseguidos para correlaciones entre diferentes equipos, para el rango de valores de tasa de exposición del fondo normal (3 a 35 $\mu\text{R/h}$).

Tabla 4.36. Coeficientes de correlación

	ES-3($\mu\text{R/h}$)/SPP-2 (cps)	ES-3($\mu\text{R/h}$)/ES-4 (cps)
Lineal	0,987	0,986
Potencial	0,996	0,996
Exponencial	0,9610,960	

Para determinar el efecto de la fluctuación estadística de los aparatos, se realizaron una serie de experiencias con los mismos, tomando lecturas con cada uno de ellos a intervalos regulares de tiempo y se calcularon las medias móviles y las medias separadas para distintos bloques de lecturas, llegándose a la conclusión de que la media de cinco lecturas instantáneas producía límites de confianza individuales mejores que 0,5 $\mu\text{R/h}$, con un error absoluto inferior al 5%.

5.2.2. Correlaciones entre medidas terrestres y aéreas

La existencia de buenas correlaciones entre medidas terrestres y aéreas era básica para la viabilidad del proyecto. Existen varios procedimientos

para enfocar el problema, pero debido a las características del banco de datos, se optó por utilizar los valores obtenidos de las radiometrías, en $\mu\text{R/h}$, realizadas desde el suelo y correlacionarlas directamente con las medidas efectuadas desde el aire.

Inicialmente se intentó una correlación punto a punto entre medidas aéreas y terrestres y se observó que existía. No obstante, se rechazó el procedimiento por la diferente representatividad que poseen las medidas aéreas (zonales) y las terrestres (puntuales). Se acudió entonces a determinar la correlación mediante el uso de «fuentes infinitas» terrestres o «mesetas» radiométricas, es decir, zonas extensas de radiometría homogénea, seleccionándose diferentes zonas para cubrir todo el rango radiométrico de los fondos geológicos, que en este caso se encuentra entre 3 y 35 $\mu\text{R/h}$.

Se tomaron sobre el terreno unas 4.000 medidas sobre esas «fuentes infinitas», alcanzándose coeficientes de correlación de 0,92 y 0,94, para las correlaciones lineal y potencial.

Las experiencias iniciales se realizaron sobre la comunidad autónoma de Extremadura, por existir para la misma una cobertura aeroradiométrica superior al 90% y porque la mayor parte fue volada con un único espectrómetro de 512 canales.

5.2.3. Establecimiento de correlaciones entre vuelos de distinta naturaleza

Para el establecimiento de correlaciones entre las medidas espectrométricas obtenidas en el período de 1977 a 1981 se utilizaron las zonas de solape de vuelos realizados con el espectrómetro de 256 canales y con el de 512 canales. Se seleccionó también para ello la comunidad autónoma de Extremadura, donde la cobertura de datos aéreos era superior al 90%, de los que aproximadamente un 70% se obtuvieron mediante vuelos utilizando el espectrómetro de 512 canales y el 20% restante con el espectrómetro de 256 canales. Se utilizó la zona de Malpartida de Plasencia, donde existía un solape de las medidas obtenidas con diferentes equipos para una superficie de 250 km^2 . Se extrajeron

los valores coincidentes con los puntos de cruce de una malla cuadrada de 250 m de lado, obteniéndose un coeficiente de correlación lineal de 0,7915.

Para aumentar la superficie soporte de cada dato y mejorar la proporción de superficie común real en ambos vuelos, se utilizó «la media de 5 puntos», en la que cada punto viene representado por el valor medio de los cuatro más próximos. La superficie representativa ascendía a 0,5 km^2 y el coeficiente de correlación lineal aumentó a 0,878. Utilizando «la media de 9 puntos», la superficie representativa ascendía a 1 km^2 y el coeficiente de correlación lineal aumentó a 0,902. Estos estudios se realizaron simultáneamente con los diseñados para la toma de lecturas directas sobre el terreno ($\mu\text{R/h}$) del nivel de radiación gamma.

5.2.4. Correlaciones geología-radiometría

Se han utilizado solamente para la elaboración del mapa 1/1.000.000 en las zonas donde existía poca densidad de medidas. Como apoyo a la producción del mapa se han tomado medidas sobre el terreno, actualmente en más de 4.000 puntos, que han servido también como control de calidad de los mapas de tasa de exposición.

La correlación entre formaciones geológicas y radiometría resulta evidente para cualquier prospector de minerales radiactivos, sin embargo esto no significa que pueda utilizarse de una manera simplista. Las rocas hipogénicas ácidas (granitos, adamellitas, granodioritas, etc.), debido a su superior contenido en uranio, torio y potasio, presentan mayor radiactividad que las básicas. Las rocas sedimentarias de precipitación química suelen presentar una tasa de exposición inferior a las restantes. En las rocas detríticas pueden sus niveles de actividad variar en un rango muy amplio, según las rocas que las dieron origen, su composición y estado de óxido-reducción. Están muy relacionadas radiométricamente con el fondo de la roca fuente. Las rocas metamórficas de bajo grado (esquistos verdes) y gran tectonización, presentan una gran variabilidad radiométrica. Los frentes metamórficos

de contacto pueden superponer sus gradientes radiactivos a los preexistentes.

En Extremadura esta norma general se sigue, pudiendo apreciarse radiométricamente los límites de los batolitos graníticos de la Sierra de Gredos, Cabeza de Araya, Montánchez, La Haba e incluso *stocks* como el de Trujillo. Los metamórficos paleozoicos también se aprecian por sus radiometrías intermedias, así como los bajos radiométricos de los llanos calcáreos de la Tierra de Barros. Incluso pueden observarse a lo largo de decenas de kilómetros los mínimos radiométricos de los pantanos del río Tago.

En Castilla y León, el grupo de investigación de la Facultad de Ciencias de Salamanca que colabora en el proyecto Marna, ha realizado trabajos de prospección autoportada, para completar la cobertura radiométrica de la citada comunidad autónoma, simultáneos al desarrollo de dos trabajos de fin de carrera sobre correlaciones geología-radiometría.

5.3. La elaboración de mapas

Todos los datos referentes a las coordenadas geográficas se han normalizado a coordenadas UTM referidas al huso 30. Los datos radiométricos están referidos a tasa de exposición en $\mu\text{R/h}$ en una base de datos generalizada.

5.3.1. El mapa a escala 1/1.000.000

Para realizar el mapa a escala 1/1.000.000 se definió una celda o cuadrícula base correspondiente a un cuadrilátero de lados paralelos a los límites de una hoja topográfica 1:50.000 y de una superficie aproximada equivalente a 1:16 de dicha hoja. Esta cuadrícula está destinada a soportar el dato radiométrico medio de su superficie, la cual oscila entre 30 y 35 km^2 , es decir, aproximadamente un rectángulo de 7x5 km. En total 16.774 celdas. Esta cuadrícula base se definió originalmente de esta manera, por cumplir dos condiciones:

- a) Existe una base informatizada con los vértices de dicha cuadrícula en el Instituto Geográfico Nacional.

- b) Es un buen soporte de datos para la elaboración del plano, ya que se consideró suficiente la densidad de los datos radiométricos.

Los primeros tanteos para aplicar una metodología económica y fiable para la extracción de datos de prospecciones aéreas, se realizaron partiendo de la ya citada cuadrícula base. Se realizaron extracciones de datos según once modelos de mallas de extracción, partiendo de los cuatro vértices de la cuadrícula o de los centros de los cuadriláteros que resultan de dividir una cuadrícula en cuatro subcuadrículas, seguidos de centrados sucesivos. Se calcularon para cada malla todos los parámetros de interés (puntos por km^2 , media, desviación típica, varianza, coeficiente de variación y límites de confianza).

Se estudiaron once cuadrículas que ofrecían diversas variabilidades radiométricas, de ellas seis procedían de las campañas de 1979 y 1980 y cinco de la de 1981. En todos los casos en que se utilizó una malla de 25 puntos por cuadrícula se obtuvieron límites de confianza, en cps, mejores al equivalente de 1 $\mu\text{R/h}$. Después de una severa crítica del método, se estableció el criterio de realizar la extracción de datos en malla regular equivalente, aproximadamente a razón de 32 puntos por cuadrícula. A continuación se realiza un filtrado de los datos por el ordenador para, si procede, cejar posteriormente la malla de extracción en las cuadrículas que sobrepasasen el límite de confianza equivalente a 1 $\mu\text{R/h}$.

Los datos de partida para obtener el primer mapa fueron 182.812 (hoy en día superan los 500.000) que fueron utilizados para generar una malla aproximada de 7x5 km de la España peninsular correspondientes a diferentes densidades de datos, que dependen de la cobertura disponible. A las celdas (16.744) de la citada malla, se han calculado mediante krikeage los valores medios ($\mu\text{R/h}$) correspondientes a los valores existentes en su zona de influencia. En las zonas carentes de cobertura radiométrica adecuada, se han asignado valores teniendo en cuenta la geología de la zona, la radiometría de formaciones geológicas similares y las medidas específicas realizadas durante la ejecución

del proyecto, para establecer las correlaciones entre geología y radiometría. Todos ellos figuran en una base de datos adicional.

En las comunidades autónomas de Extremadura y Castilla y León y en la zona cubierta por la segunda fase del proyecto, los datos se han extraído a partir de una densidad aproximada de un dato por km^2 , mientras que en otras comunidades, los datos se han obtenido a partir de extrapolaciones geológicas. En algún caso excepcional las densidades de datos son muy bajas y pueden llegar a un dato por 500 km^2 .

El proyecto Marna fundamentalmente perseguía disponer de una metodología que permitiera la obtención de mapas detallados a escalas 1/50.000 y 1/200.000 de tasa de exposición, que pudieran aplicarse al cálculo de diferentes tipos de dosis. El mapa a escala 1/1.000.000 era pues un fruto marginal que suponía una primera recopilación de la información existente en los fondos documentales, que sin embargo tiene un valor estratégico y

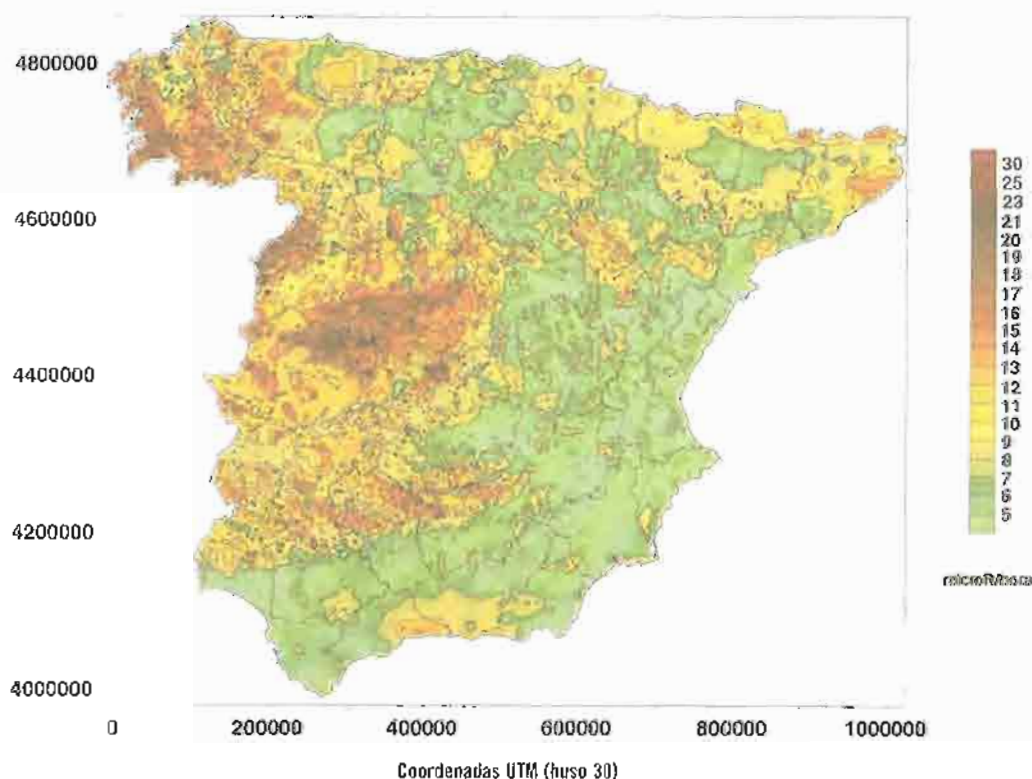
orientativo, ya que permite conocer si existe coherencia suficiente en la metodología aplicada sobre grandes áreas y a su vez puede suministrar información para priorizar futuros estudios sobre zonas concretas, como aquellas en las que la tasa de exposición es más elevada.

Los valores asignados a las 16.744 celdas antes indicadas, presentan una media de $8,7 \mu\text{R/h}$, una distribución log-normal, una mediana de $7,75 \mu\text{R/h}$ y una desviación standard de 3,96.

En el mapa 4.2 se han representado los niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidos a un metro del suelo correspondientes a la España peninsular.

Como puede apreciarse, los niveles medios de radiación más bajos se presentan en las provincias de Murcia, Castellón, Valencia, Alicante y Albacete, mientras que los más altos corresponden a las provincias de Madrid, Cáceres, Lugo, Orense, Ávila y Pontevedra.

Mapa 4.2. Niveles de tasa de exposición a la radiación gamma natural medidas a un metro del suelo correspondiente a la España peninsular



Los mapas piloto de radiación gamma natural de cada una de las provincias que figuran al final de esta publicación están representados a escala 1/1.000.000.

En general, existe una relación entre los niveles de tasa de exposición y las unidades geológicas. Los valores altos suelen estar ligados a determinado tipo de formaciones graníticas y rocas sedimentarias derivadas de ellas, mientras que los más bajos son debidos a formaciones sedimentarias de origen marino.

Por unidades geológicas, las medias más altas (17,5 $\mu\text{R/h}$) corresponden a formaciones graníticas de diversa naturaleza situadas en las provincias de Cáceres, Madrid, Toledo y Ávila (Sistema Central) o en el arco hercínico gallego y en el oeste de las provincias de Salamanca y Zamora. También presentan una radiometría media similar algunos granitos de Cataluña, Badajoz, Córdoba y Sevilla. Los niveles mayores de radiación en los granitos son debidos principalmente a su mayor contenido en los tres elementos radiactivos naturales: potasio-40, torio y uranio simultáneamente. Los niveles de radiación que alcanzan son similares a los de otros granitos en el mundo. Sin embargo, no debe entenderse que todos los granitos presentan fondos altos, ni que el fondo sea uniforme en ellos.

También se aprecian valores medios altos (15 $\mu\text{R/h}$) en las zonas metamórficas del oeste peninsular (Macizo Hespérico), Sistema Ibérico, afloramientos pirenaicos y formaciones filábride, neválide y maláguide de la zona mediterránea meridional. Dentro de los meta-sedimentos 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.

Dentro del triásico, es el Bunt, en su facies de areniscas rojas, la formación que presenta mayores fondos radiométricos medios (15 $\mu\text{R/h}$), fondo que, en general, es mucho menor en las formaciones calizas del Muschelkalk y en las margas abigarradas del Keuper.

Los materiales del Jurásico y Lias, predominantemente calcáreos y dolomíticos, presentan fondos bajos (5 $\mu\text{R/h}$) al igual que ocurre con el Cretácico, salvo en las facies detríticas del Albense (Téruel, Soria, Cuenca, Guadalajara, etc).

El Terciario de las depresiones de los ríos Ebro, Tago, Duero y Guadalquivir podría dividirse, a efectos radiométricos y por su composición y extensión, en varias subzonas:

- Calizas lacustres, con fondos bajos (5 $\mu\text{R/h}$), aunque localmente pueden presentar mayor radiometría debido al aumento de su contenido en 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 debidas 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 los de las rocas graníticas circunvecinas de las que proceden (arcosas del SO de la cuenca terciaria de Ciudad Rodrigo).

Los cuaternarios en general presentan fondos bajos, tanto en las rañas pliocuaternarias, como en las terrazas y otras formaciones aluviales y diluviales. Los fondos son altos cuando derivan de rocas graníticas o metasedimentarias de fondo alto.

5.3.2. Mapas detallados a otras escalas

Para la elaboración de los mapas a otras escalas más detalladas se utilizan todos los datos correspondientes a la cobertura del proyecto Marna, en la actualidad más de 500.000 medidas de tasa de exposición.

Se ha utilizado en el control de datos y en la elaboración de los mapas el programa Golden Surfer, y una metodología propia puesta a punto por el Departamento de Informática de la Universidad de Extremadura. Se han realizado controles de calidad numéricos que se han combinado con otros gráficos. De esta forma Extremadura ha quedado representada por unos 48.000 datos de tasa de exposición y Castilla y León por unos 70.000 datos, que corresponden aproximadamente a una cobertura radiométrica de un dato por km^2 .

A partir de los datos extraídos, se han reproducido las isolíneas originales sobre cada hoja de vuelo, para asegurar la calidad de los datos.

Mediante un programa de ordenador, se han reducido todos los datos a una base de datos única, unificando coordenadas de diferente naturaleza, refiriéndolas a coordenadas UTM del huso 30 y los valores de tasa de exposición a $\mu\text{R/h}$.

La elaboración de planos se llevó a cabo con la colaboración de profesores de Informática de la Escuela Universitaria Politécnica de Cáceres y en la representatividad de los datos han colaborado profesores de Física de la Facultad de Veterinaria de Cáceres y de la Universidad Politécnica de Extremadura.

El mapa 4.3 es un ejemplo de mapa detallado de tasa de exposición a la radiación gamma natural.

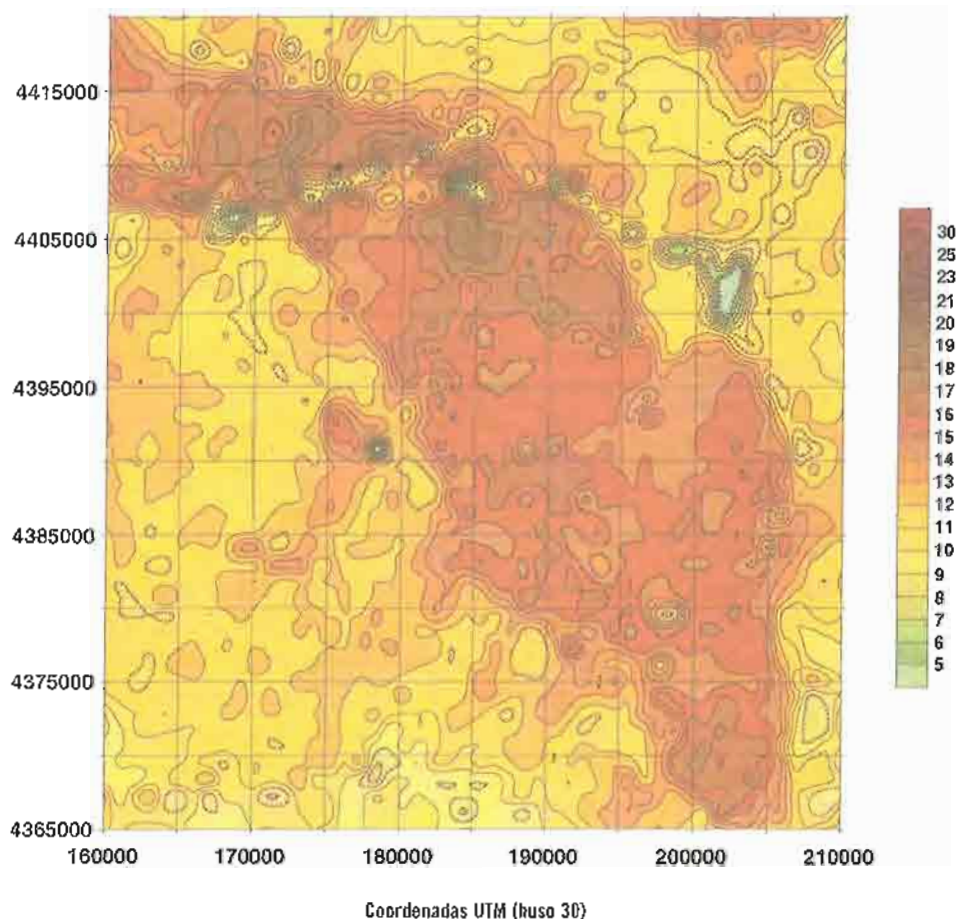
Corresponde a una zona situada al noroeste de la ciudad de Cáceres. El mapa 4.4. corresponde a los niveles de tasa de exposición de la hoja número 40 (Daroca) del mapa topográfico a escala 1/200.000.

6. Banco de datos generado

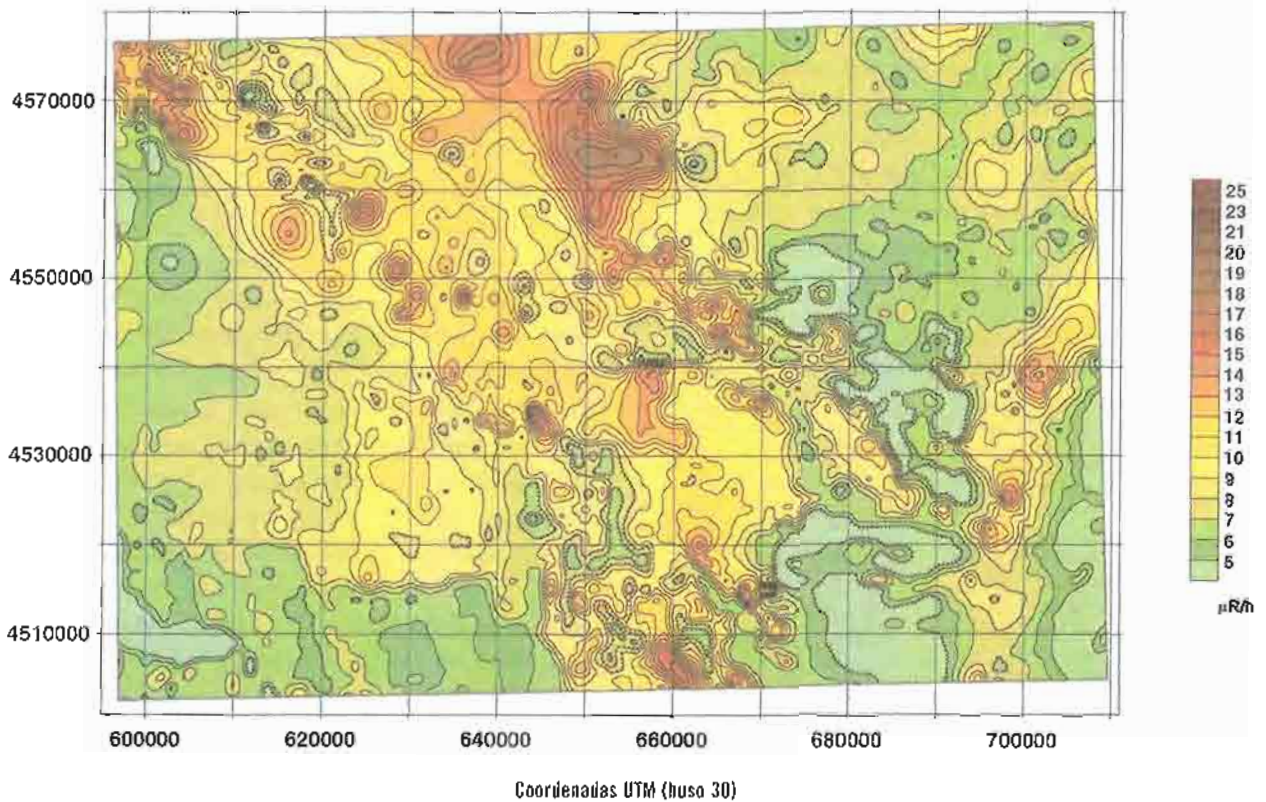
Comprende los nuevos datos que ha sido necesario obtener para poder realizar los mapas a las diferentes escalas previstas en el desarrollo del proyecto. Pueden resumirse en los siguientes:

- Mapas de radiometría aérea normalizada.
- Datos originales de radiometría terrestre obtenidos por diferentes equipos.
- Datos utilizados para el establecimiento de correlaciones entre medidas de radiometría terrestre obtenidos por diferentes equipos.

Mapa nº 4.3. Tasa de exposición a la radiación gamma natural. Zona de Araya (Cáceres)



Mapa 4.4. Tasa de exposición de la hoja nº 40 (Darooca) del mapa topográfico nacional a escala 1/200.000



- Extracción de datos ya existentes para el establecimiento de correlaciones entre medidas aéreas y terrestres.
- Datos para el establecimiento de correlaciones entre radiometría y geología.
- Nuevas medidas obtenidas mediante prospecciones terrestres y autoportadas de zonas donde existía baja densidad de datos.

Se han obtenido medidas de tasa de exposición al modo de «prospección autoportada» sobre más de 20.000 km lineales.

Todos estos nuevos datos han sido normalizados a tasa de exposición expresada en microroentgen/hora y coordenadas UTM en huso 30.

7. Resultados y aplicaciones del proyecto Marna

7.1. Evaluación de los niveles de radiación gamma natural

Entre los frutos actuales del proyecto Marna, podemos identificar la existencia de un mapa base a escala 1/1.000.000 de la España peninsular y de mapas más detallados, para 380.000 km², entre los que se encuentran los de las comunidades de Extremadura y Castilla y León, a escala 1/200.000. También se han realizado mapas más detallados de cuatro hojas del mapa 1/50.000, aproximadamente 2.200 km². De todos ellos existe el soporte informático correspondiente.

7.2 Mapas de tasa de exposición. Distribución por provincias

En la tabla 4.37 se han ordenado los valores medios de la tasa de exposición a la radiación gamma natural, correspondientes a cada una de las provincias de la España peninsular. Estos valores están también representados en el mapa 4.5. En la elaboración de la tabla y del mapa se han utilizado la totalidad de los datos de tasa de exposición que componen el mapa 1/1.000.000 (1998).

Tabla 4.37. Tasa de exposición media correspondiente a diferentes provincias agrupadas según valores crecientes

Nº	Provincia	media(μ R/h)
1	Murcia	4,56
2	Castellón	4,85
3	Valencia	4,93
4	Alicante	4,94
5	Albacete	5,30
6	Cádiz	5,40
7	Tarragona	5,96
8	Almería	6,09
9	Cuenca	6,27
10	Cantabria	6,57
11	Teruel	6,67
12	Soria	6,72
13	Burgos	6,79
14	Granada	6,79
15	Palencia	6,81
16	Sevilla	6,83
17	Guadalajara	6,90
18	Álava	6,91
19	Barcelona	7,08
20	Málaga	7,20
21	La Rioja	7,29
22	Zaragoza	7,38
23	Huelva	7,49
24	Navarra	7,76
25	Huesca	7,81
26	Ciudad Real	7,87
27	Jaén	7,94
28	Lérida	7,95
29	Vizcaya	8,32
30	León	8,94
31	Córdoba	9,09
32	Valladolid	9,11
33	Gerona	9,28
34	Zamora	9,82
35	Asturias	9,95
36	Segovia	10,20
37	Badajoz	10,44
38	Guipúzcoa	10,64
39	La Coruña	10,95
40	Salamanca	12,31
41	Toledo	12,44
42	Madrid	12,74
43	Cáceres	13,00
44	Lugo	13,61
45	Orense	14,37
46	Ávila	15,12
47	Pontevedra	17,06

7.3 Evaluación de la representatividad de otros métodos de medida de la radiación

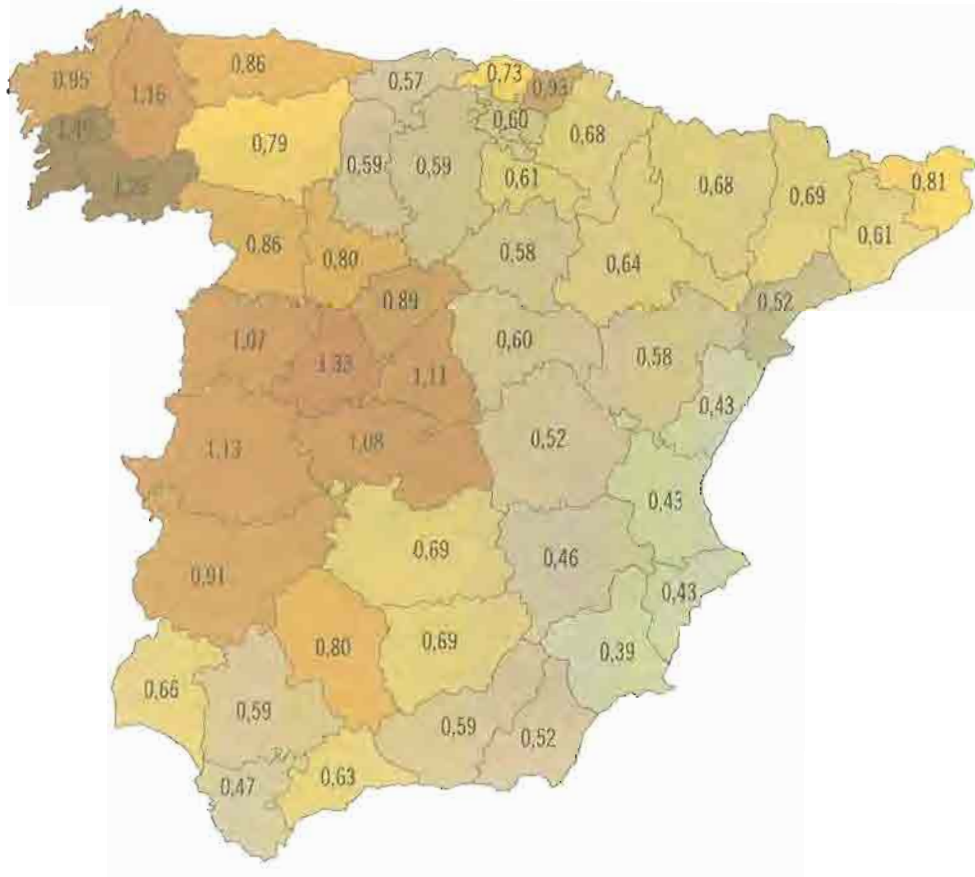
En este sentido se realizó, en colaboración con el Grupo de Investigación de Radiactividad Ambiental del Departamento de Física, Facultad de Veterinaria de la Universidad de Extremadura⁽³⁵⁾, un ejercicio de intercomparación, entre medidas de la tasa de exposición que se recibe por irradiación externa, mediante dos técnicas diferentes: una a partir de los datos producidos en el proyecto Marna y otra a partir de las concentraciones de elementos radiactivos emisores gamma existentes en el suelo. La zona donde se llevó a cabo el estudio fue la provincia de Cáceres, una zona de unos 20.000 km² de superficie, con una geología complicada y en consecuencia, con una gran variación espacial de las concentraciones radiactivas de los radionucleidos presentes en dichos suelos. Los resultados obtenidos permitieron comparar ambas técnicas de medida de dosis absorbida en aire y establecer criterios que, utilizando la geología como parámetro, permiten optimizar futuras campañas de muestreo, al poder determinarse *a priori*, el número de puntos de muestreo a considerar y la localización más adecuada de los mismos.

7.4 Evaluación y control de incrementos de radiación debidos a causas naturales o no naturales

La dualidad de información radiológico-dosimétrica existente en la provincia de Cáceres ha animado al citado Grupo de Investigación de Radiactividad Ambiental de la Universidad de Extremadura, a estudiar la sensibilidad de los mapas de radiación gamma natural del proyecto Marna; es decir a valorar cómo se afectarían los niveles de radiación natural, representados en los mapas, por una supuesta liberación significativa a la atmósfera de radionucleidos emisores gamma de origen artificial, y su posterior

³⁵ A. BAEZA *et al.* Determination of the Dose Rate from External Irradiation. Geological Considerations in Sampling Optimization. J. Environmental Radioactivity. Vol. 34, n° 1, 1997.

Mapa 4.5. Tasa de exposición a la radiación gamma natural. Valores medios por provincia (milisievert por año)



deposición en el suelo o dicho de otra manera, estimar la concentración necesaria que debería depositarse para producir cambios significativos en el fondo natural.

Además de los datos del proyecto Marna se utilizan datos obtenidos por el citado grupo investigador que corresponden a unos 263 puntos de medida de la provincia de Cáceres, de los que se posee un conocimiento preciso sobre las concentraciones de los elementos radiactivos en suelos. El estudio está actualmente en curso.

7.5. Elaboración de mapas de tasa de dosis absorbida en aire

Para la transformación del mapa de tasa de exposición obtenido en el proyecto Marna a mapa de dosis absorbida en aire, no se ha hecho más que recordar que la energía de 0,0087 julios deposita-

da por la radiación electromagnética en un kilogramo de aire, en condiciones normales, es equivalente a un roentgen, y que un gray es equivalente a la cesión de la energía de un J/kg; así tendremos:

Conversión de exposición a dosis en aire:

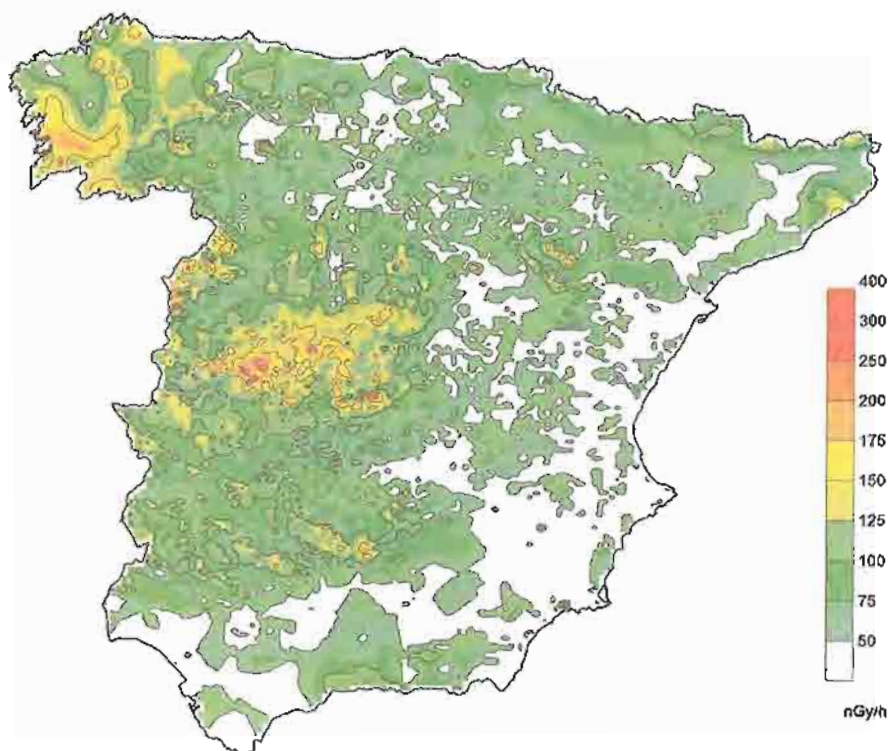
$$1R = 0,0087 \text{ Gy}$$

Es decir, para expresarlo en las unidades más frecuentemente utilizadas, $1\mu R/h = 8,7 \text{ nGy/h}$.

Este factor de conversión también se utiliza en el NUREG 1501 de la USNRC (1994) que se aplica a medidas de radiación ambiental.

El mapa 4.6. corresponde a tasa de dosis en aire. Se ha realizado a partir de los valores medios de tasa de exposición asignados a las 16.744 celdas de que consta el mapa 1/1.000.000. En el mapa de dosis absorbida en aire, se han representado aquellas zonas con tasa de dosis superior a 30 nGy/h.

Mapa 4.6. Tasa de dosis absorbida en aire. En nanogray/hora



7.6. Elaboración de mapas de tasa de dosis equivalente anual

La tasa de dosis equivalente anual puede calcularse si se conocen los hábitos de vida de la población. En este sentido se ha elaborado el mapa 4.6, realizado a partir de los valores medios de dosis absorbida en aire asignados a las 16.744 celdas de que consta el mapa 1/1.000.000.

El paso a dosis equivalente efectiva al cuerpo humano se ha realizado aplicando el factor de conversión considerado en el NUREG 1501 de la USNRC (1994), que se refiere a radiación ambiental:

$$1\text{Gy} = 0,7 \text{ Sv}$$

En la obtención del mapa se ha tenido en cuenta una hipótesis simplificadora, que está lejos de ser la que se puede presentar con mayor frecuencia. Se ha estimado la dosis al cuerpo entero procedente de la radiación gamma que pudiera recibirse en

una zona, suponiendo una exposición al aire libre durante todo el año, sin ningún tipo de protección. Esta hipótesis puede cambiarse fácilmente y adaptarse a la que cada experto considere más adecuada, y recalcular los valores utilizando la base de datos del presente proyecto.

7.7. Mapas de potencial de emisión de radón

Los mapas de potencial de emisión de radón se realizan estimando o cuantificando los factores que influyen en la emisión de radón en el aire que se indicaron en la página 36 y siguientes.

Frecuentemente no se dispone de datos y medidas suficientes. Entonces se acude a la estimación y combinación de los factores más importantes que presentan un rango normal de variación de varios órdenes de magnitud. Los más importantes son el *contenido en radio-226*, en cuanto a que representa la fuente de producción y la *permeabilidad del suelo o roca*

que favorece o dificulta que el radón pueda emitirse al aire, además se considera la humedad del suelo que actúa disminuyendo la permeabilidad del medio.

Un ejemplo aclara la influencia simultánea de estos factores. Supongamos que se ha medido la misma tasa de exposición sobre dos granitos, uno «sano» y otro «alterado». El granito «sano» tiene un potencial de emisión de radón más bajo que el granito «alterado» porque tiene una permeabilidad mucho más baja que impide el escape de radón al aire. El granito alterado presenta un mayor potencial de emisión de radón porque su mayor permeabilidad facilita la difusión del radón al aire. Si el suelo está saturado de agua la emisión de radón es mucho más baja.

De forma general, a igualdad de tasa de exposición el potencial de emisión de radón aumenta según la secuencia roca «sana» → roca fisurada → roca fracturada → roca «alterada». Naturalmente un geólogo reconoce si el tipo de alteración que presenta una roca supone un aumento o disminución de la permeabilidad.

En la elaboración de mapas de potencial de emisión de radón se considera la:

- Localización de suelos y rocas con alto contenido en uranio y por consiguiente en radio-226. Para realizar estimaciones cualitativas se utilizan datos analíticos sobre uranio, radio-226, medidas de radón en suelo y aire, mapas de aeroradiactividad y mapas de tasa de exposición.
- Localización de suelos y rocas de alta permeabilidad y contenido de radón así como zonas de fracturas de similares características. Para realizar las estimaciones de permeabilidad se utilizan mapas geológicos y mapas de suelos.

Excepcionalmente se dispone de datos suficientes para la elaboración de los mapas y por ello se acude a aquellos datos que estén disponibles. Esto hace que existan mapas de estimación de potencial de radón elaborados con diferentes criterios. En todo caso los mapas son interesantes en cuanto a que permiten definir o priorizar zonas que puedan requerir en el futuro trabajos más detallados.

Entre las rocas que pueden dar lugar a contenidos elevados de radón en el aire se encuentran:

- Determinados granitos, que a veces pueden contener más de 20 ppm de uranio.
- Algunas arcillas y pizarras negras, que pueden contener más de 200 ppm de uranio.
- Arcillas y areniscas fosfatadas con promedios de 150 ppm.
- Zonas localizadas en calizas. En las calizas no se presentan concentraciones superiores en general a 3 ppm de uranio, pero en sus zonas de fractura pueden albergar concentraciones de uranio o vías de escape de radón que den lugar a contenidos más altos.

En la práctica, tenido en cuenta que existe en la naturaleza una correlación positiva entre los contenidos de potasio, torio y uranio, puede considerarse que los contenidos bajos en radón se presentan en zonas de fondos bajos, inferiores a los 10 $\mu\text{R/h}$, y que la posibilidad de encontrar contenidos moderados aumenta en granitos y neises leucocráticos, cuando los niveles de radiación gamma total son superiores a 14 $\mu\text{R/h}$.

Como información básica⁽⁵⁶⁾ debe tenerse en cuenta que una parte por millón de uranio equivale a 0,33 pCi /g (12,21 Bq/kg) de radio-226 en equilibrio con el uranio natural y que el flujo de emisión de radón depende además del factor de emanación, de la humedad, densidad, peso específico y porosidad del suelo o de la roca. Habitualmente, el bajo potencial de emisión de radón en un área se asocia a contenidos de uranio inferiores a 2 ppm de uranio equivalente. Por encima de 9 ppm de uranio, el potencial de emisión de radón puede ser alto⁽⁵⁷⁾.

Con los datos del proyecto Marna se puede establecer una estrategia que conduzca a la priorización de estudios sobre determinadas áreas para

⁵⁶ USEPA. 520/1-87-20 Radon Reference Manual. September 1987.

⁵⁷ R. T. PEAKE. *Radon and Geology in the United States. Radiation Protection Dosimetry. Proceedings of the Fourth International Symposium on the Natural Radiation Environment*. Lisbon 1987. CONF 871208. Vol. 24 1988.

evaluar los niveles de radón. Es decir, el proyecto Marna sirve para estimar el potencial de emisión de radón del suelo y optimizar el empleo de los recursos destinados a efectuar medidas analíticas de radón. En ningún caso los datos obtenidos en el proyecto Marna sustituyen a las medidas analíticas de contenido de radón, tanto en exteriores como en interior de viviendas.

A continuación se exponen diferentes métodos de estimación del potencial de radón que no suponen medidas analíticas directas del mismo.

- **Método 1.** A partir de mapas de tasa de exposición total.

Si se dispone de mapas de tasa de exposición ($\mu\text{R/h}$), el potencial de emisión de radón se realiza estimando y valorando los diferentes factores que influyen en la emisión de radón. Estos factores están resumidos en las tablas 2.16 y 2.17.

- **Método 2.** A partir de mapas de contenido de uranio.

La estimación del potencial de emisión de radón puede realizarse combinando información del punto anterior con la siguiente metodología⁽⁵⁸⁾:

El contenido máximo de radón en la interfase suelo-aire puede calcularse a partir del contenido de radio, el factor de emanación, la densidad y la porosidad de la roca.

La fórmula para calcularlo es:

$$C_{\text{max}} = A \cdot e \cdot \rho \cdot \frac{1-p}{p}$$

Siendo:

C_{max} = concentración de radón en los espacios porosos en Bq m^3 .

A = actividad del radio-226, expresada en Bq kg^{-1} . Este valor se calcula a partir del equivalente de uranio en ppm teniendo en cuenta⁽⁵⁹⁾ que una parte por millón de uranio-238 equivale

a 0,33 pCi/g de radio-226 en equilibrio con el uranio (si se expresara en unidades del Sistema Internacional, 1 ppm, equivaldría a 12,21 Bq/kg de radio-226).

ε = factor de emanación.

ρ = densidad en kg/m^3 .

p = porosidad.

Los valores de ε , ρ^{60} y p varían según la formación geológica de que se trate.

Este método no considera el efecto de la humedad del suelo.

Concentraciones de 1 pCi/g de radio en el suelo pueden producir entre 200 y 1.000 pCi/l de radón.

- **Método 3.** A partir de datos de espectrometría gamma aérea.

Otra metodología para estimar el contenido de radón ha sido expuesta por L.P. Cui en 1990⁽⁶⁰⁾, partiendo de datos de los contenidos en potasio-40, torio natural y uranio natural en el suelo, medidos mediante espectrometría gamma aeroportada. P. Cui a partir de datos espectrométricos obtenidos mediante prospección aérea en la zona de Salt Lake, Utah (EEUU) establece que la concentración de radón que se incorpora al aire puede calcularse asumiendo que las unidades geológicas presentan uranio homogéneamente distribuido y que la concentración de radón que se incorpora a la atmósfera puede estimarse mediante la fórmula:

$$Q_{\text{Rn}} = Q_{\text{Rn}} \cdot \rho \cdot \alpha \sqrt{\lambda_{\text{Rn}} \cdot D / \eta} = 3,4 \cdot 10^7 \cdot Q_{\text{U}} \cdot \rho \cdot \alpha \sqrt{\lambda_{\text{Rn}} \cdot D / \eta}$$

En la que:

Q_{Rn} = concentración de radón en la unidad geológica en Ci/cm^3 .

Q_{Rn} = concentración de radio en la unidad geológica expresado en g/g.

Q_{U} = concentración de uranio en la unidad geológica expresado en g/g.

⁽⁵⁸⁾ Radon Book. Measures against Radon. B. Christensjö. G. Akerblom. 1989.

⁽⁵⁹⁾ USEPA. 520/1-87-20, Radón Reference Manual. September 1987

⁽⁶⁰⁾ J. P. Cui. «Radiometrics Methods in Regional Radon Hazard Mapping». Nuclear Geophysics. Vol. 4, nº 3, 1990.

- ρ = densidad de la roca en g/cm³.
 α = coeficiente de emanación.
 η = porosidad de la roca.
 D = coeficiente de difusión en cm²/s.
 λ_{Rn} = constante de desintegración del radón en s⁻¹.

Actualmente, se está realizando un estudio sobre una zona de unos 2.000 km² para la que existe información geológica suficiente y se dispone de medidas reales del contenido de radón en el aire. En ella se aplicarán las metodologías antes descritas para contrastar los valores obtenidos con cada método.

7.8. Mejora en el conocimiento de los fundamentos de la protección radiológica aplicada a las radiaciones de bajo nivel

Los fundamentos de la protección radiológica actual están casi exclusivamente basados en el estudio de los efectos de niveles altos de radiación sobre los supervivientes a los bombardeos de Hiroshima y Nagasaki y sobre pacientes que recibieron grandes dosis de radiación como parte de un tratamiento médico. A partir de estos datos se realiza una extrapolación lineal para estimar los efectos correspondientes a dosis bajas⁽⁶¹⁾.

Como consecuencia, se suele aplicar un modelo lineal sin umbral, que es aceptado por la mayor parte de la comunidad científica. El modelo cubre el rango de radiación correspondiente a dosis altas, superiores en más de 100 veces a los fondos naturales, hasta la dosis nula.

Esta hipótesis de modelo lineal sin umbral, se ha adoptado ante la imposibilidad de demostrar la existencia de un umbral para expresar cuantitativamente el efecto asociado a las dosis bajas (o exposición-riesgo). Por ello, la protección radiológica actual está basada en una actitud prudente que consiste en considerar que tal umbral no existe.

Ahora bien, esta hipótesis sin umbral implica que no es posible un riesgo cero cuando se esté expuesto a la radiación ionizante.

Las consecuencias de esta hipótesis son, que se establecen límites que restringen los incrementos de dosis y no las dosis totales recibidas por los individuos. Habitualmente se aplica para el público en general el valor 1 mSv/año para prácticas controladas y autorizadas en instalaciones nucleares, que es una fracción de la dosis recibida en zonas de fondo natural elevado, como sucede en algunas zonas de Finlandia, Reino Unido, Francia o Suecia, donde incluyendo la exposición al radón, la dosis puede alcanzar los 7 mSv/año.

Otros miembros de la comunidad científica opinan que el modelo lineal sin umbral es irreal, puesto que el nivel cero de radiación no existe en la naturaleza y porque las extrapolaciones de los efectos de dosis altas a las dosis bajas no parecen creíbles. Así, aplicando este modelo sobre una población de 300 millones de personas, que recibieran 1 mSv/año, se estimaría que el número de cánceres tardíos que se producirán sería de 10.000, cuando la realidad es que se producen más de 600.000, causados por más de 300 agentes carcinógenos conocidos, sin que sea posible discriminar su origen⁽⁶²⁾.

A estos planteamientos se une el debate generalizado de los efectos potenciales sobre la salud asociados a la exposición a dosis débiles. Se enfrentan partidarios y oponentes siempre con los mismos argumentos, sin que los expertos hayan podido desapasionar el debate y desarrollar actitudes responsables. Se hacen, por una parte, discursos que pretenden que cualquier incremento de los niveles de exposición es siempre peligroso y curiosamente utilizan como parte de su argumentación el modelo lineal sin umbral que se aplica en protección radiológica. Otros, siempre pretenden que existe una ausencia de riesgo para las dosis débiles y sin embargo también aplican el modelo lineal sin umbral.

⁽⁶¹⁾ Realidades en torno a las radiaciones de bajo nivel. División de información pública. OIEA. 1989.

⁽⁶²⁾ M. ROSEN. «A no Regret Approach to Low Level Radiation Risk». *Radiation and Society*. First annual Symposium. The Uranium Institute. 1995.

Un número cada vez mayor de la comunidad científica piensa que existe un umbral por debajo del cual las radiaciones ionizantes no tienen un efecto reconocido sobre la salud y que nunca se ha demostrado de manera irrefutable la existencia de tales efectos. Otros incluso piensan que existe un efecto beneficioso de las radiaciones de bajo nivel.

En el fondo de toda la discusión yace el que nunca se ha demostrado la existencia o no de efectos perjudiciales o beneficiosos de las dosis bajas de radiación, ni la existencia o no de un umbral por debajo del cual no se producen efectos y también el que no se han realizado estudios epidemiológicos que comprendan grandes muestras de población. Por ello la comunidad internacional estimula, a través de las directrices contenidas en los programas marco de investigación, la realización de estudios para conocer los riesgos asociados a la radiación natural, con el objeto de fundamentar mejor la protección radiológica para dosis bajas.

El proyecto Marna suministra información sobre el rango de variación de la radiación gamma natural procedente del suelo en nuestro país, cuantifica la misma y sitúa los valores geográficamente: es decir, permite estimar la exposición total recibida por un individuo conociendo los lugares en que habitó. Si además se conocen los hábitos de vida, podría estimarse la exposición y dosis total recibida. Si estos datos se asocian a estudios epidemiológicos, puede mejorarse sustancialmente el conocimiento de los efectos de las bajas dosis de radiación.

8. Futuro

Entre las previsiones relativas al proyecto figura:

- La realización de medidas de tasa de exposición sobre aquellas zonas donde no existe una red suficiente de datos. Actualmente existe información detallada sobre 380.000 km².
- La edición de mapas provinciales a escala detallada comprendida entre 1/200.000 y 1/500.000.
- Facilitar la gestión de la base de datos.
- Incrementar la difusión del proyecto.

9. Agradecimientos

Los autores de esta memoria expresan su agradecimiento a cuantos han participado directamente en la realización del proyecto Marna, especialmente a Joaquín Botas Medina (Enusa) y a Adolfo Domínguez Vega, Aitor Quintana Uribe, Antonio Hurtado Bezos, Luis C. Blasco Gómez y Daniel Varo Jiménez y Antonio Blázquez Ceballos becarios de la SEPI asignados al proyecto Marna y a quienes han facilitado la gestión informática de los datos obtenidos en el proyecto, especialmente a Jesús Alegría Alonso, Juan P. García Cadierno y Enrique Meléndez Asensio todos ellos del CSN y Teófilo Concha Sánchez, de Enusa y además a:

Consejo de Seguridad Nuclear (CSN)

- Antonio Gea Malpica. Director general de Seguridad Nuclear.
- Ignacio Lequerica Pérez. Director general de Protección Radiológica.
- Antonio Acha Aracama. Subdirector de Emplazamientos y Programas de Cooperación entre 1991 y 1995.
- Eugenio Gil López. Subdirector general de Protección Radiológica Ambiental.
- J. Ignacio Villadoniga Tallón. Subdirector general de Tecnología Nuclear.
- Antonio Jiménez Juan. Jefe del Área de Ciencias de la Tierra.
- Gustavo López Ortiz. Secretaría Técnica.

Enusa

- Francisco Marín Blanco. Ingeniero de Minas.
- Javier Delgado Iglesias.
- Antonio López Romero. Medio Ambiente y Protección Radiológica.
- Mariano Durán Cabello. Gerencia de Medio Ambiente.
- J. María Josa García. Químico.

Universidad de Salamanca

- M^a Luisa Cambranos Pérez. Profesora del Departamento de Geología.
- Agustina Fernández Fernández. Profesora del Departamento de Geología.

- Andrés García Luis. Profesor del Departamento de Geología.
- Elena Sánchez. Becaria de investigación.
- Margarita Gil Acero. Becaria de investigación.
- José María Montero Gómez. Becario de investigación.
- Vicente Alfageme. Becario de investigación.
- Miguel Ángel Herrero Rodríguez. Becario de investigación.
- Jesús Cordero Zarza. Becario de investigación.
- Jesús Sánchez Sánchez. Becario de investigación.

Universidad Politécnica de Extremadura

- Cabello Requena. Profesor y director del Departamento de Informática.
- Berjoto Tomás. Profesor del Departamento de Informática.

Universidad de Extremadura

- C. Miró. Profesor del Departamento de Física.
- J. M. Paniagua. Profesor del Departamento de Física.

Xunta de Galicia

- José Francisco Alonso Picón. Director xeral de Protección Civil.
- Protección Civil. Apoyo logístico.

10. Publicaciones sobre el proyecto Marna

Publicaciones anteriores a 1996:

- BAEZA, A., PANIAGUA, J. M.; SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Determination of the Dose Rate from External Irradiation. Geological Considerations in Sampling Optimization*. J. Environ. Radioactivity. Vol. 34, nº 1. (1996).
- BAEZA, A., PANIAGUA, J. M., *Estudio comparado de dos métodos para la evaluación de los niveles de tasa de dosis ambientales en la provincia de*

Cáceres. Enusa. Departamento de Física de la Universidad de Extremadura, 1994.

- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Proyecto Marna (Mapa de Radiación Natural y Dosimétrico de España)*. Reunión anual de la Sociedad Nuclear Española. Cáceres, 1994.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Use the Uranium Airborne Survey Data in the Preparation of Radiometric Map of Spain*. (Marna Project). IAEA-TECDOC 827. Viena. October, 1995.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *The Radiometric Map of Spain*. IX Congreso Mundial de Minería y Siderurgia. León, 1994.
- *El Mapa de Radiación Natural y Dosimétrico de España*. Revista de la Sociedad Española de Protección Radiológica. Madrid, 1994.

Publicaciones realizadas en 1996

- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Correlation between natural gamma radioactivity and the geological environment in Salamanca province (Spain)*. IAEA. Technical Committee meeting on the use of uranium exploration and techniques in environmental studies. Viena/96.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Natural Gamma Radiation Map of Spain on the scale 1:1.000.000 (The Marna Project)*. IAEA. Technical Committee meeting on the use of uranium exploration and techniques in environmental studies. Viena/96.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Proyecto Marna (Mapa de Radiación Gamma Natural de España)*. SNE 31 de mayo de 1996.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Proyecto Marna (El Mapa de Radiactividad Gamma Natural de España)*. Esiratos. Otoño 96.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Determination of the dose rate from external irradiation. Geological considerations in sampling optimization*. J. Environ. Radioactivity. Vol. 34, nº 1. Elsevier 1996.

Publicaciones realizadas en 1997

- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Correlaciones entre geología y radiometría en el oeste peninsular. IV Reunión de Geología do Oeste Peninsular*. Pág. 257-263. 16-29 Sept. 1997. Univ. de Tras-os-Montes e Alto Douro. Vila Real. Portugal.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *El Proyecto MARNA. Mapa de Radiación Gamma Natural de España a escala 1:1.000.000*. Industria y Minería núm. 330. Agosto 1997. Pág. 23-30. Madrid. Consejo Superior de Colegios de Ingenieros de Minas de España.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Mapa de Radiación Gamma Natural de España. Caracterización radiométrica de diferentes tipos de superficies*. International Conference held in Seville, Spain. 17-21 Nov. 1997. Low doses of ionizing radiation. IAEA-TECDOC-976. Pág. 591-594.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Radiometría de las principales formaciones geológicas de la Comunidad Autónoma Gallega*. La Coruña. 23 Reunión Anual de la Sociedad Nuclear Española. 5-7 Nov. 1997. Pág. 21 Abstract.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Resultados y aplicaciones del Proyecto MARNA. Seguridad Nuclear*. Rev del CSN/Año 1/nº4, III Trimestre 1997. Pág. 15-22.

Publicaciones realizadas en 1998

- SUÁREZ, E.; FERNÁNDEZ, J. A.; M^a. C. MORO, J. BOTAS; *Algunas respuestas radiométricas de las formaciones geológicas del Macizo Hespérico*. Studia Geológica Salamanticensia. Vol. 33. pág. 41-58.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Las respuestas radiométrica y magnética del gran dique dolerítico de Plasencia*. X Congreso Internacional de Minería y Metalurgia. Valencia. 1998. Vol. 2, pág. 33-51.

Publicaciones realizadas en 1999

- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *Variations in natural background gamma irradiation throughout Spain. International conference. The effects of low and very low doses of ionizing radiation on human health*. World National Council, University of Versailles. St. Quentin en Yvelines. France. Páginas 12, en el original. En Prensa.
- SUÁREZ MAHOU, E.; FERNÁNDEZ AMIGOT, J. A.; *La radiación gamma natural en España*. Revista: Radioprotección. Sociedad Española de Protección Radiológica. Senda Editorial, SA. Páginas: 25 a 33.

11. Referencias bibliográficas

- AKERBLOM, G.; *The use of airborne radiometric and exploration survey data in radon risk mapping*. OIEA. Viena, 1993.
- G. AKERBLOM, J. LINDGREN. *Mapping of groundwater radon potential*. TCM, Viena, May 1996.
- P. ANGSIWATHANA, P. CHOTIKANAKIS. *Background radiation map of Thailand*. TCM, Viena, May 1996.
- Atlas of Natural Radiation Levels in the European Communities*. Phase II. Final Report. Nov 1988, CEC Contract Nr 85.420.
- K. BALL. *The role of house surveys in geological radon potential mapping*. TCM, Viena, May 1996.
- BALL, T. K.; CAMERON, D. G.; COLMAN, T. B.; ROBERTS, P. D.; *The use of uranium exploration data for mapping radon potential in the U.K.* OIEA. Viena 1993.
- D. BARISIC, S. LULIC, E. PROHIC, M. CULINOVIC. *Spatial distribution of ⁴⁰K, ²²⁸Ra, ²²⁶Ra, ²³⁸U and ¹³⁷Cs in surface soil layer observed at small areas*. TCM, Viena, May 1996.
- F. BARTHEL, V. THOSTE, K. H. BORDORF. *The distribution of radionuclides in the upper soil horizons in Lower Saxony, Saxony and Thuringia, Germany*. TCM, Viena, May 1996.

- CERRAJERO, J. *Investigación de minerales radiactivos en España mediante prospección aérea*. Tesis doctoral. ETSIM. Madrid. 1973.
- CLAVENSJÖ, B., AKERBLÖM, G. *Radon Book*. Swedish Council for Building Research. 1989
- CH. BOURGEOIS, J. BRESSON, Th. CHIFFOT, J. C. KRUATICH, L. GUILLOT, C. BERGEY. *Use and results of aerial gamma mappings system during the international exercise Resume 95 in Finland*. TCM, Viena, May 1996.
- M.N.S. DAUD. *Natural background radiation in Jordan*. TCM, Viena May 1996.
- A. G. DARNLEY. *Uranium exploration data and global geochemical baselines: the need for coordinated action*. TCM, Viena, May 1996.
- EPA 520/1-87-20. *Radon Reference Manual*. United States. Environmental Protection Agency. 1987
- GARZÓN RUIPEREZ, L. *El radón y sus riesgos*. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Oviedo. 1992.
- GRASBY, R. L.; *Environmental monitoring by airborne gamma-ray spectrometry experience at the Geological Survey of Canada*. OIEA. Viena 1993.
- GUNDERSEN, L. C. S.; OTTON, J. K.; REIMER, G. M.; DUVAL, J. S.; *Use of uranium exploration data for radon potential assesment in the US* OIEA. Viena, 1993.
- JABELL. *Some environmental aspects of the resulted radiometric maps of uranium exploration and radon investigations in Syria*. TCM, Viena, May 1996.
- M. MATOLIN. *Terrestrial gamma dose rate maps, their compilation and verification-radiometric map of the Czech Republic*. TCM, Viena, May 1996.
- M. MATOLIN, G. SIDERIS. *Terrestrial radiation-a project for Cental and Eastern Europe*. TCM, Viena, May 1996.
- Medidas de radón en viviendas españolas: Caracterización de sus fuentes*. Colección Otros Documentos 6.1998. Consejo de Seguridad Nuclear. 1998.
- M. MILOJEVIC, V. STRUMBERGER. *Environmental monitoring system based on airborne gamma-ray spectrometry developed in geoinstitut Beograd*. TCM, Viena, May 1996.
- MORO, M'. C.; PÉREZ DEL VILLAR, L.; *Estudio de la distribución de K, U, y Th en el batolito de Cabeza de Araya mediante prospección aéreo radiométrica. Implicaciones petrogenéticas y metalogenéticas*. Libro Jubilar de Figuerola L. D. Omega Madrid. 1988.
- J. NOVÁK, R. SMETANA. *The dispersion of radon in the Stráz-Hamr area in the Czech Republic as an effect of uranium mining and connected activities*. TCM, Viena, May 1996.
- B. PAVLIK, F. BOTTOS. *Airborne and truckborne «radiation footprintins» of areas producing, storing, using or being exposed to nuclear materials* TCM, Viena, May 1996.
- QUINDÓS, L. S., SOTO, J., FERNÁNDEZ, P., ARTECHE, J. y VILLAR, E. *Radón, principal fuente de radiación natural*. Revista Española de Física, 1989
- QUINDÓS, L. S., SOTO, J. FERNÁNDEZ, P., SOTO, J., RÓDENAS, C., GÓMEZ J., *Natural Radioactivity in Spanish Soils*. Health Physics. February 1994, Volume 66, Number 2.
- QUINDÓS, L. S., SOTO, J. FERNÁNDEZ, P., SOTO, J.; *Exposure to natural sources of radiation in Spain*. Int. Conf. on implications of the new ICRP recomendations on radiation protection, practices and interventions. Salamanca 26 nov 1991. Ciemat. Madrid. 1992.
- QUINDÓS, L.S., SOTO, J. FERNÁNDEZ, P. *Exposure to Natural sources of Radiation in Spain*. Nuclear Traks Radiation Measures. Vol. 21, n° 2, pp. 295-298. 1993.
- QUINDÓS, L. S., SOTO, J. FERNÁNDEZ, P. *Dosis de radiación debidas al radón en España*. Radioprotección, n° 2, 1993.
- Review of Mineralogy n° 38. *Uranium*. Mineralogical Society of America, 1999.
- RÓDENAS PALOMINO C. *Estudio de las fuentes de radiación en España: estimación de dosis a la población*. Memoria presentada para optar al grado de doctora en físicas. Universidad de Cantabria 1996.
- G. RUHRMANN, M. SCHAUER, R. GATZWELER. *Airborne gamma anomalies in the Elbe Valley near Königstein*.

Germany-origin and variation with time. TCM, Viena, May 1996.

L. RYBACH, G. F. SCHWARZ, F. MEDIGL. *Construction of radioelement and dose rate baseline maps by combining ground and airborne radiometric data.* TCM, Viena May, 1996.

S. SAAD. *The use of uranium exploitation techniques in the selection of a candidate site for Cs-137 radioactive waste from the Goiânia accident.* TCM, Viena, May 1996.

V. STRUMBERGER, A. STRUMBERGER, M. MILOJEVIC. *Some practical aspects of computer processing of uranium exploration data for environmental purposes.* TCM, Viena, May 1996.

SUÁREZ MAHOU, E. F., AMIGOT, J. A. *Correlation between natural gamma activity and the geological means in the province of Salamanca.* TCM, Viena, May 1996.

SUÁREZ MAHOU, E. F., AMIGOT, J. A. *The MARN Project.* TCM, Viena, May 1996.

R. STRZELECKI, S. WOLKOWICZ, P. LEWANDOWSKI. *Mapping of post-Chernóbil environmental pollution in Poland.* TCM, Viena, May 1996.

L.M. TORRES, MARQUEZ DE CARVALHO, I. RORIZ, LEOTE DO REGO. *Utility of the natural radioactivity map of Portugal.* TCM, Viena, May 1996.

TORRES, L.M. *The natural radioactivity map of Portugal: Baseline information on natural radioactivity background.* OIEA, Viena, 1993.

D. VULKAN, H. SHIRAV. *Radiometric maps of Israel: partial contribution to the understanding of potential radon emanations.* TCM, Viena, May 1996.

W. ZAHOROUSKI, S. WHITTLESTONE. *Application of sensitive and supersensitive radon detectors for radon flux density and radon concentration environmental monitoring.* TCM, Viena, May 1996.

P. ZETTWOOG, S. BERNHARD, Y. VAUZELLE. *Use of isotopic signature of radionuclides released from uranium mines and mills to discriminate low levels of environmental impact against natural background levels.* TCM, Viena, May 1996.

MAPAS PROVINCIALES DE
TASA DE EXPOSICIÓN

5

Utilización de los mapas

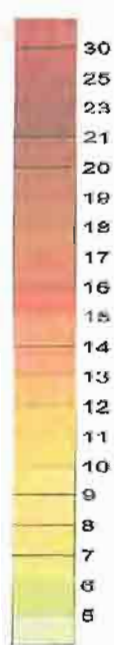
Los mapas de tasa de exposición a escala 1/1.000.000 que se presentan a continuación no deben considerarse definitivos; corresponden a los datos disponibles en diciembre de 1999, ya que el proyecto Marna no está concluido. Esta publicación no contiene información sobre las Islas Baleares y Canarias. Está previsto que al concluir la cuarta y última fase del proyecto Marna se incluirá información sobre tasa de exposición y dosis debidas a la radiación gamma natural en las citadas islas y en Ceuta y Melilla. La rejilla utilizada en la producción de los mapas es la indicada en el texto precedente, páginas 71 y 72.

El método de interpolación utilizado ha sido el del cuadrado de la distancia.

A efectos de cálculo de dosis debida a la radiación gamma natural se ha estimado que puede deducirse con una precisión de 0,2 milisievert año con los datos actualmente disponibles.

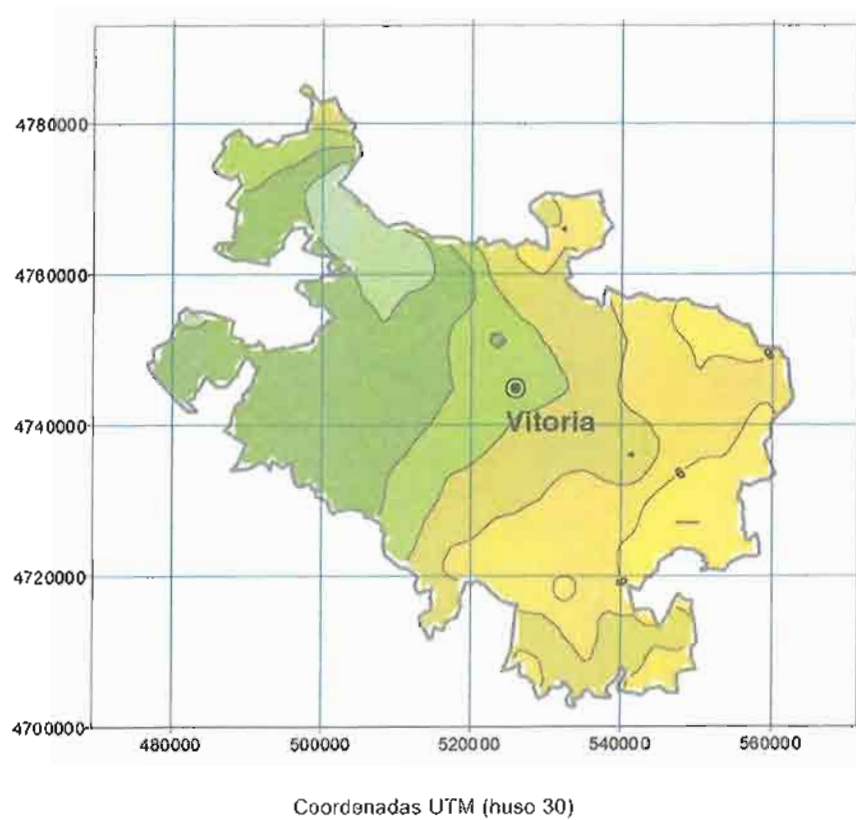
Representación de los valores de tasa de exposición

En la elaboración de estos mapas se ha seguido siempre el mismo criterio. Los valores de tasa de exposición a la radiación gamma natural se han basado en 620.000 datos y están representados de acuerdo con la escala siguiente:

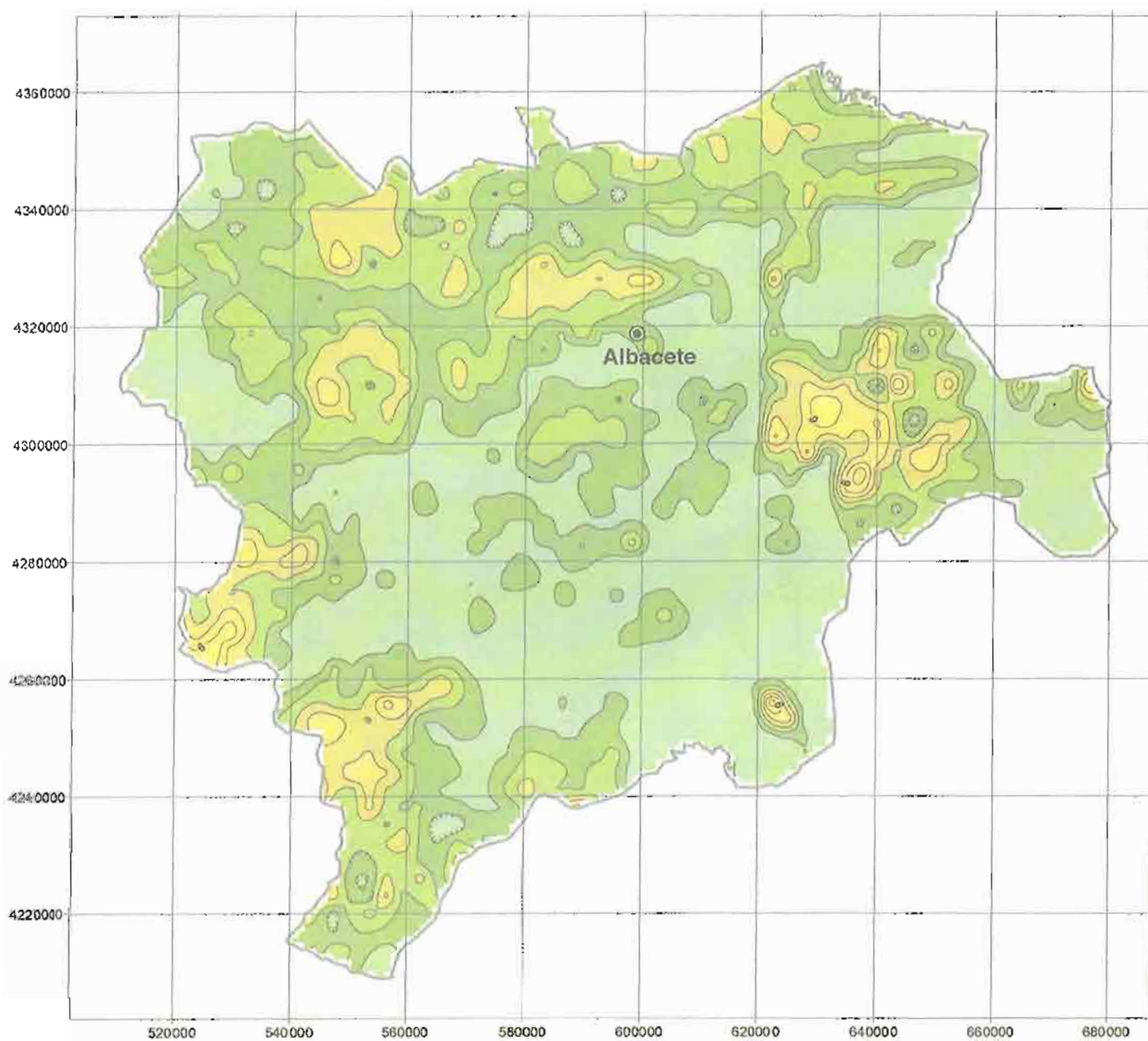


microR/hora

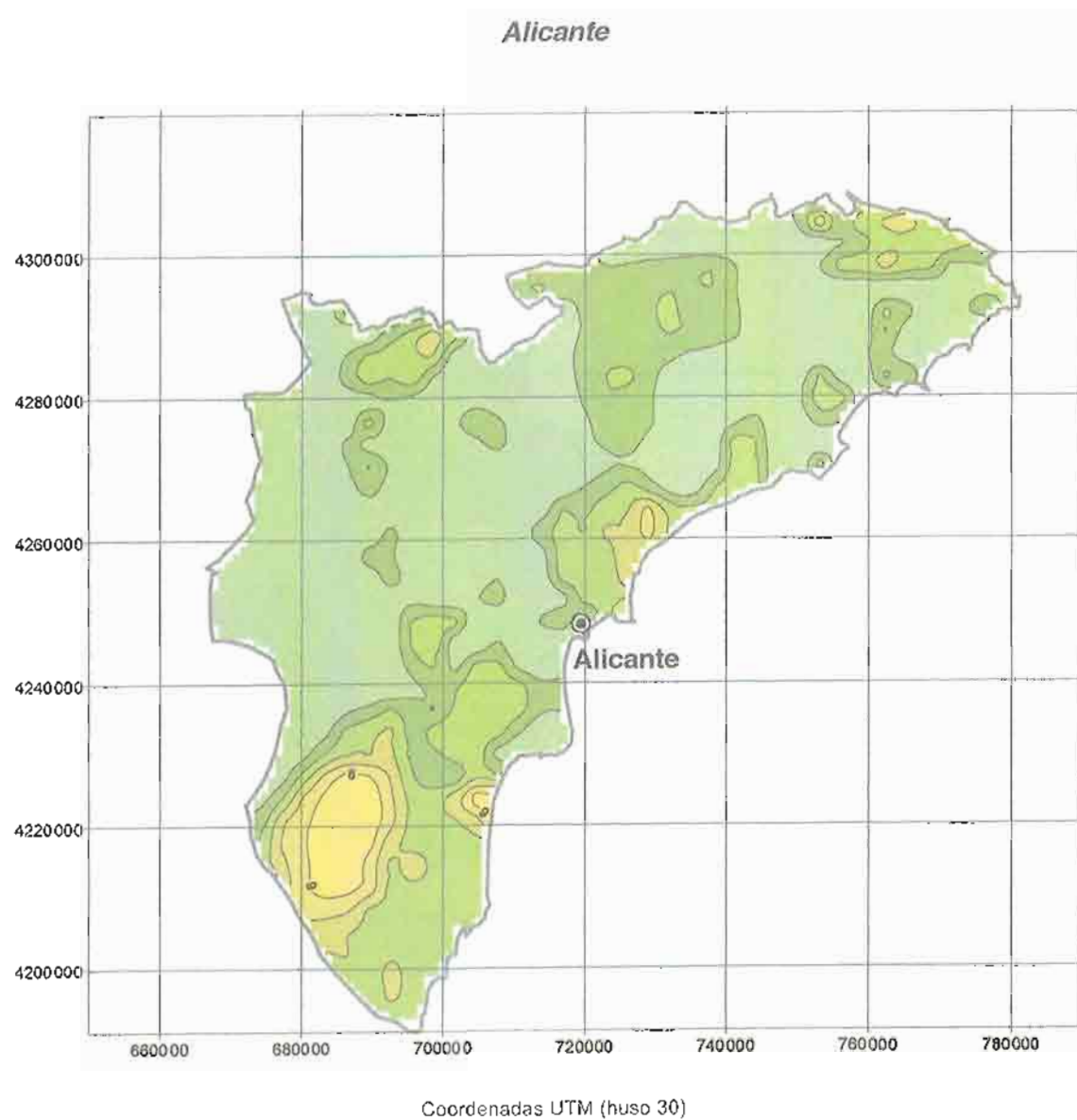
Álava



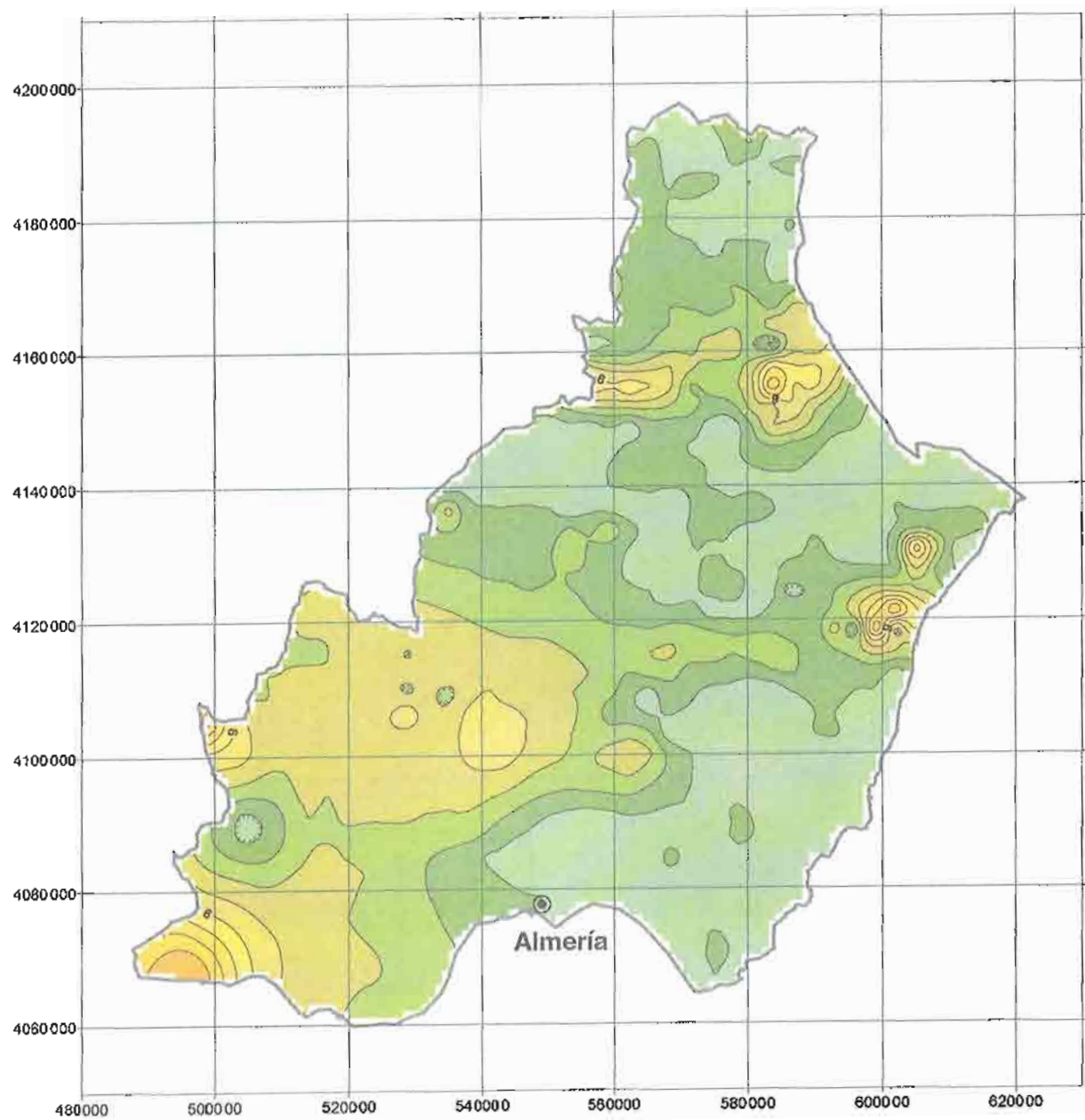
Albacete



Coordenadas UTM (huso 30)

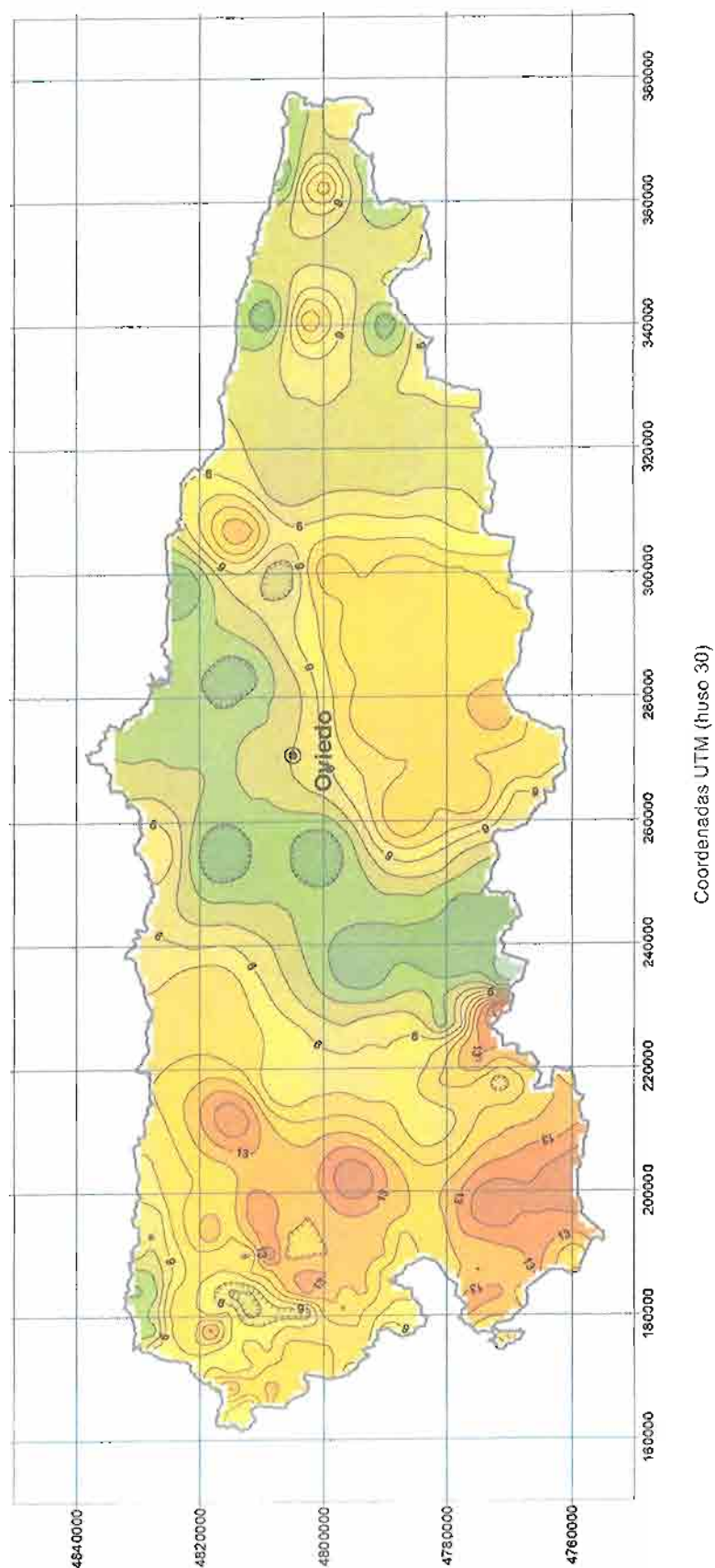


Almería

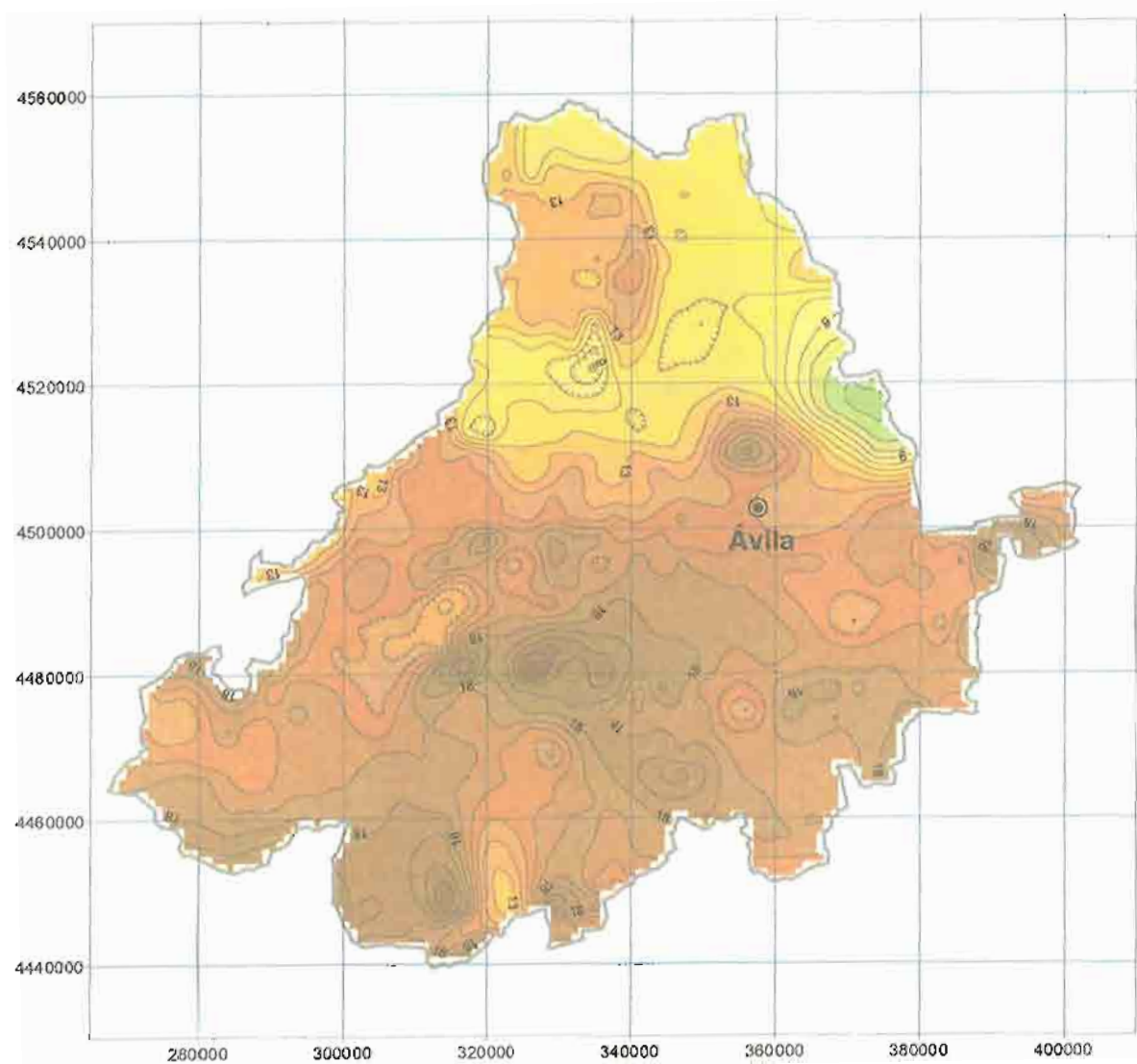


Coordenadas UTM (huso 30)

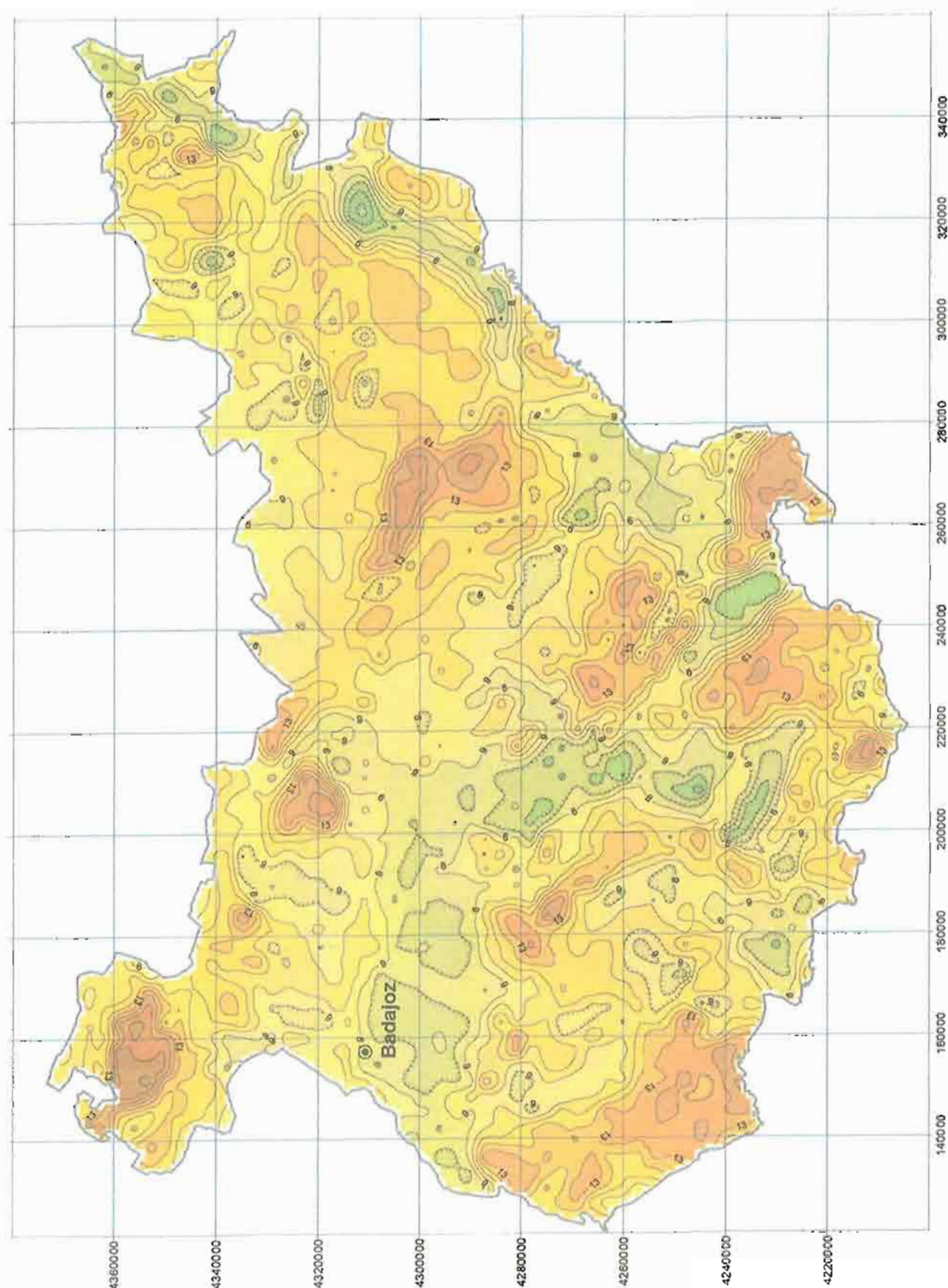
Asturias



Ávila

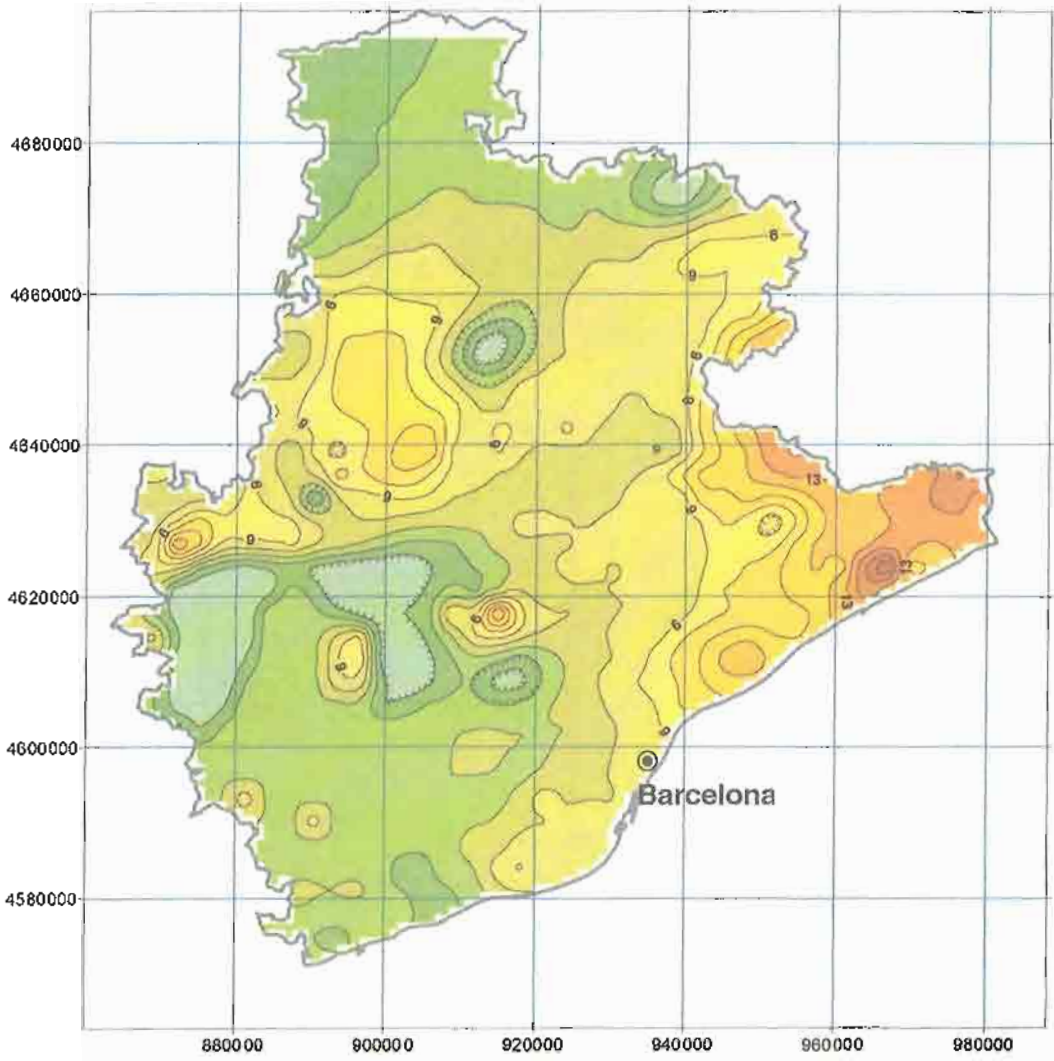


Coordenadas UTM (huso 30)



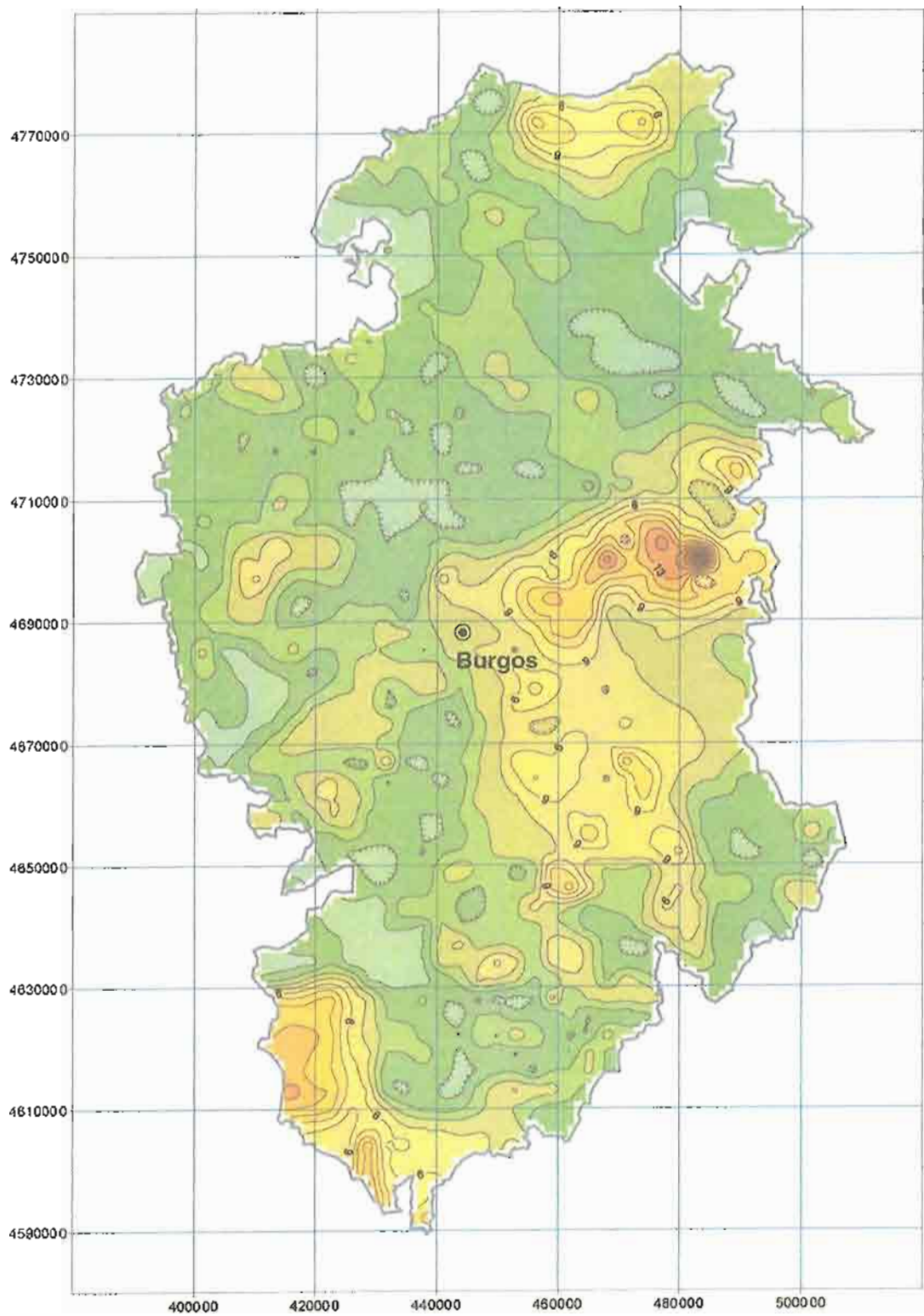
Coordenadas UTM (huso 30)

Barcelona



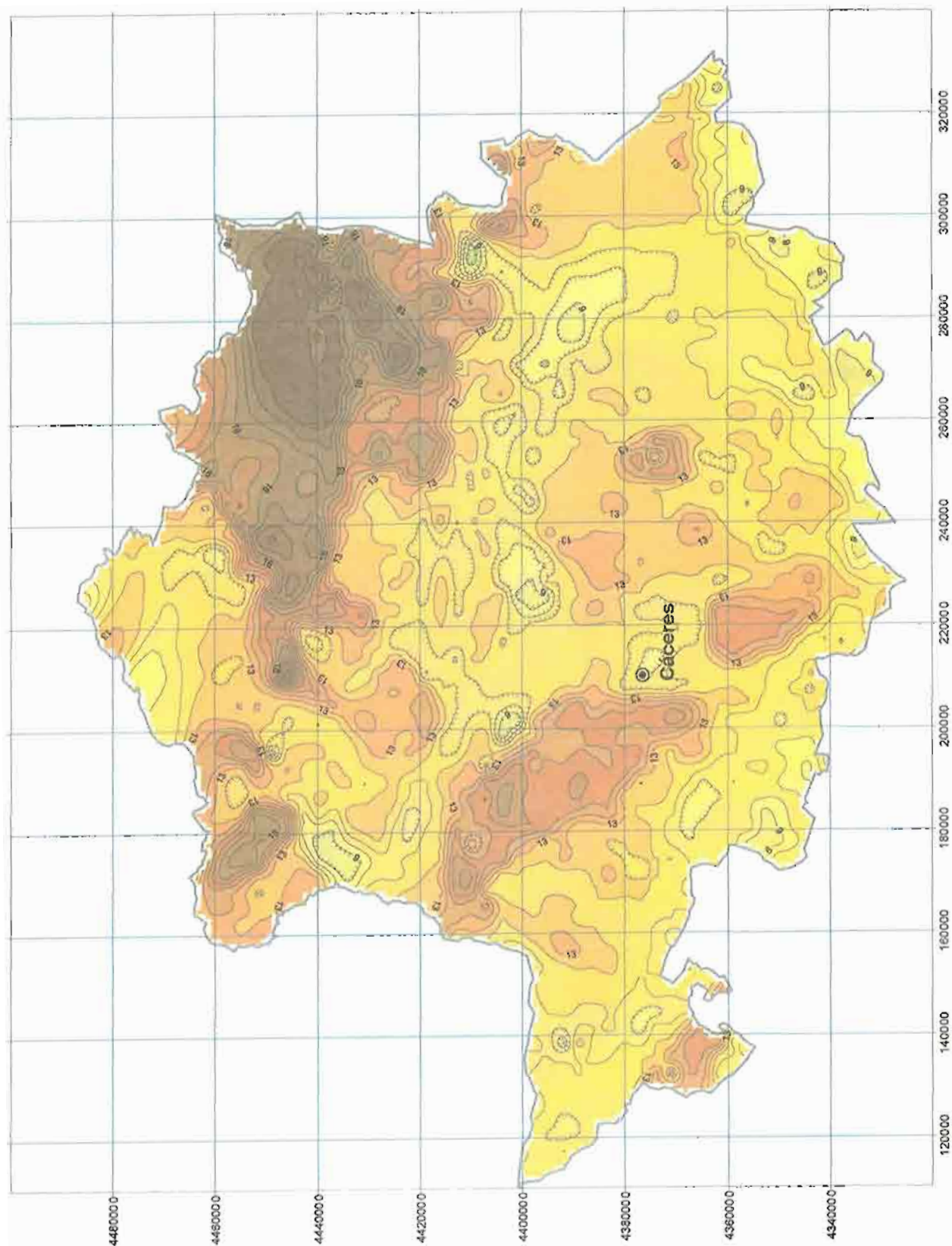
Coordenadas UTM (huso 30)

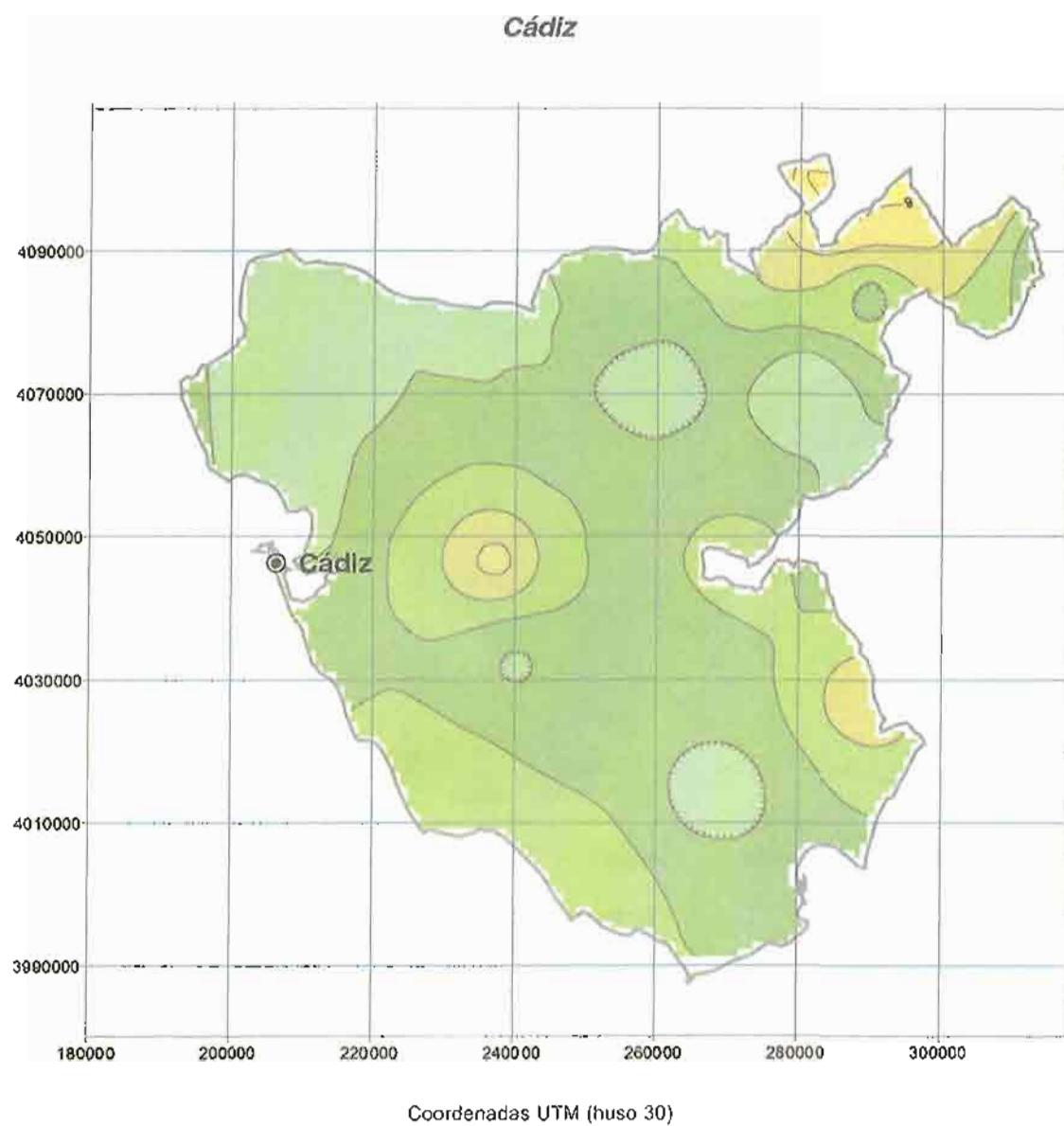
Burgos



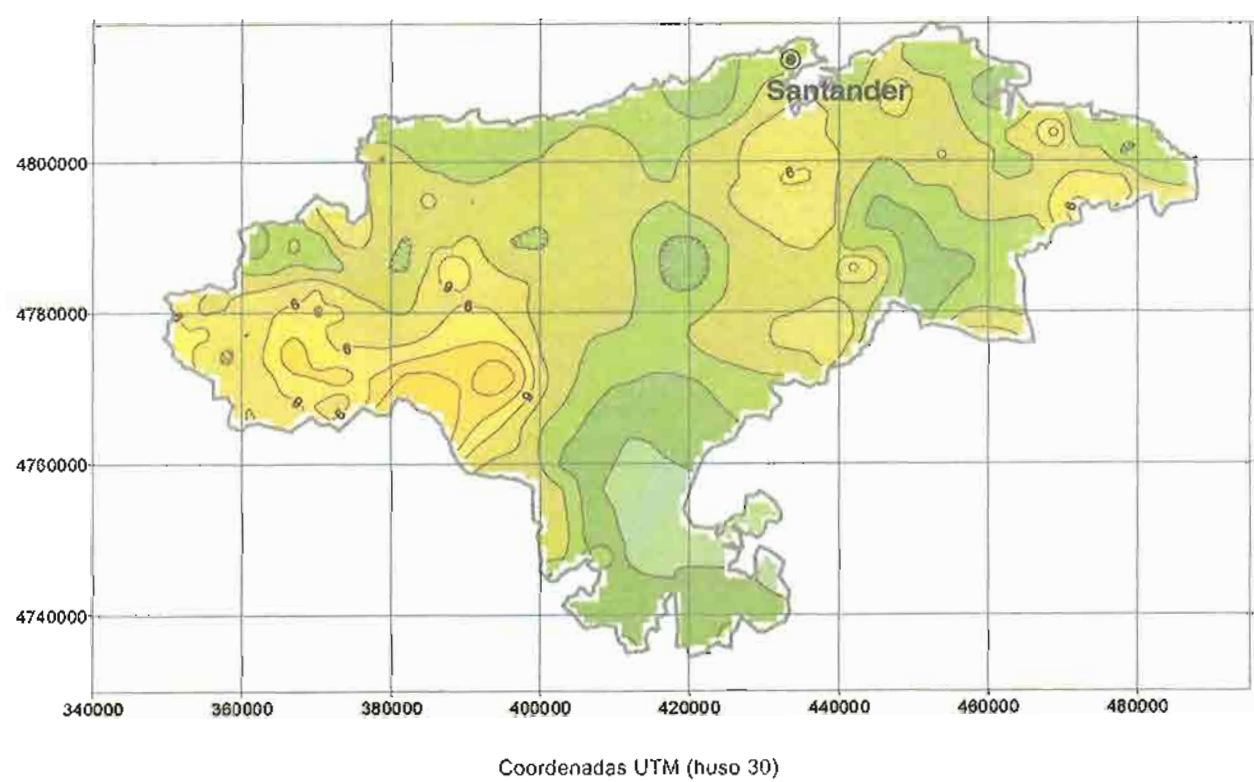
Coordenadas UTM (huso 30)

Cáceres

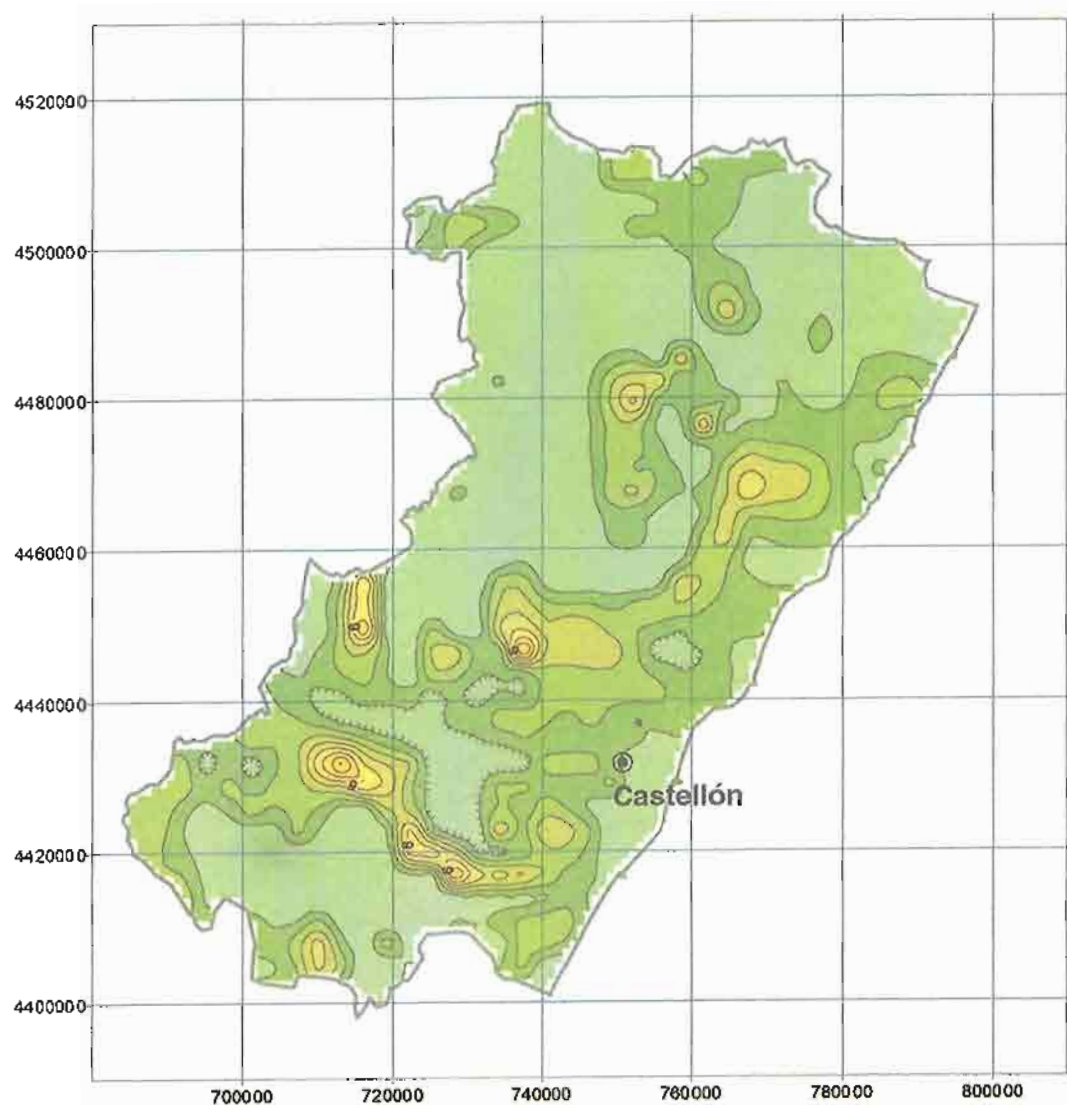




Cantabria

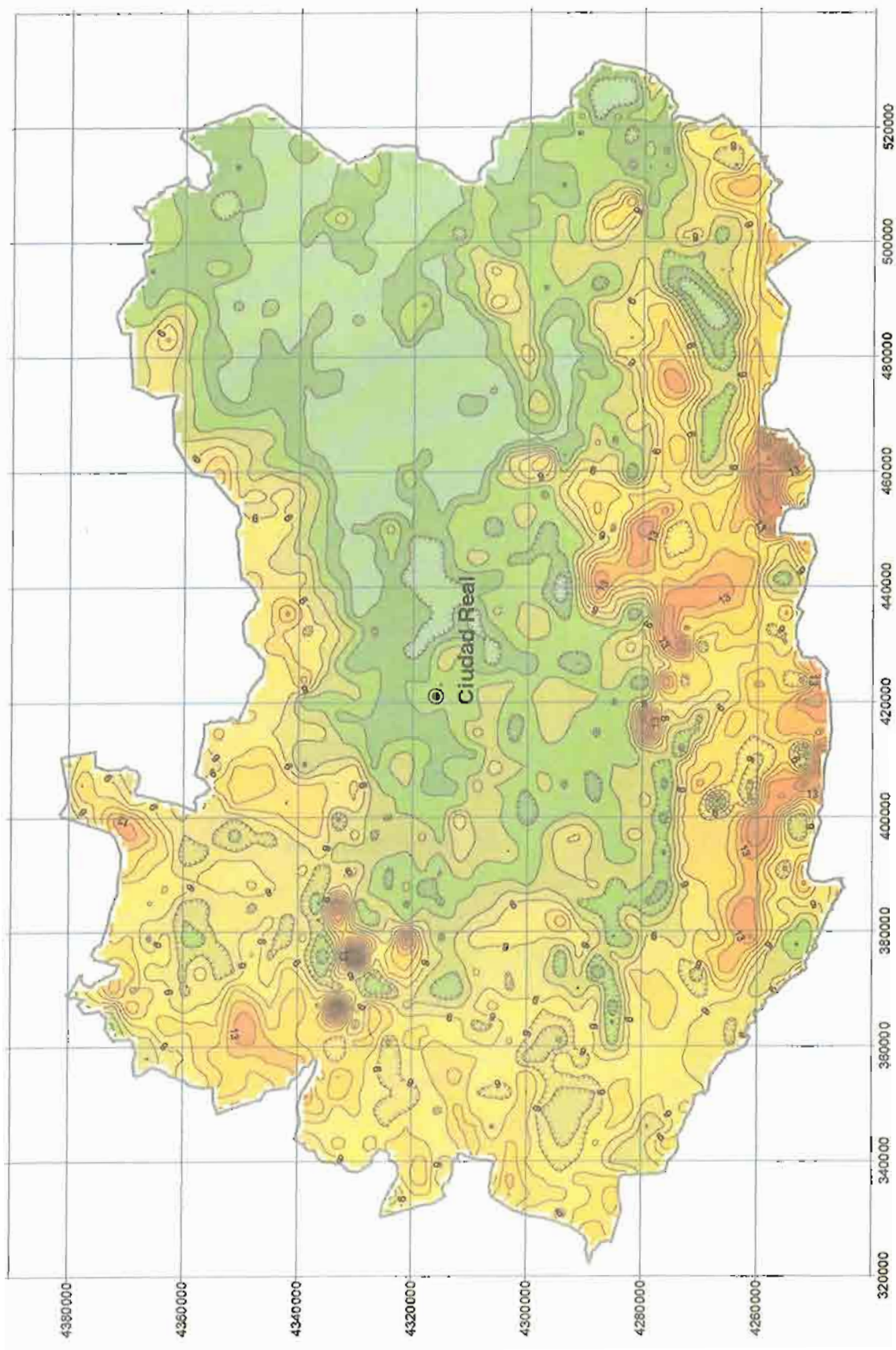


Castellón



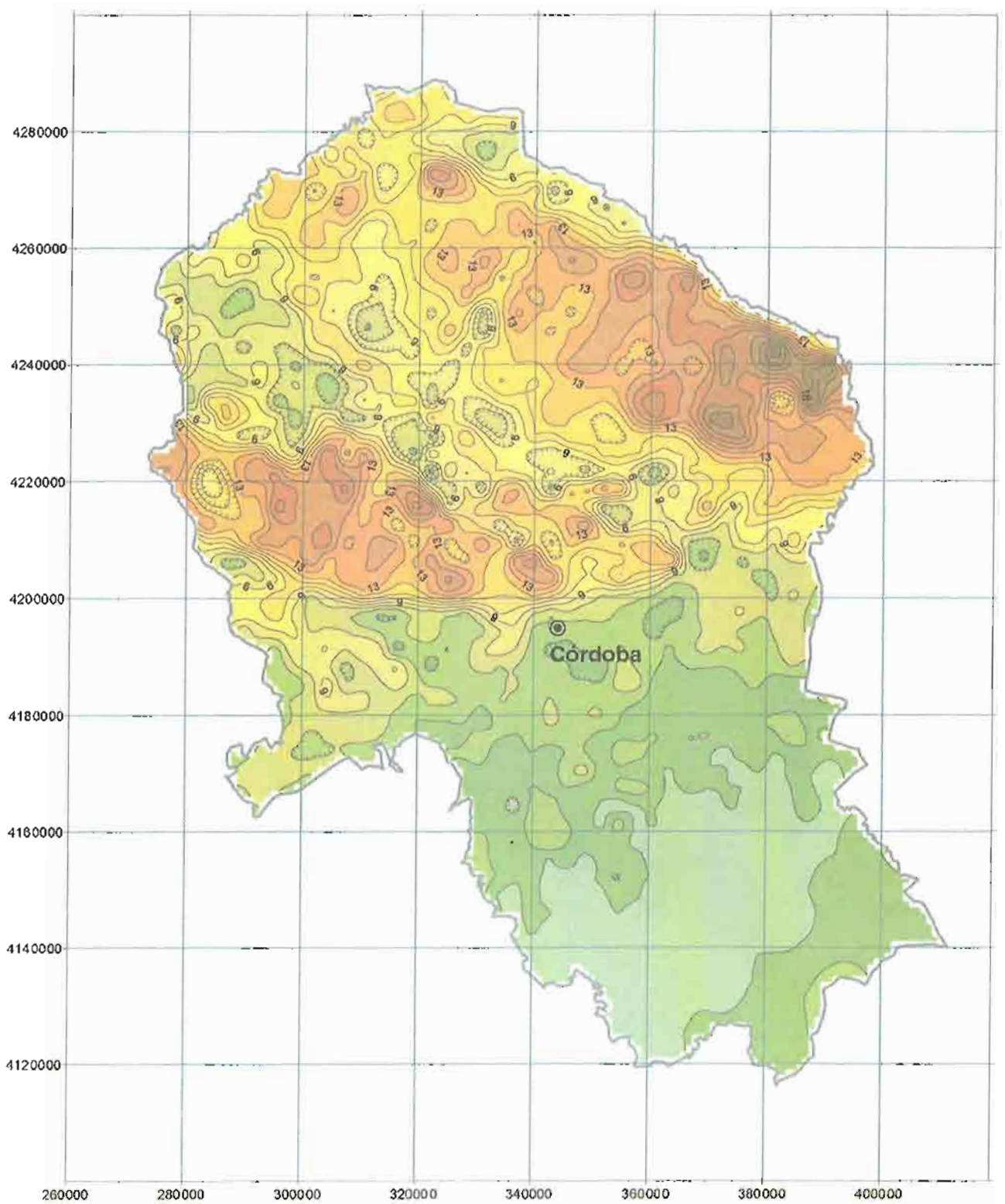
Coordenadas UTM (huso 30)

Ciudad Real



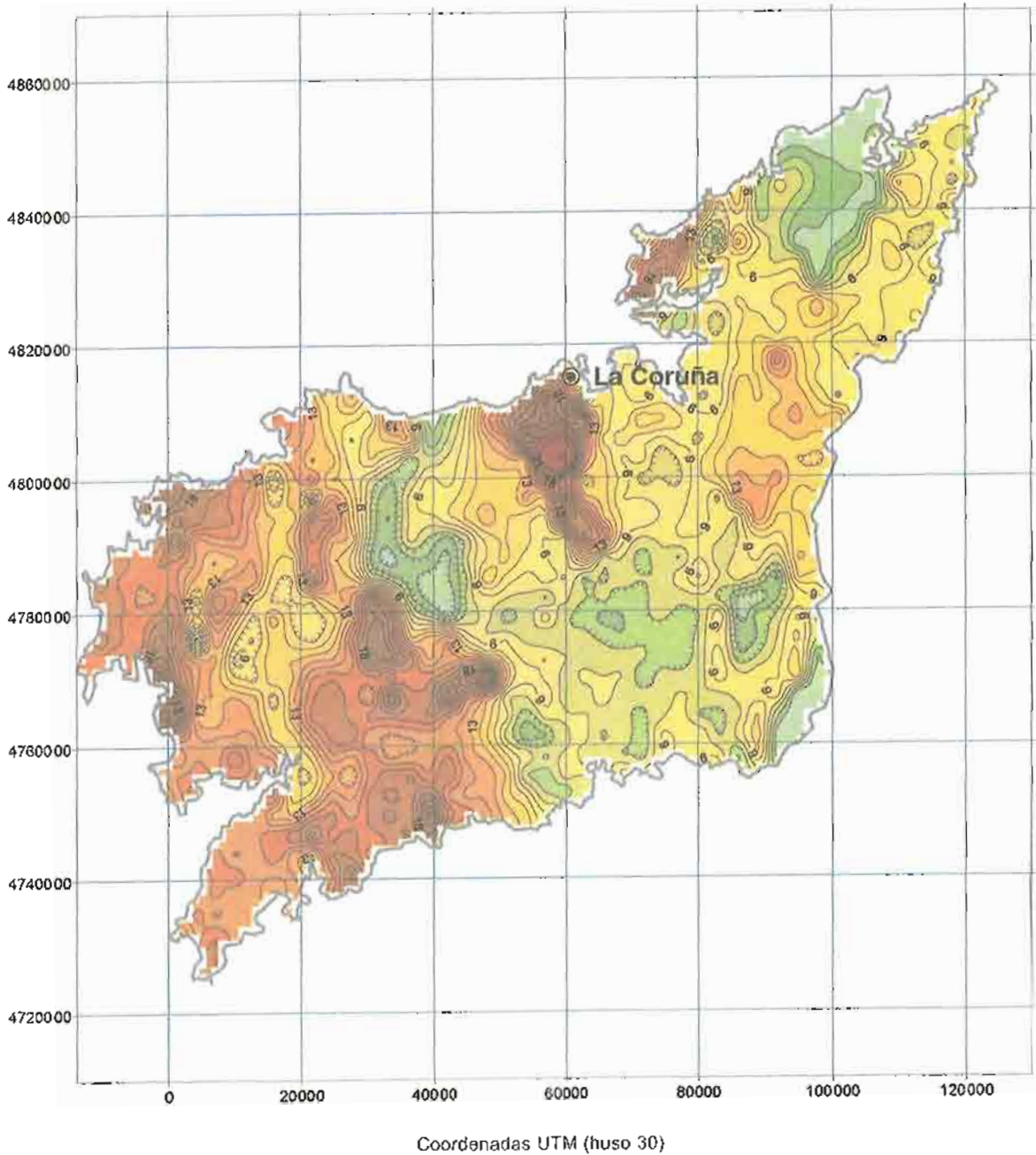
Coordenadas UTM (huso 30)

Córdoba

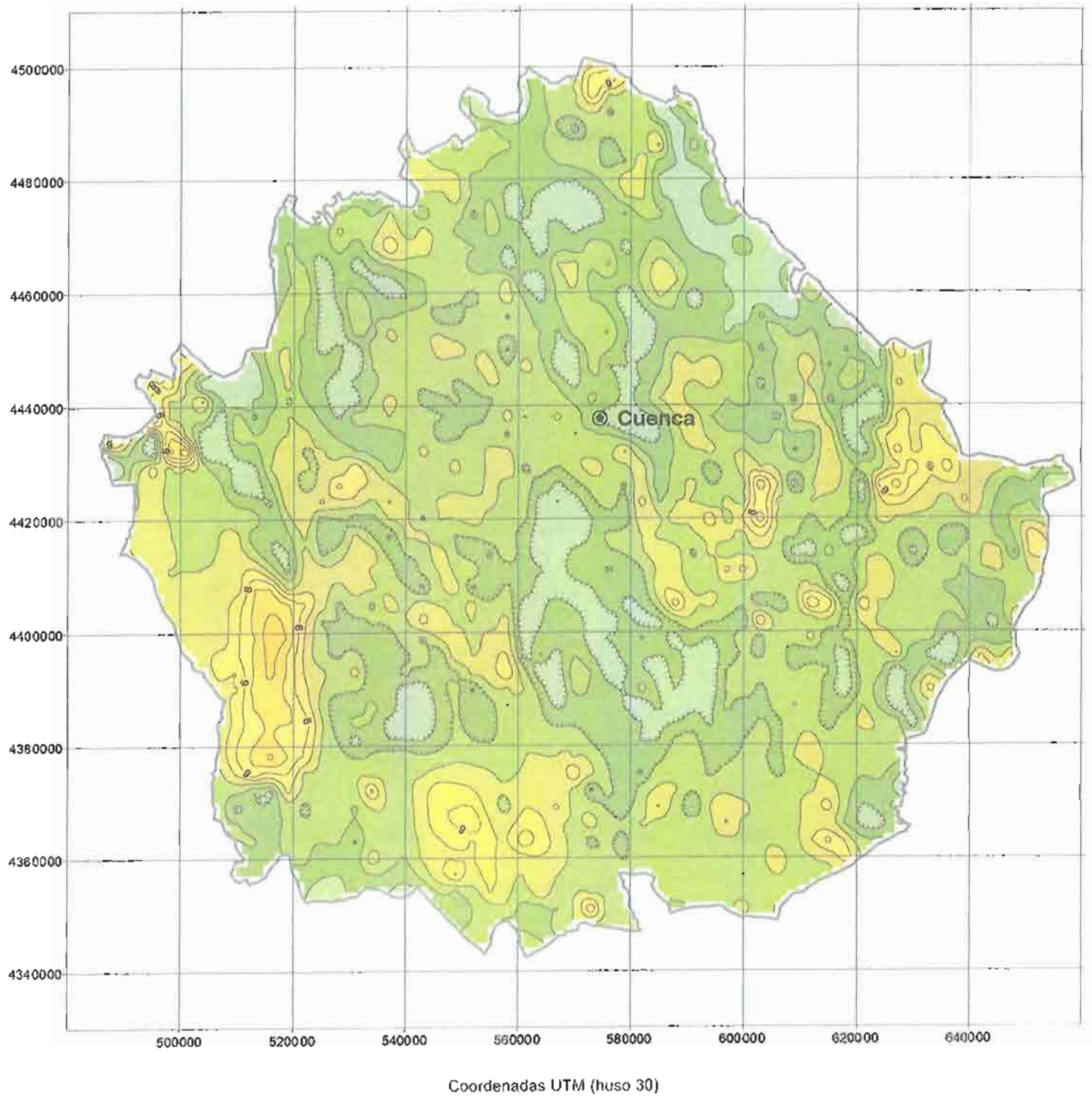


Coordenadas UTM (huso 30)

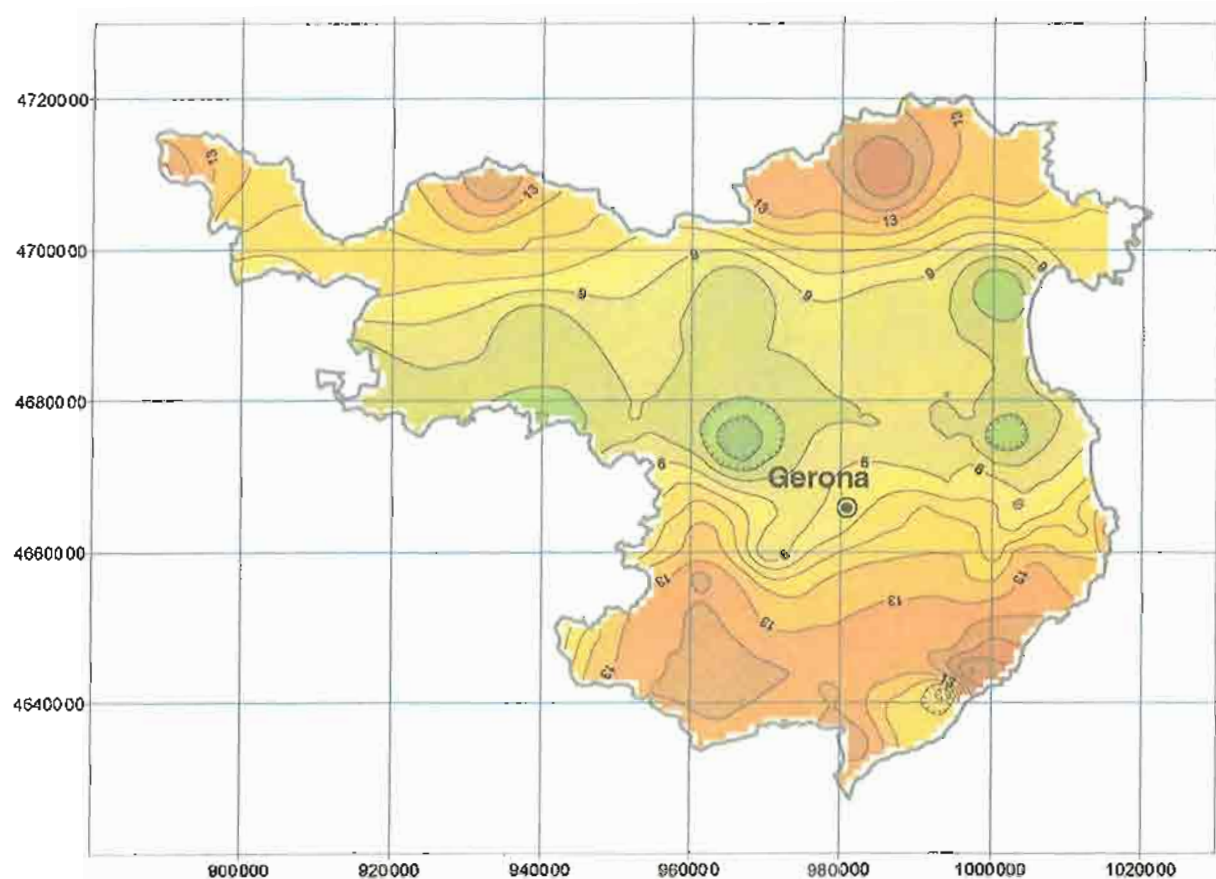
La Coruña



Cuenca

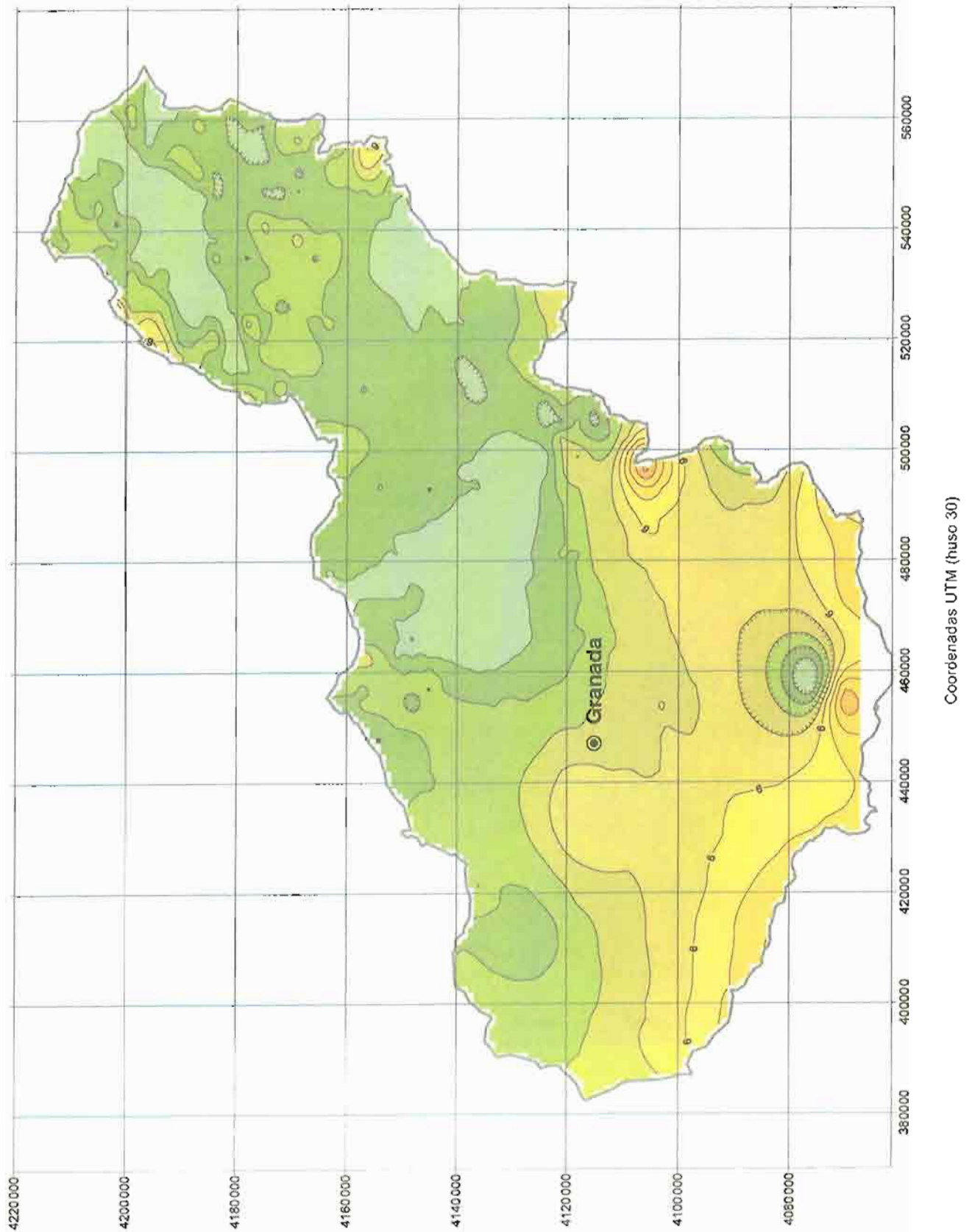


Gerona

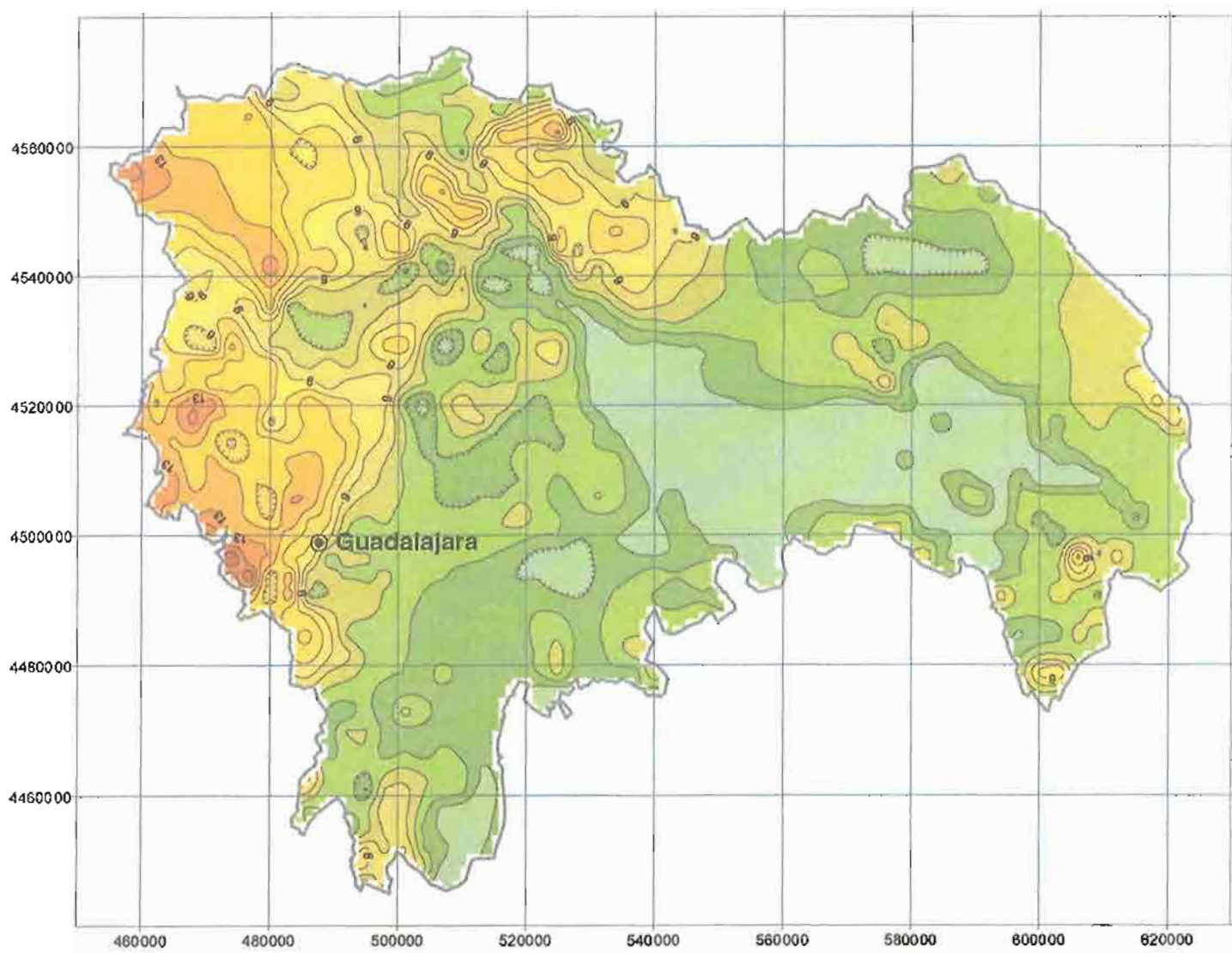


Coordenadas UTM (huso 30)

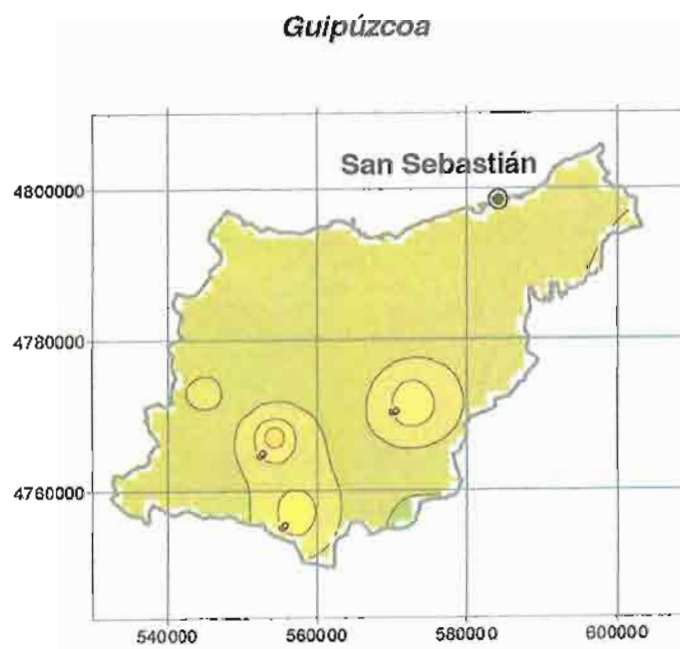
Granada



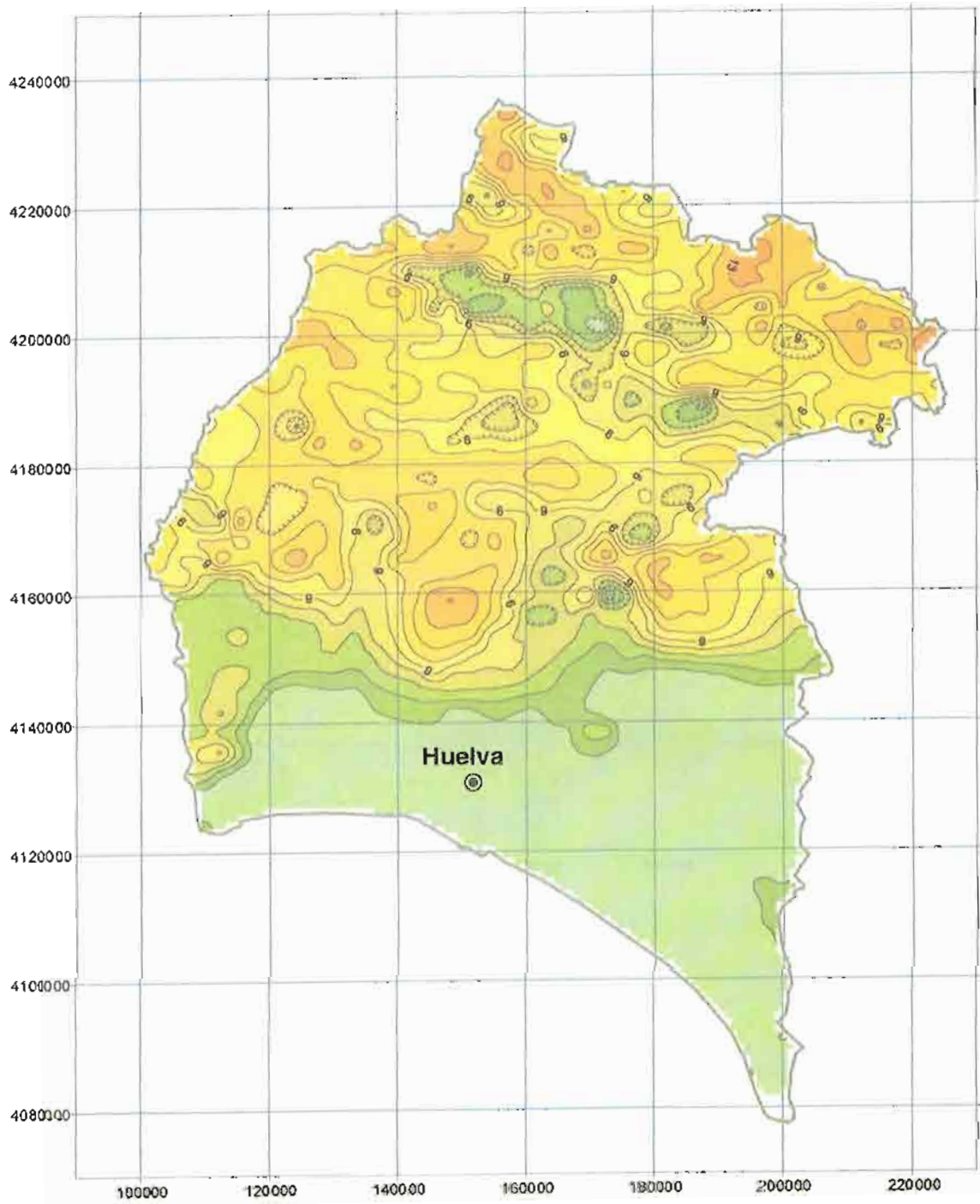
Guadalajara



Coordenadas UTM (huso 30)

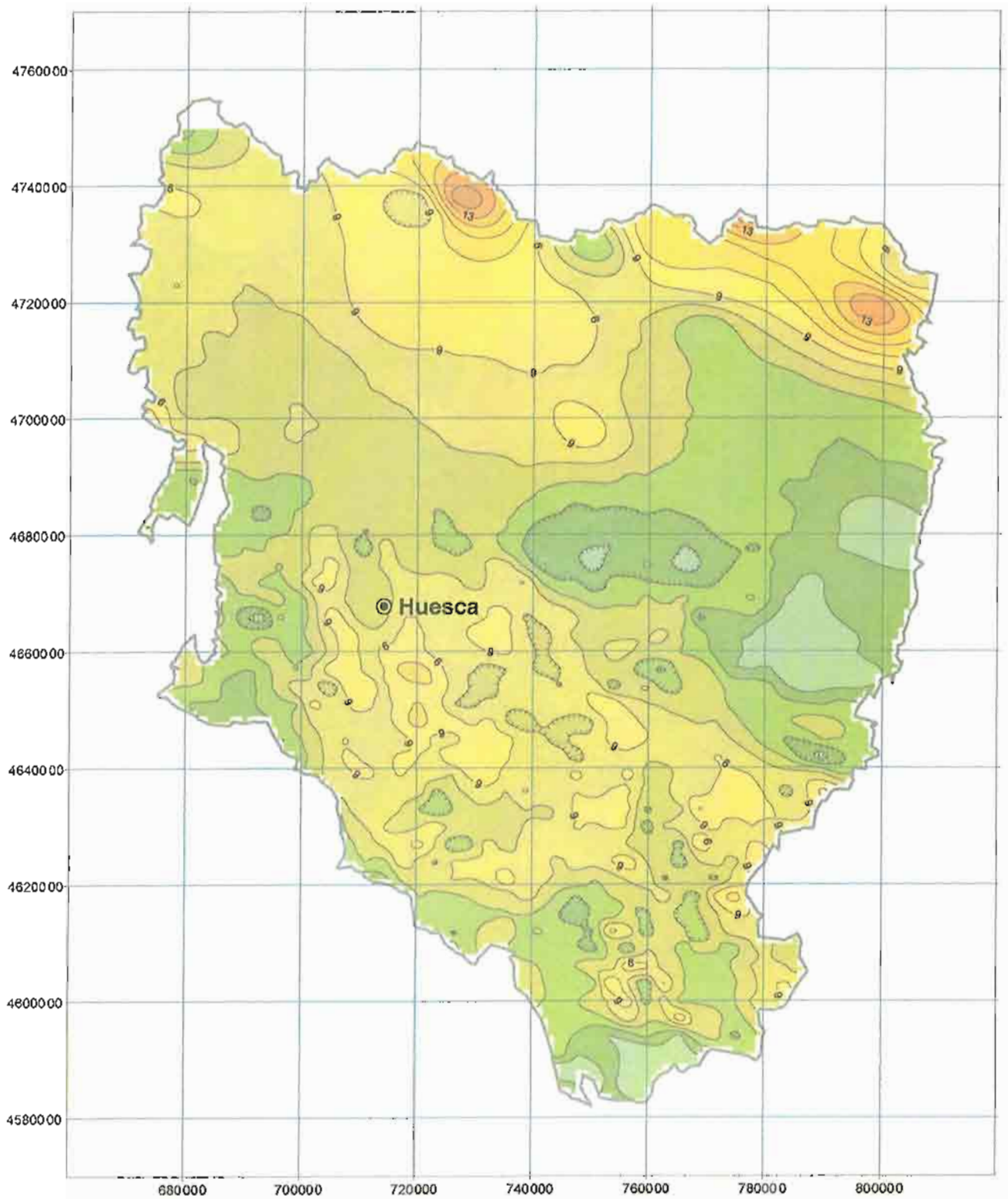


Huelva



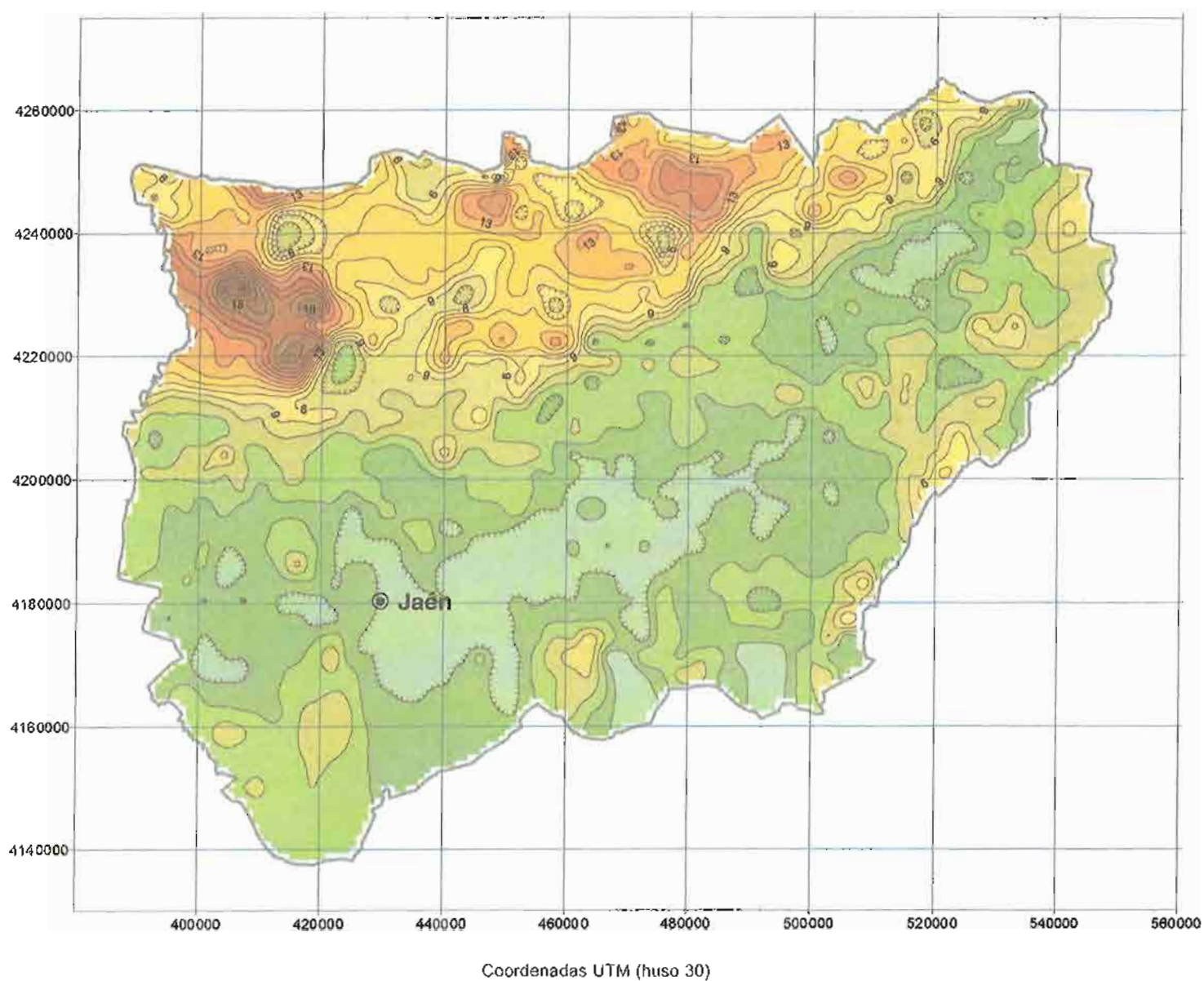
Coordenadas UTM (huso 30)

Huesca

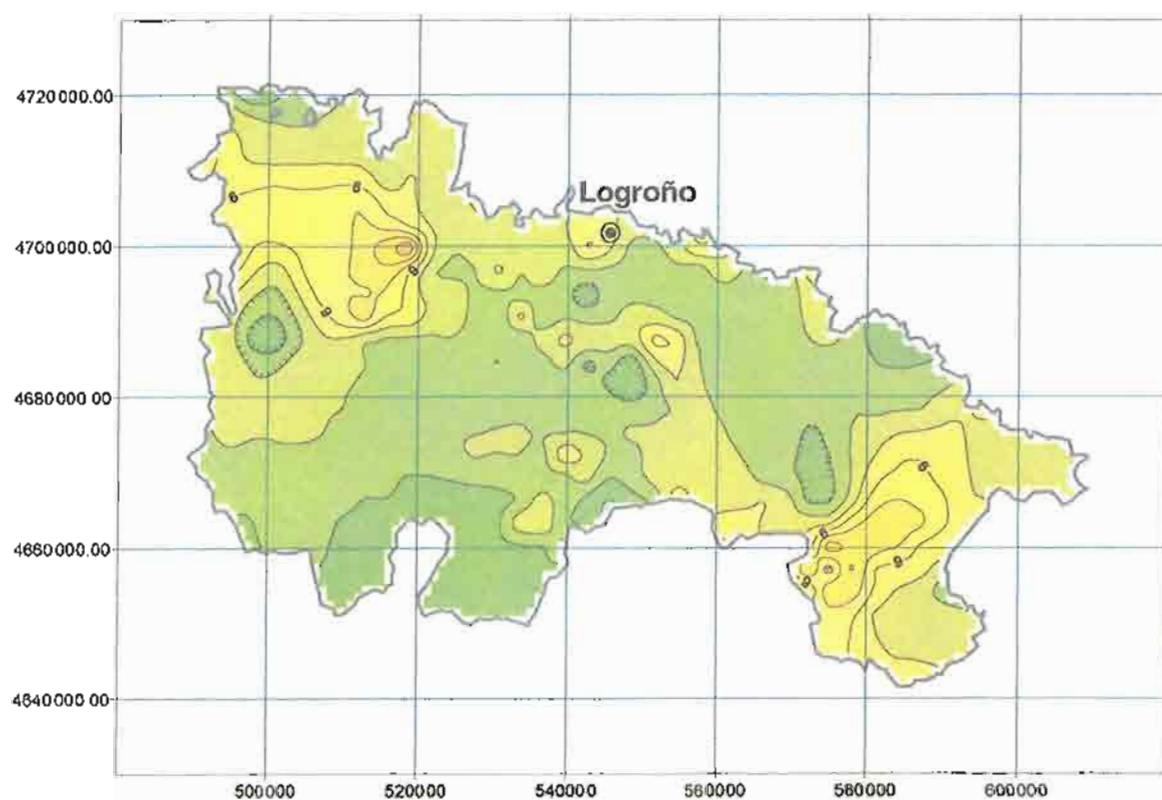


Coordenadas UTM (huso 30)

Jaén

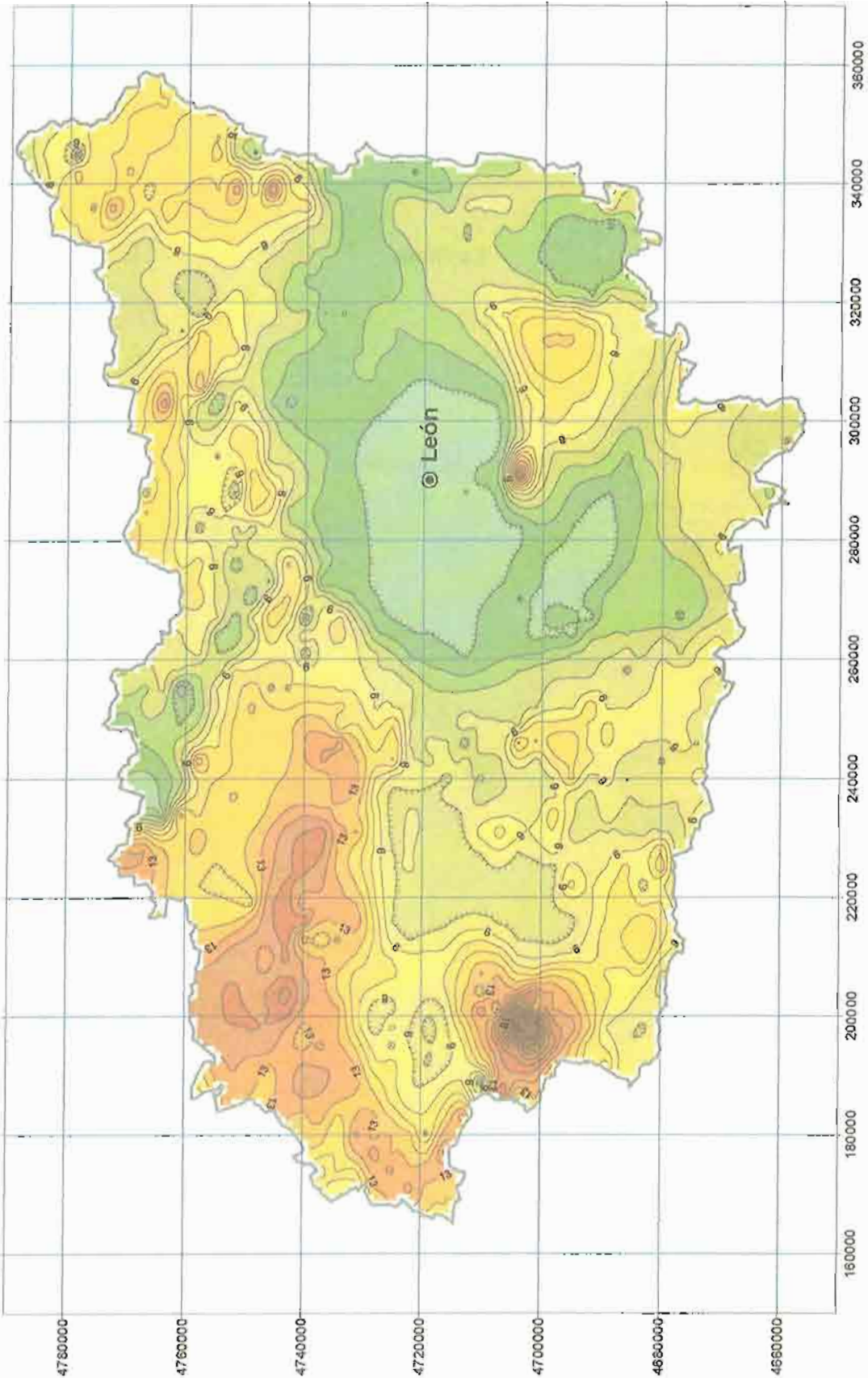


La Rioja



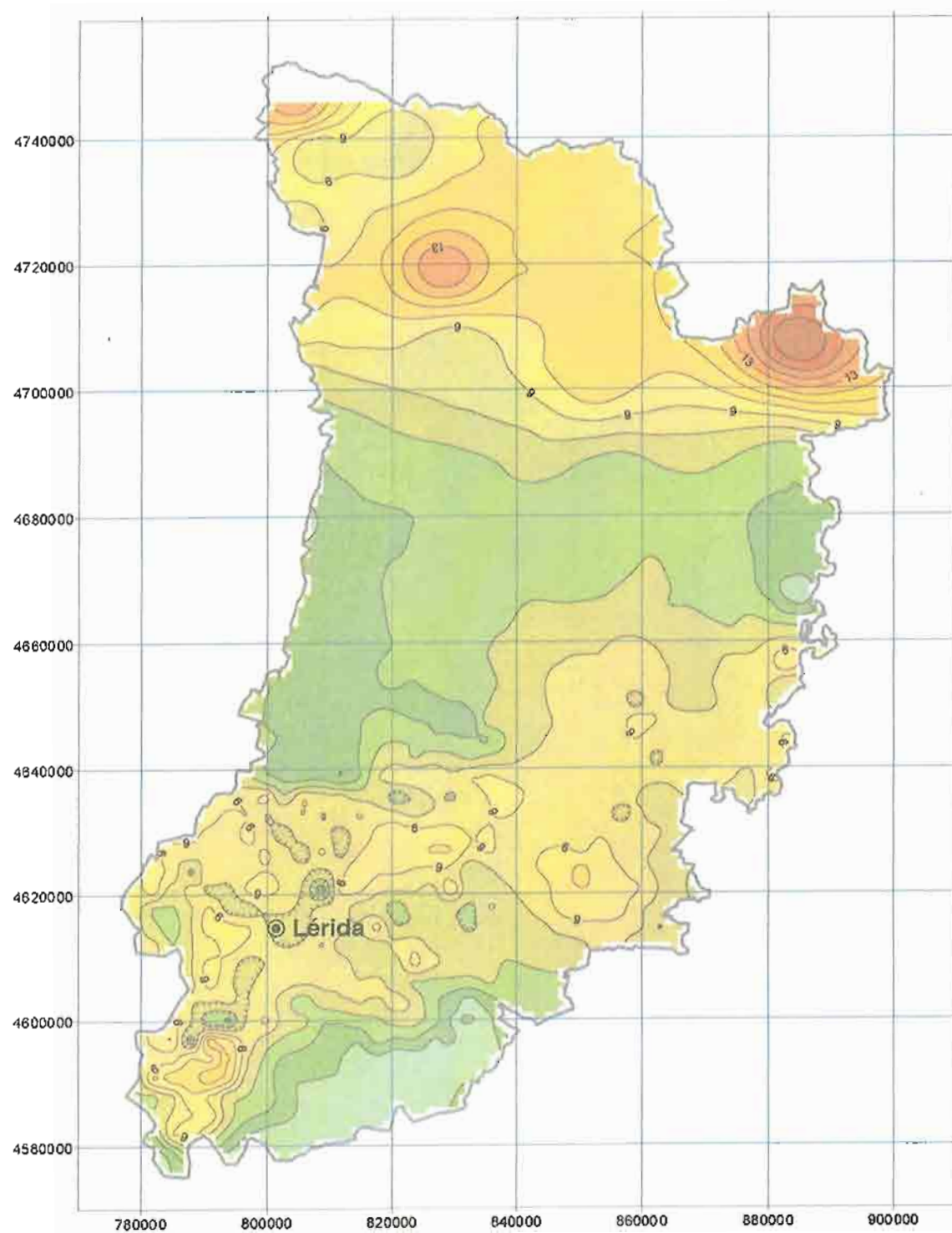
Coordenadas UTM (huso 30)

León



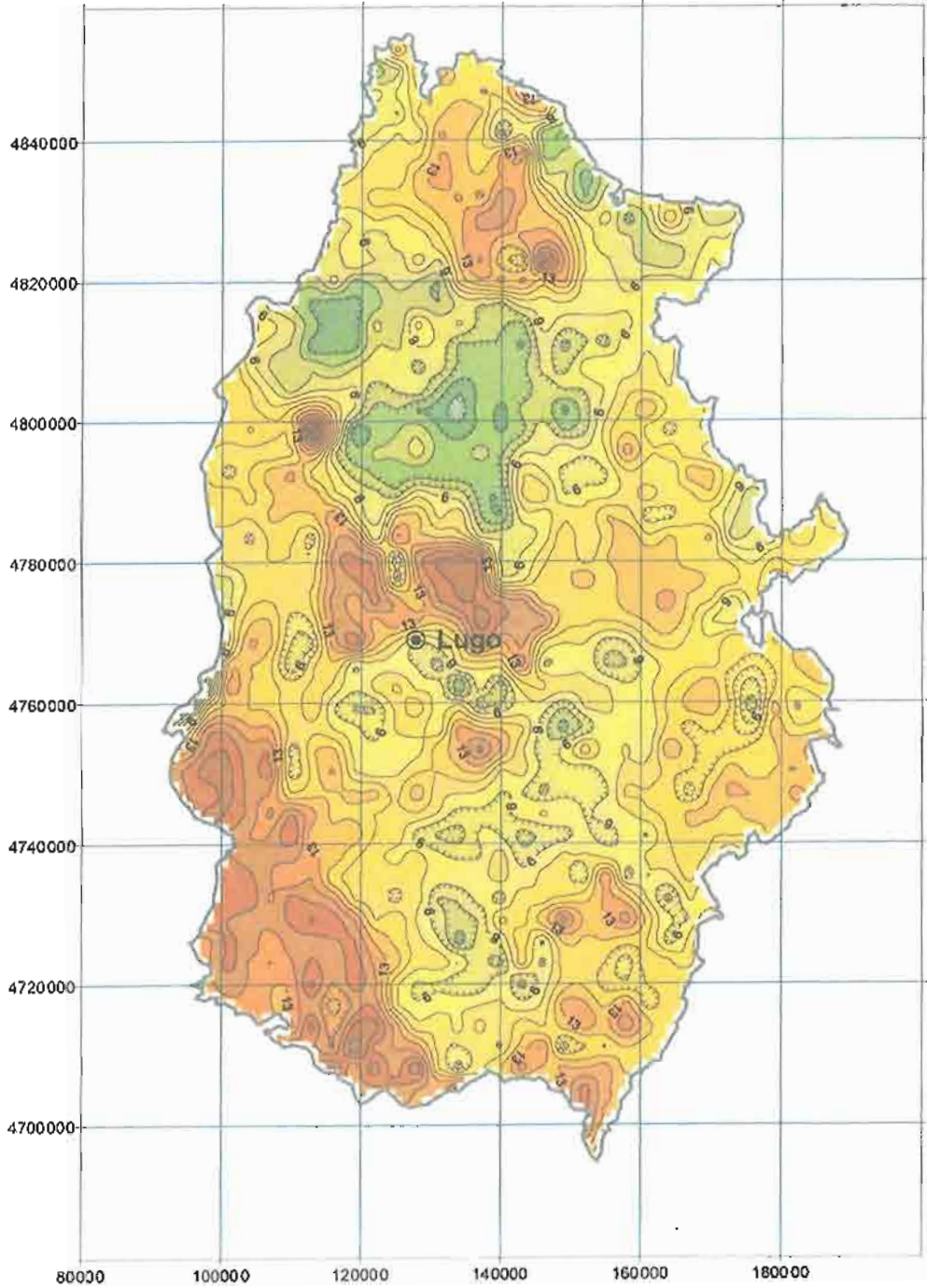
Coordenadas UTM (huso 30)

Lérida



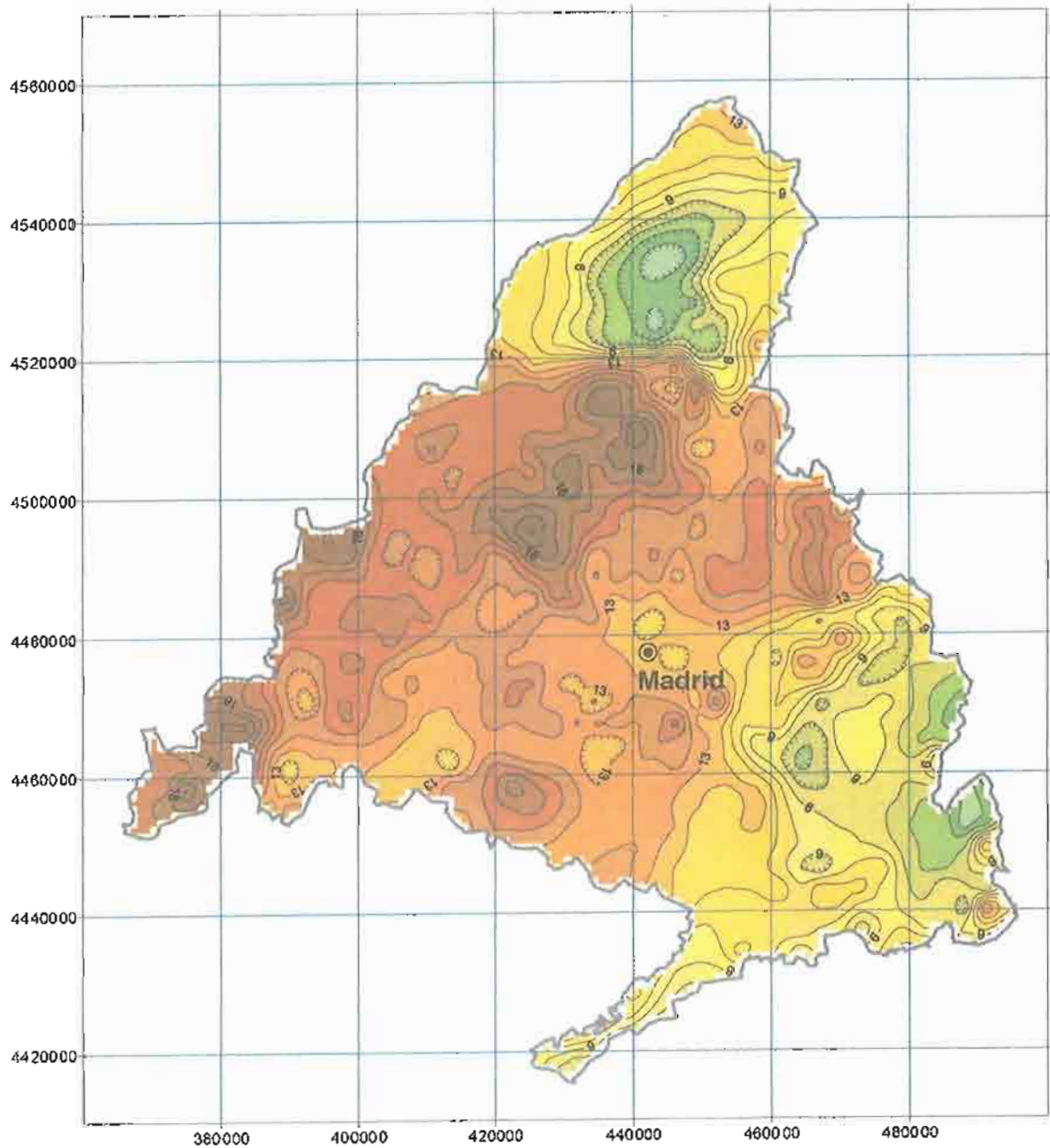
Coordenadas UTM (huso 30)

Lugo



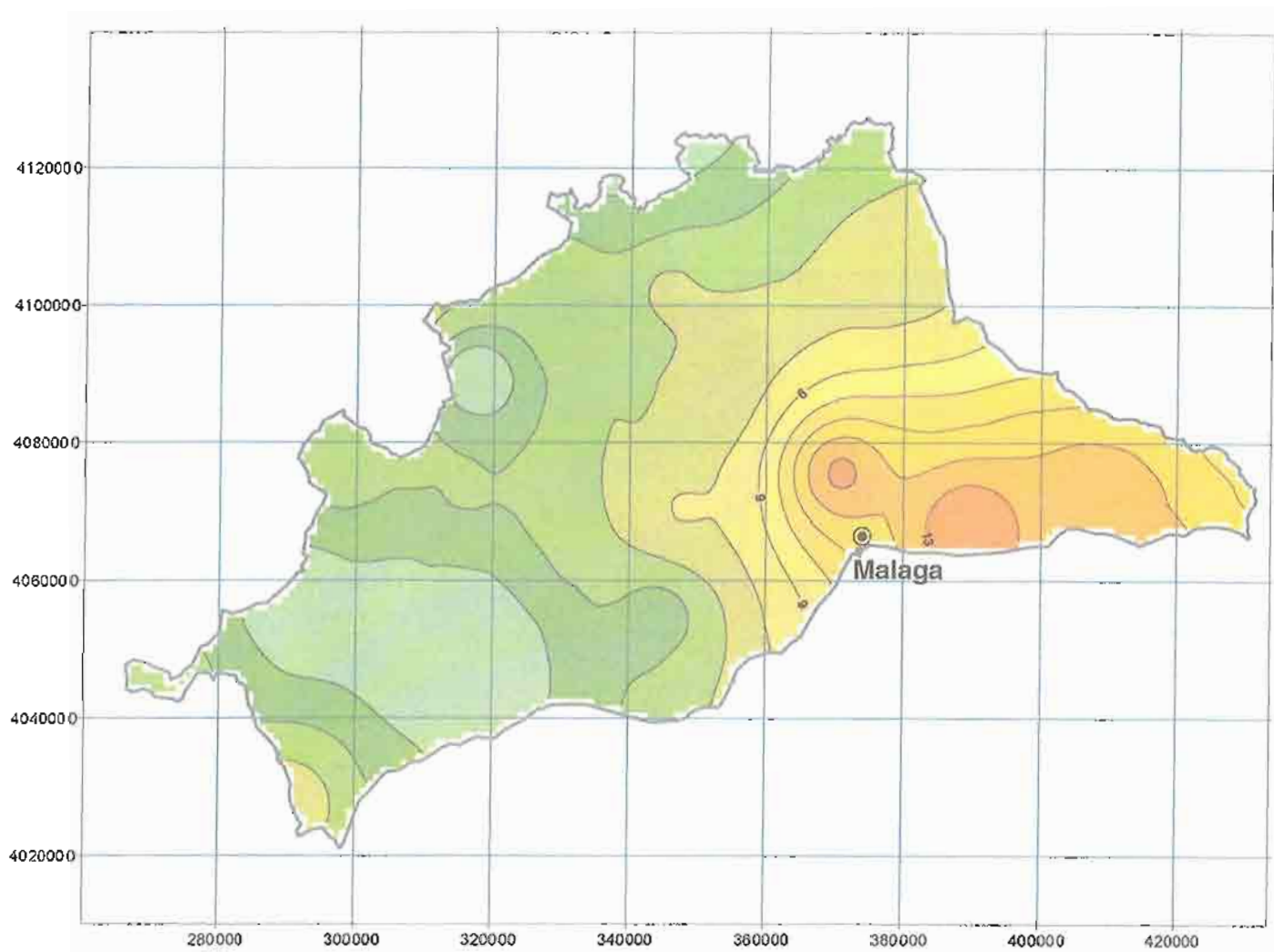
Coordenadas UTM (huso 30)

Madrid



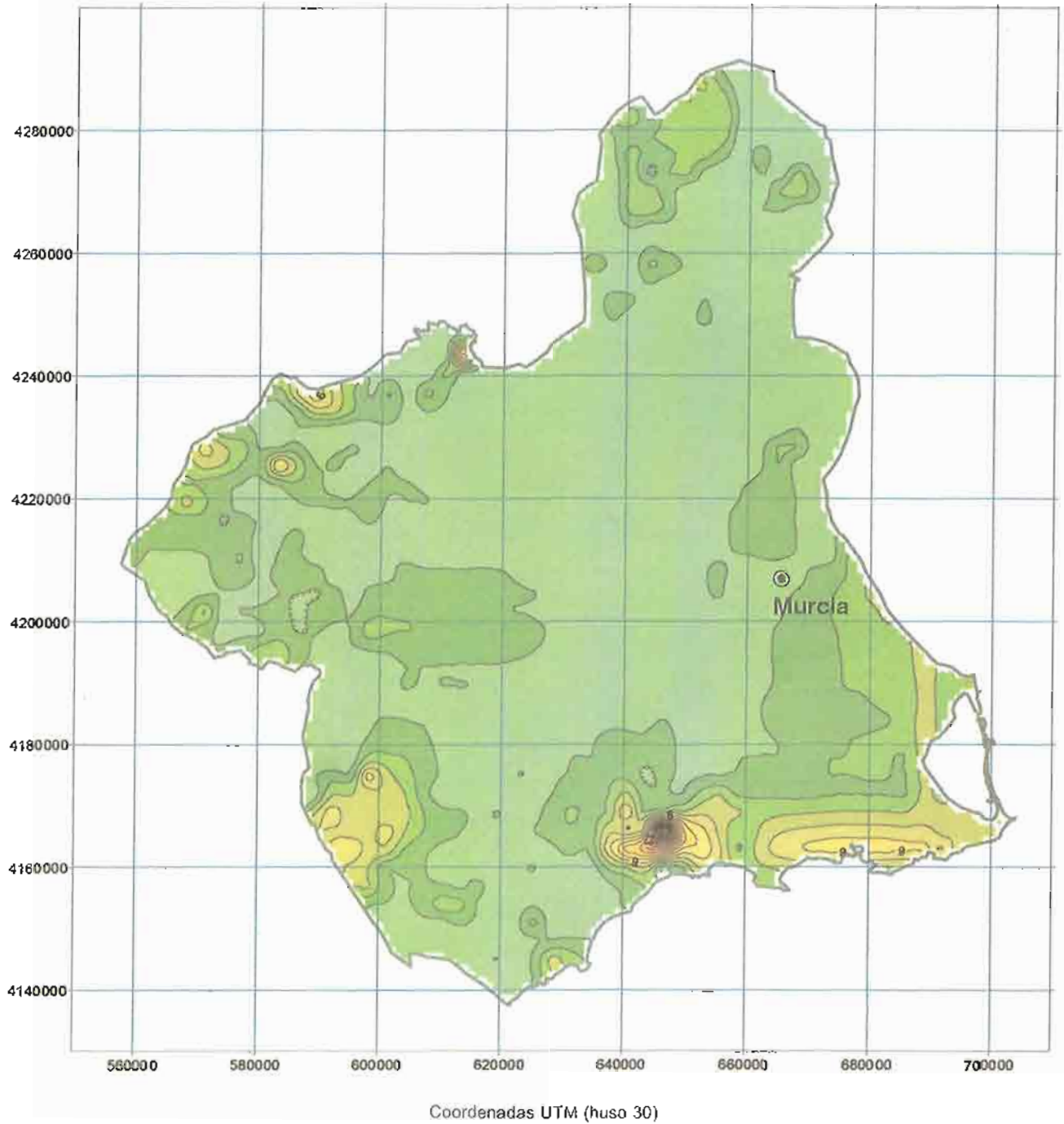
Coordenadas UTM (huso 30)

Málaga

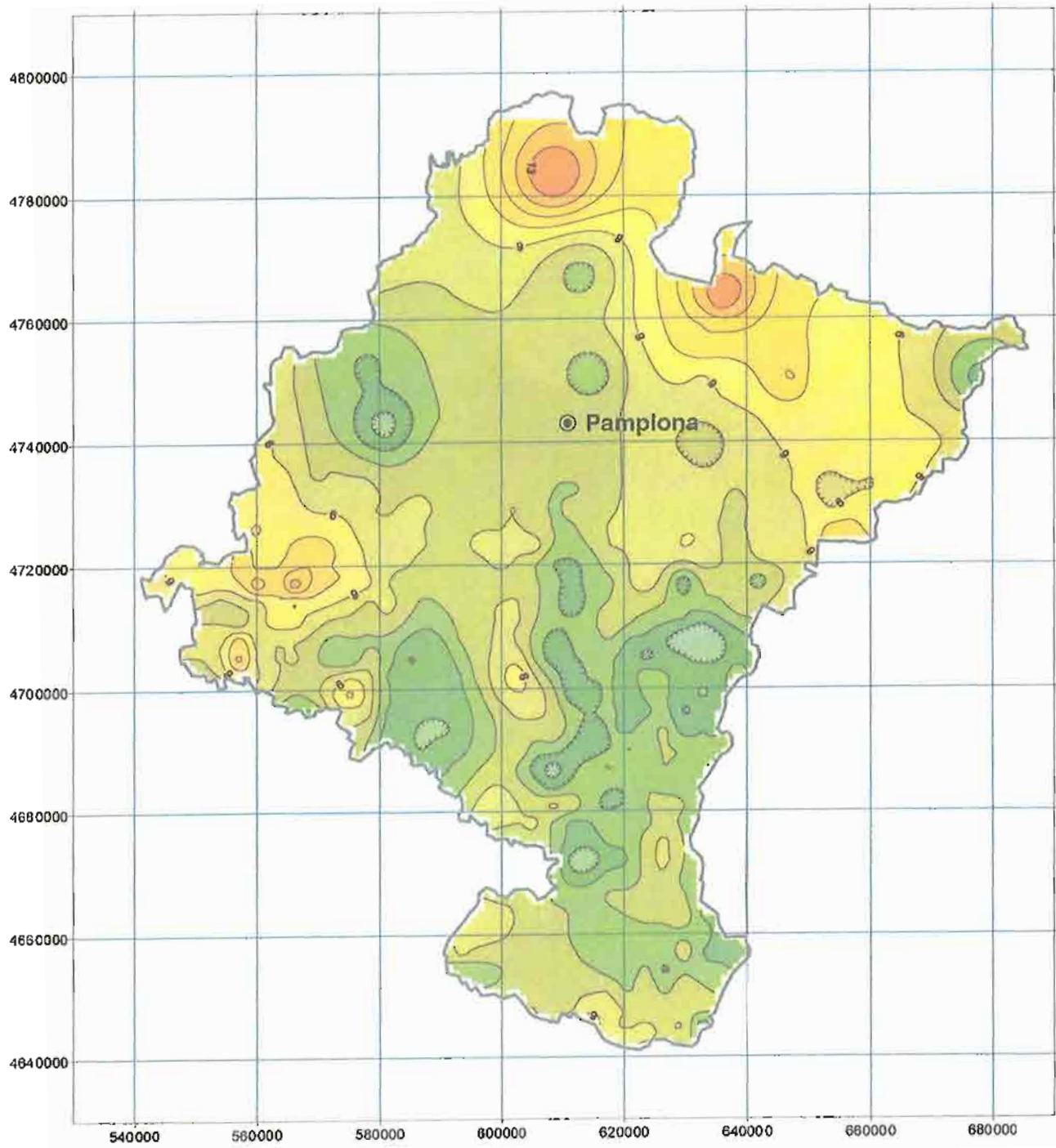


Coordenadas UTM (huso 30)

Murcia

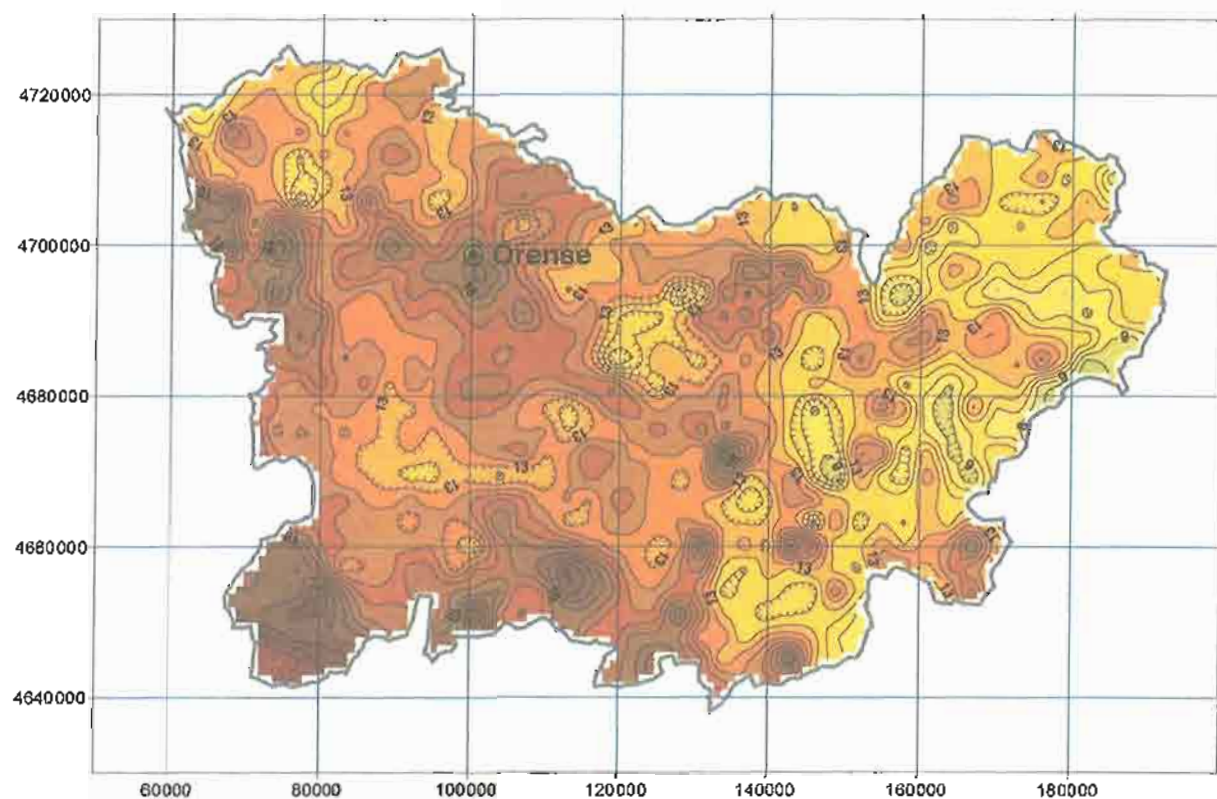


Navarra



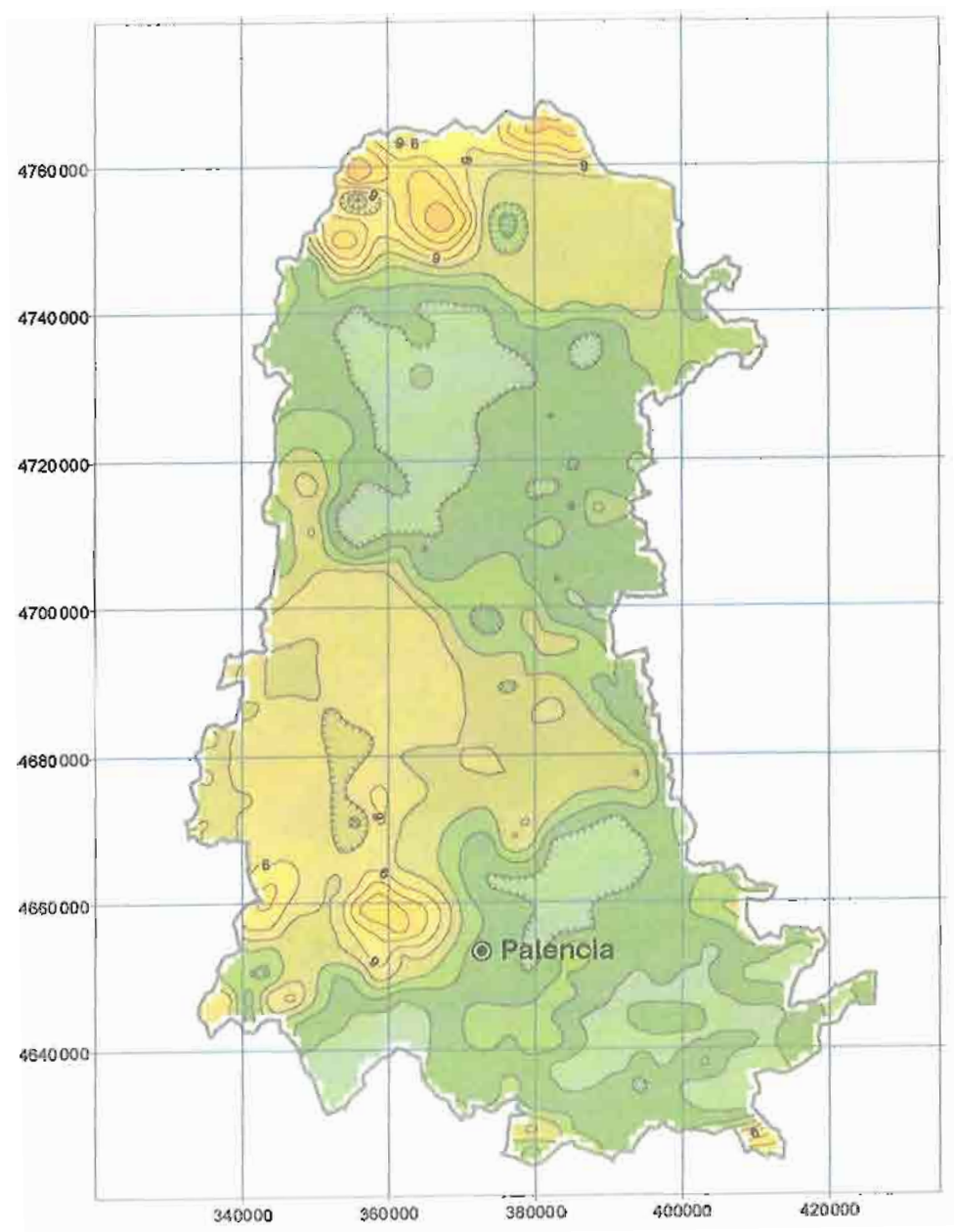
Coordenadas UTM (huso 30)

Orense

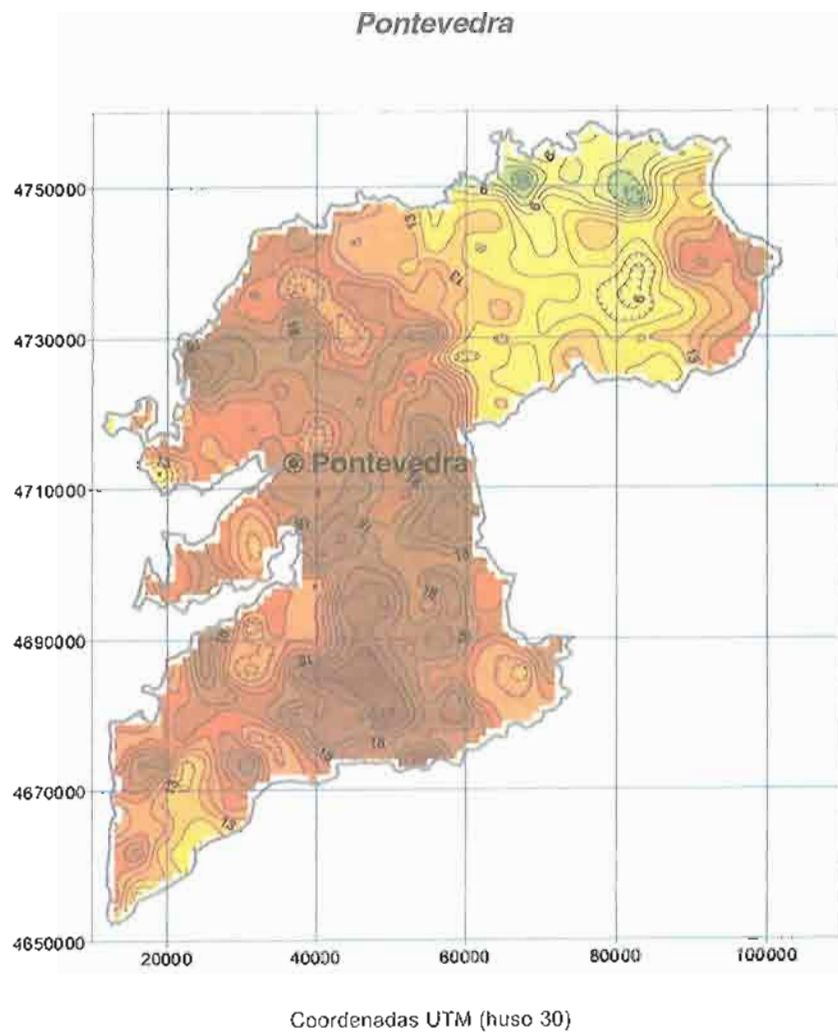


Coordenadas UTM (huso 30)

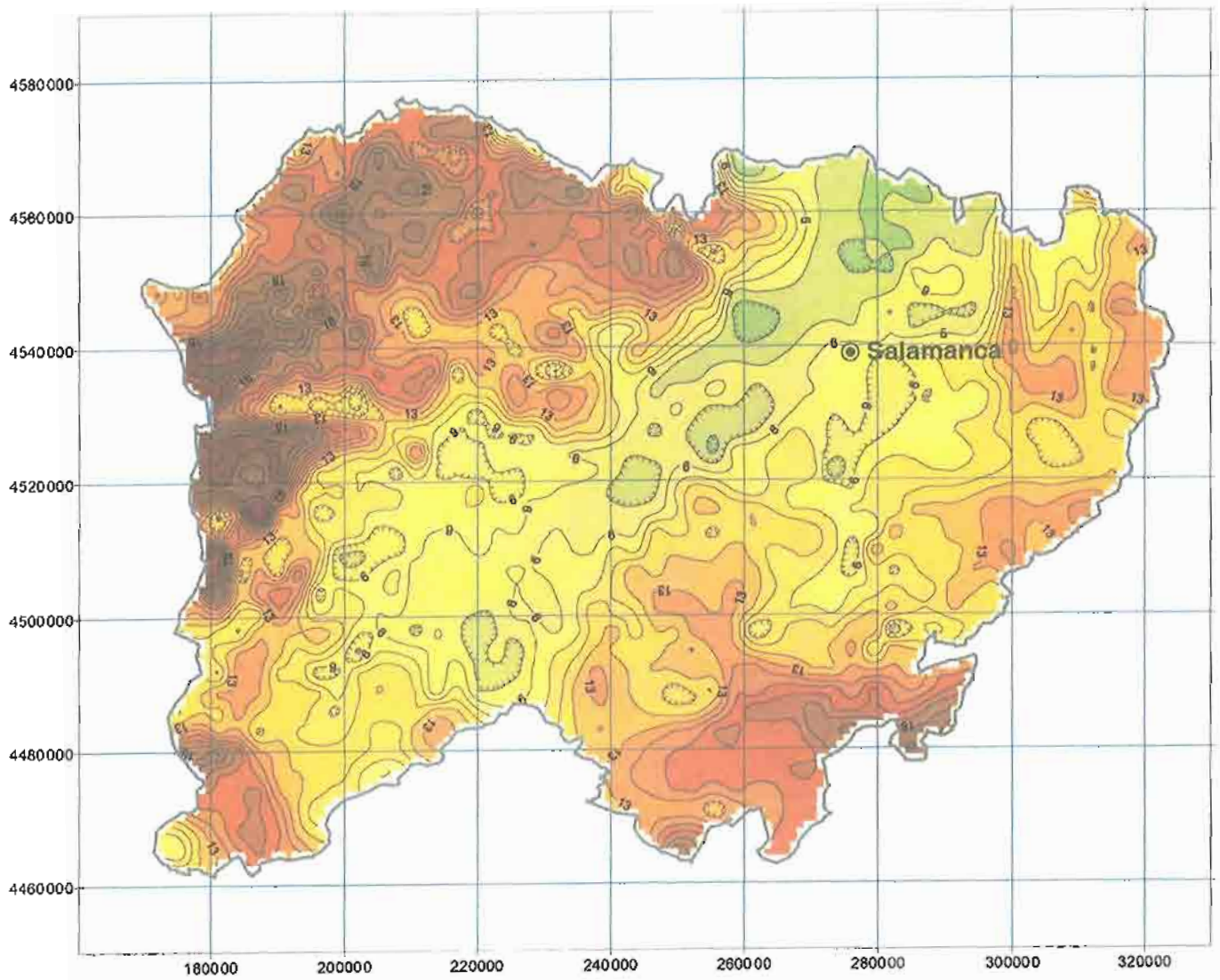
Palencia



Coordenadas UTM (huso 30)

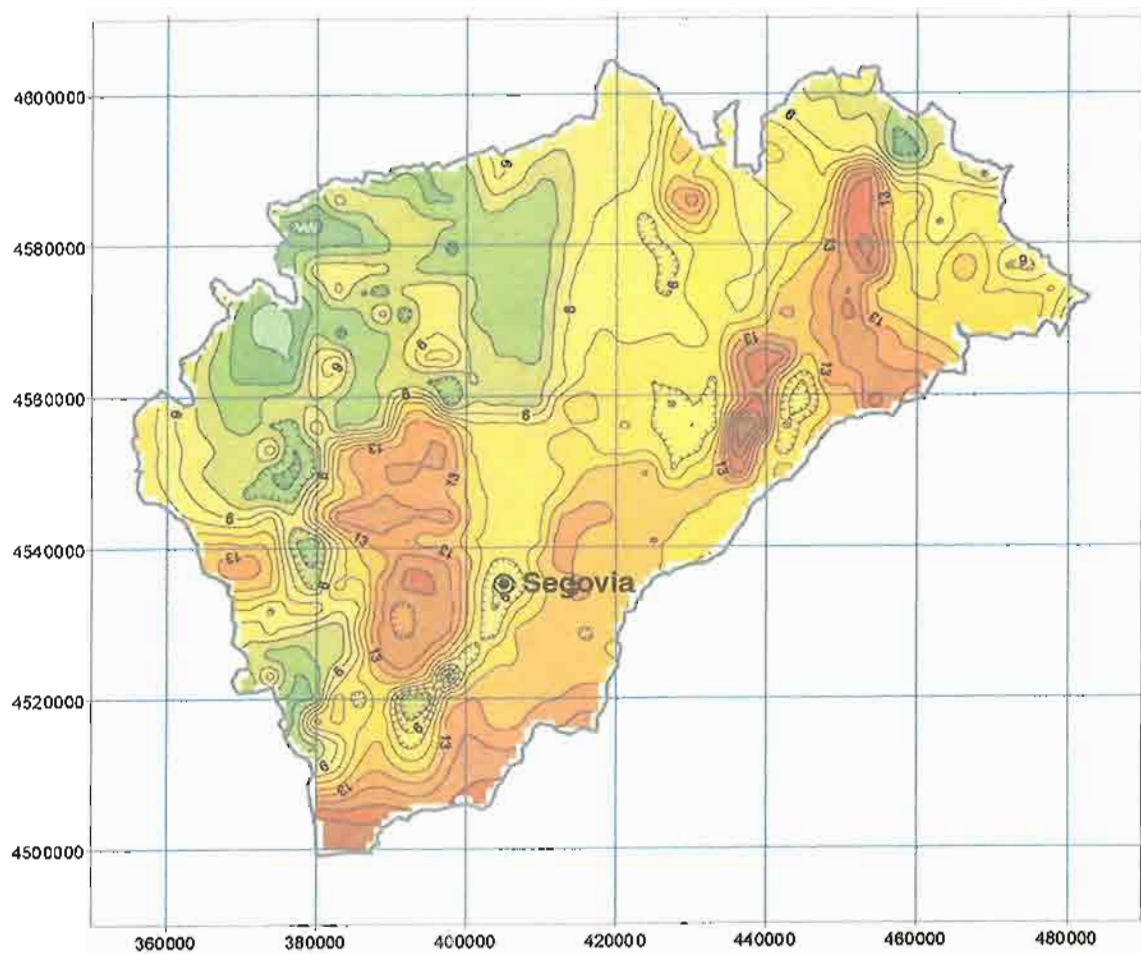


Salamanca

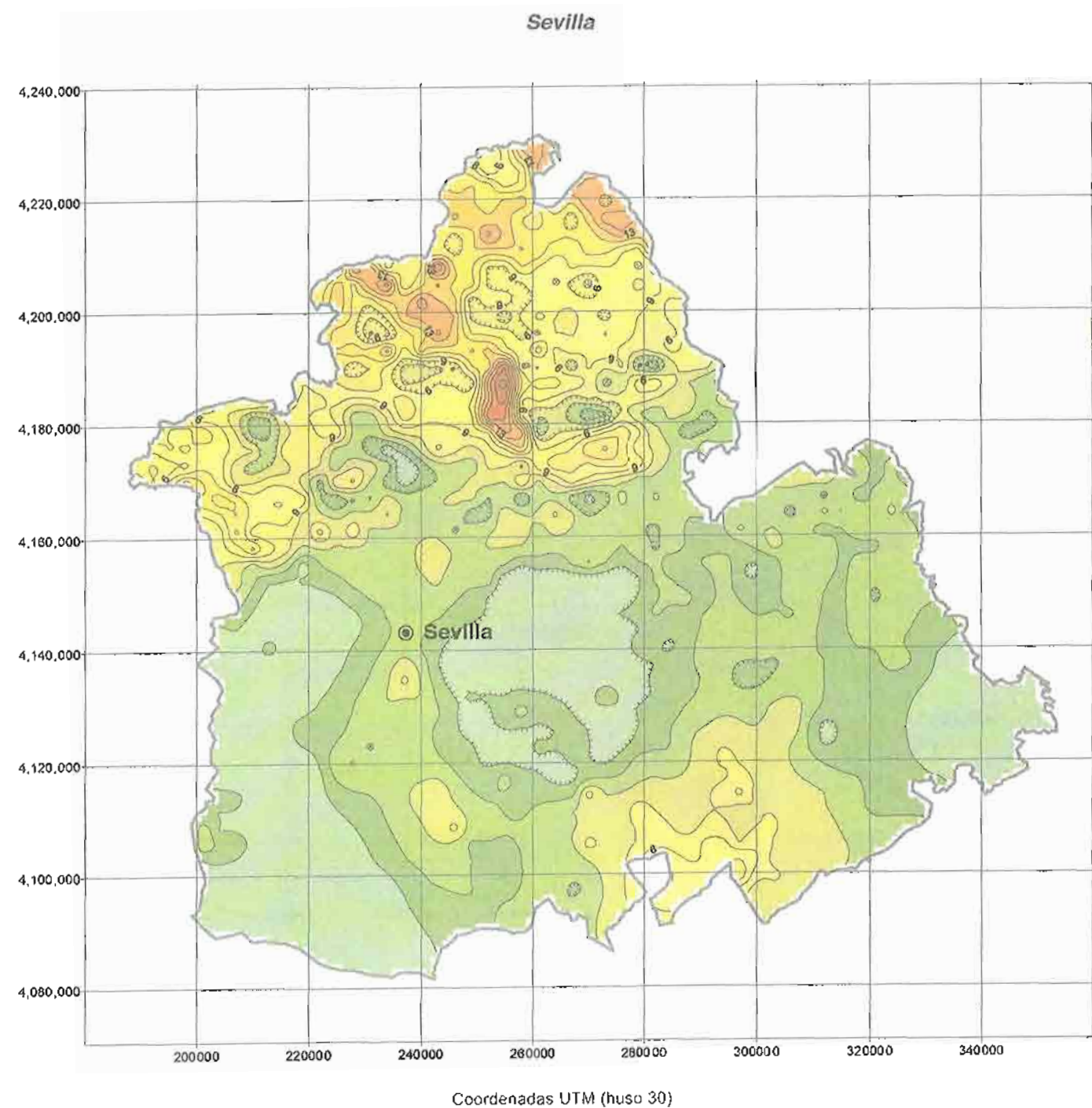


Coordenadas UTM (huso 30)

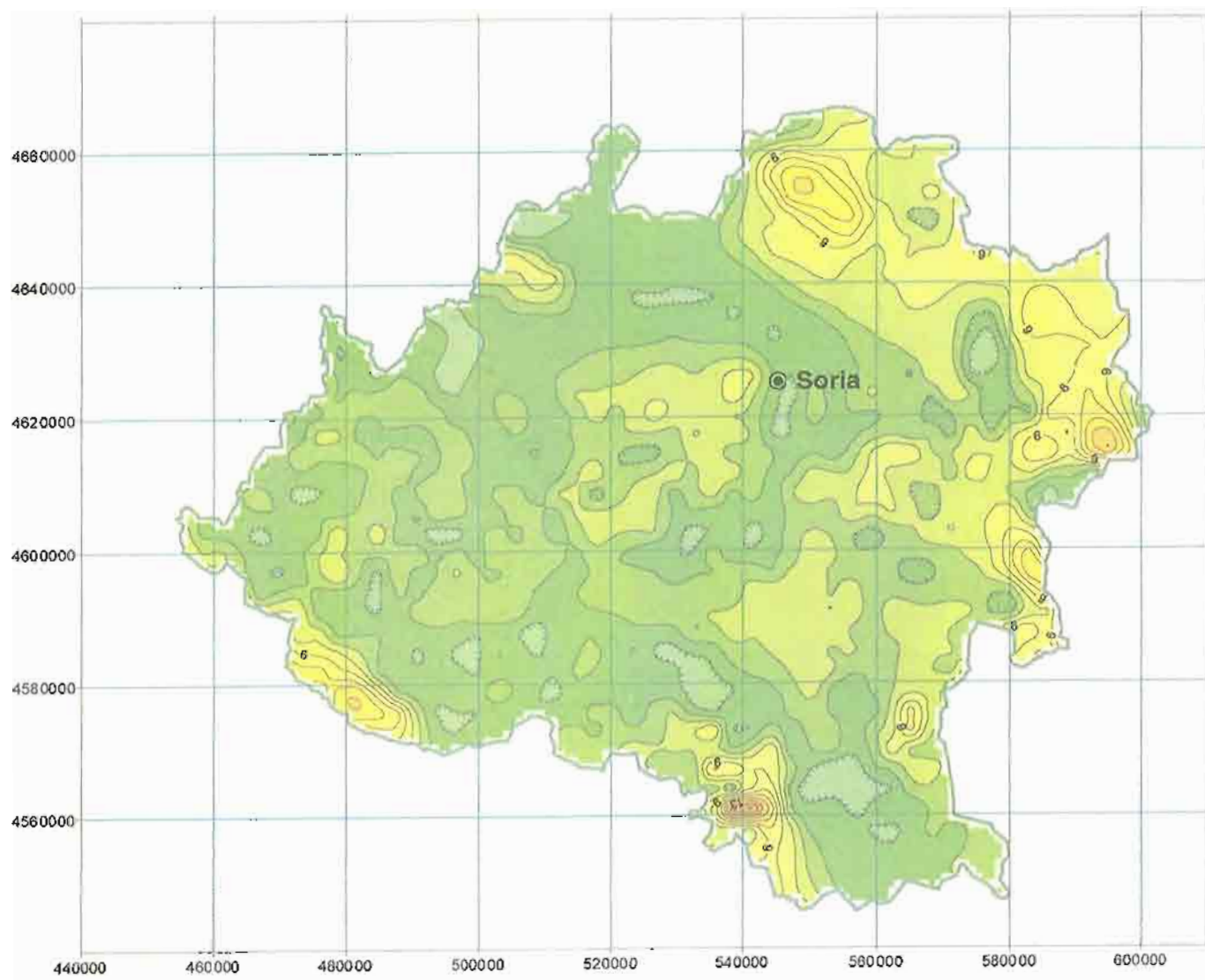
Segovia



Coordenadas UTM (huso 30)

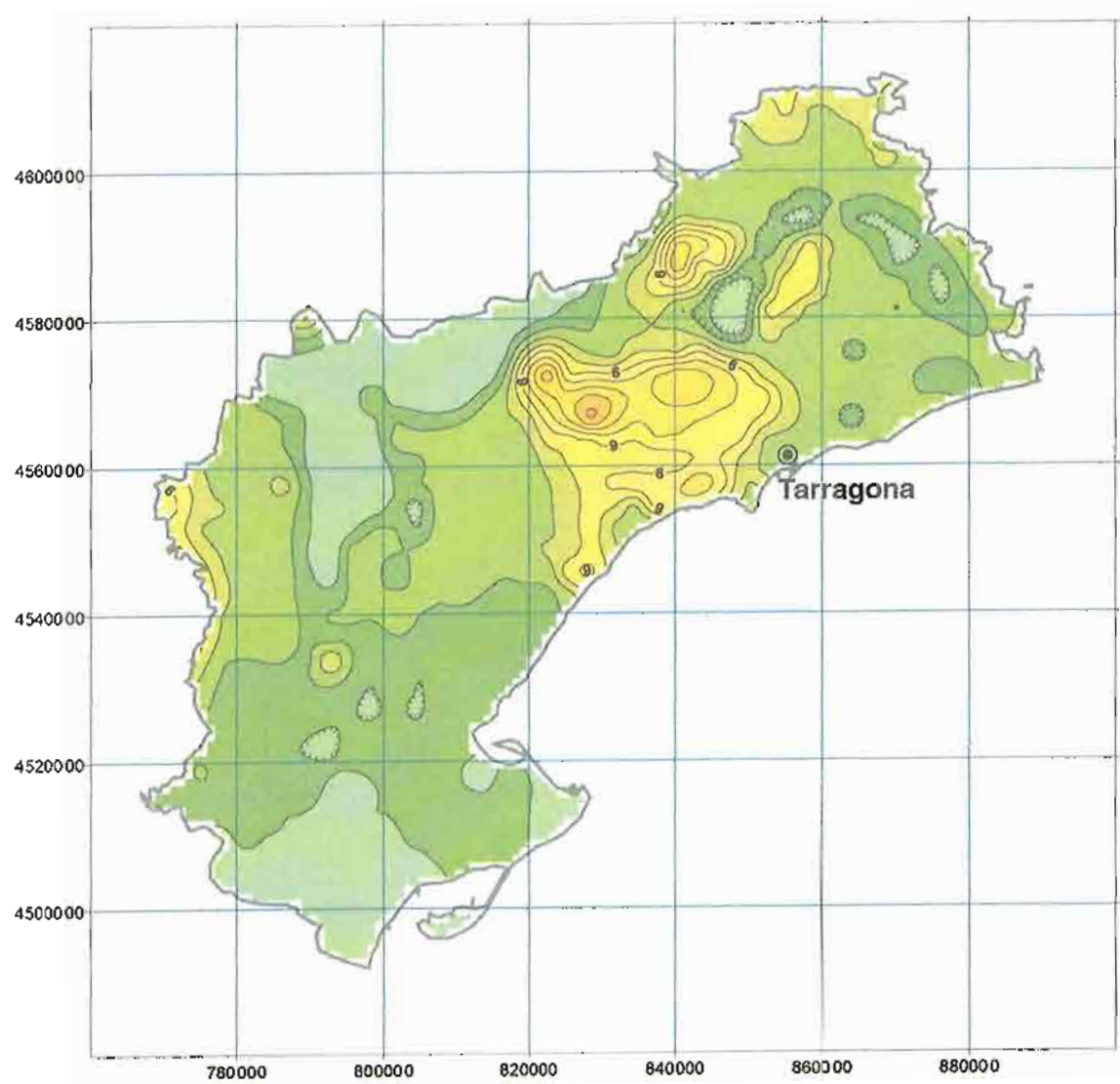


Soria



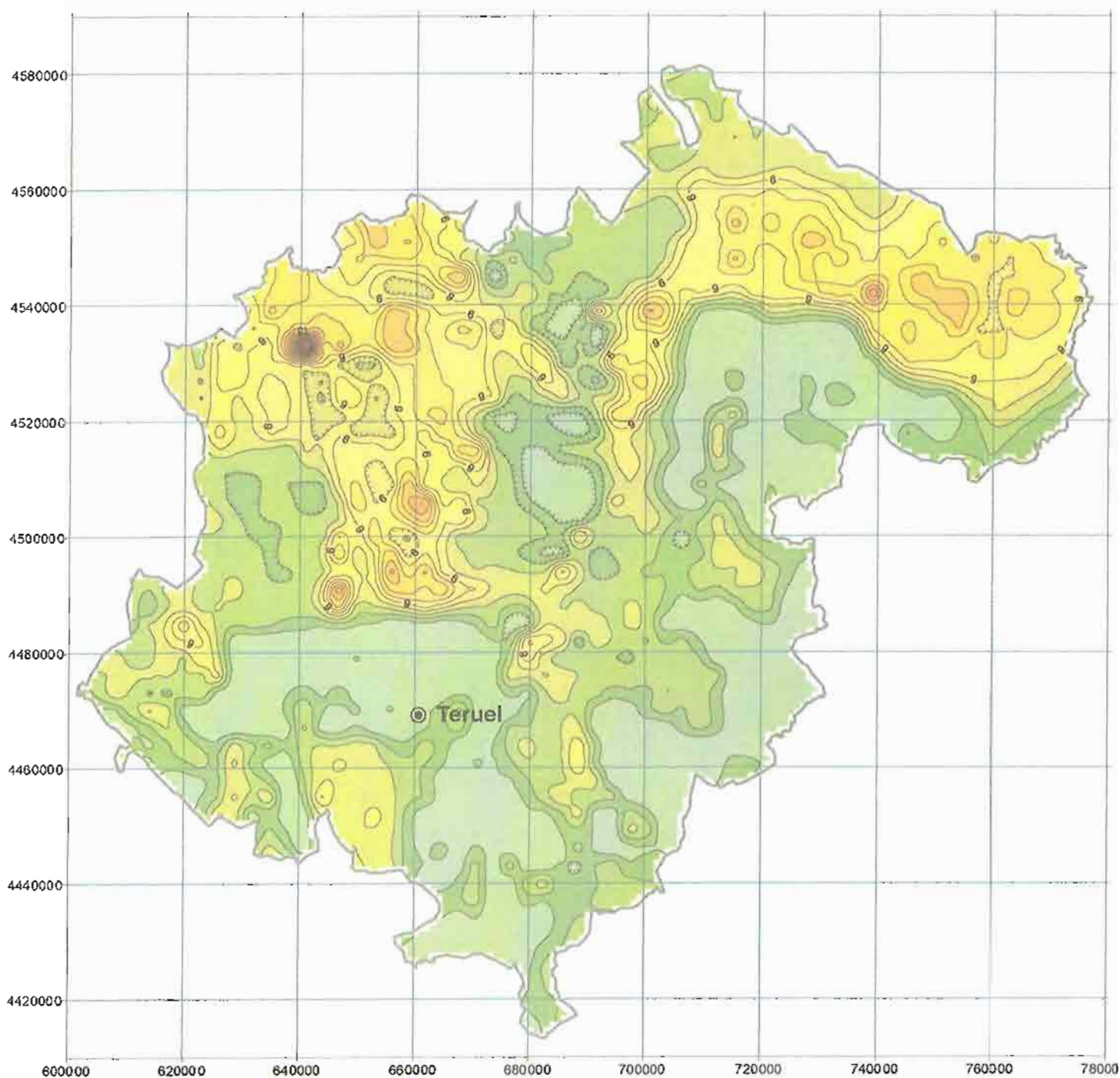
Coordenadas UTM (huso 30)

Tarragona



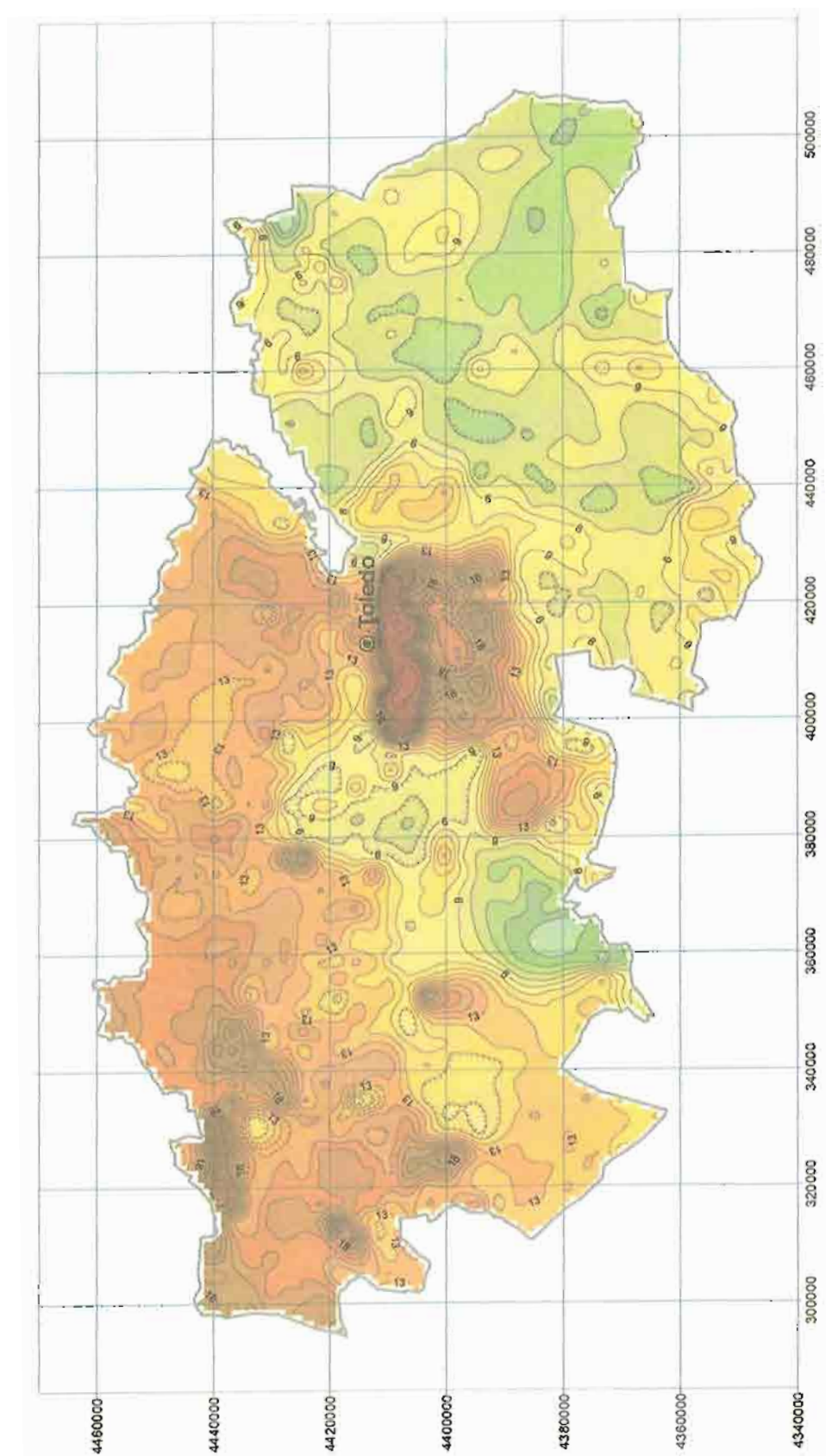
Coordenadas UTM (huso 30)

Teruel

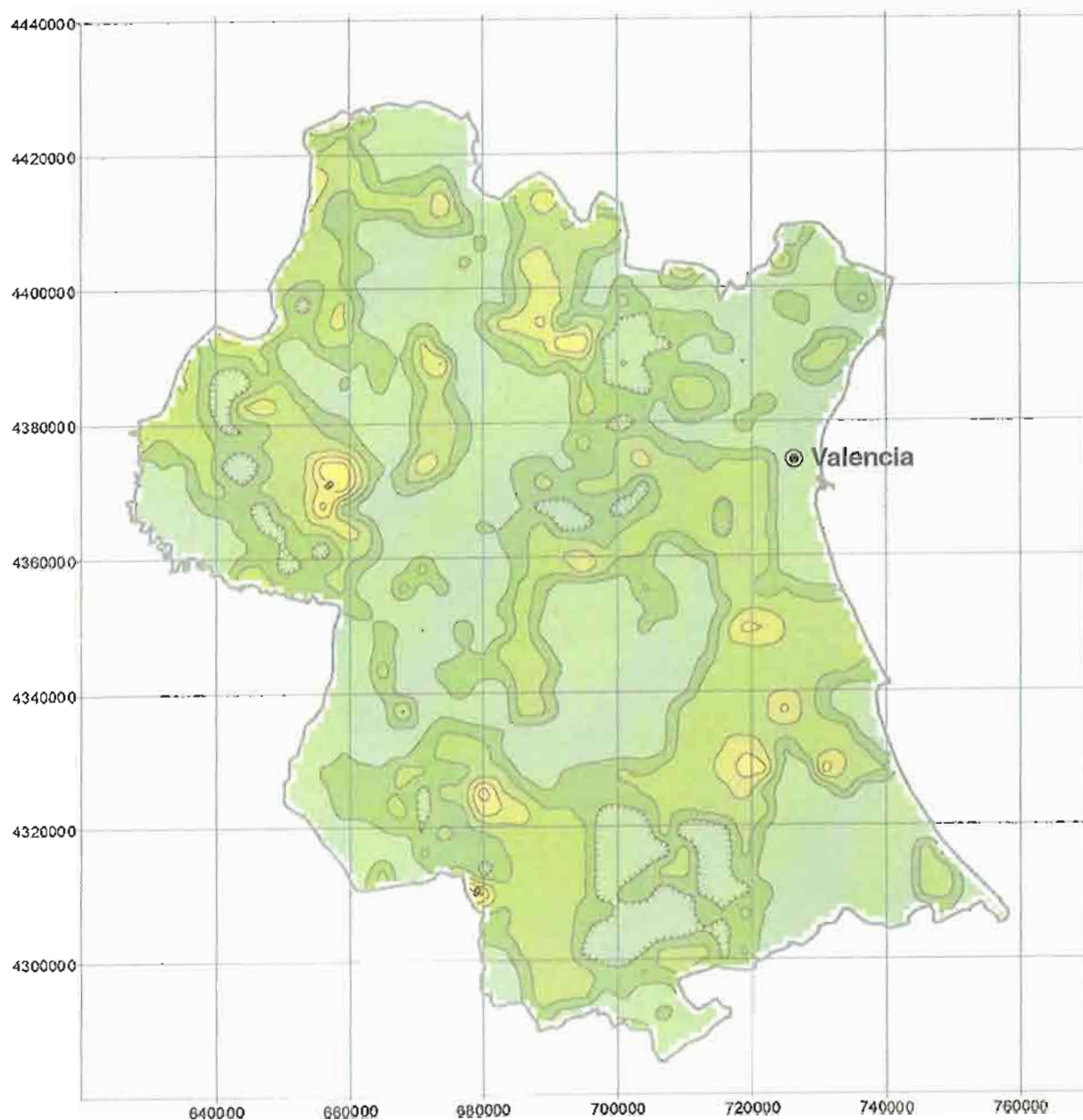


Coordenadas UTM (huso 30)

Toledo

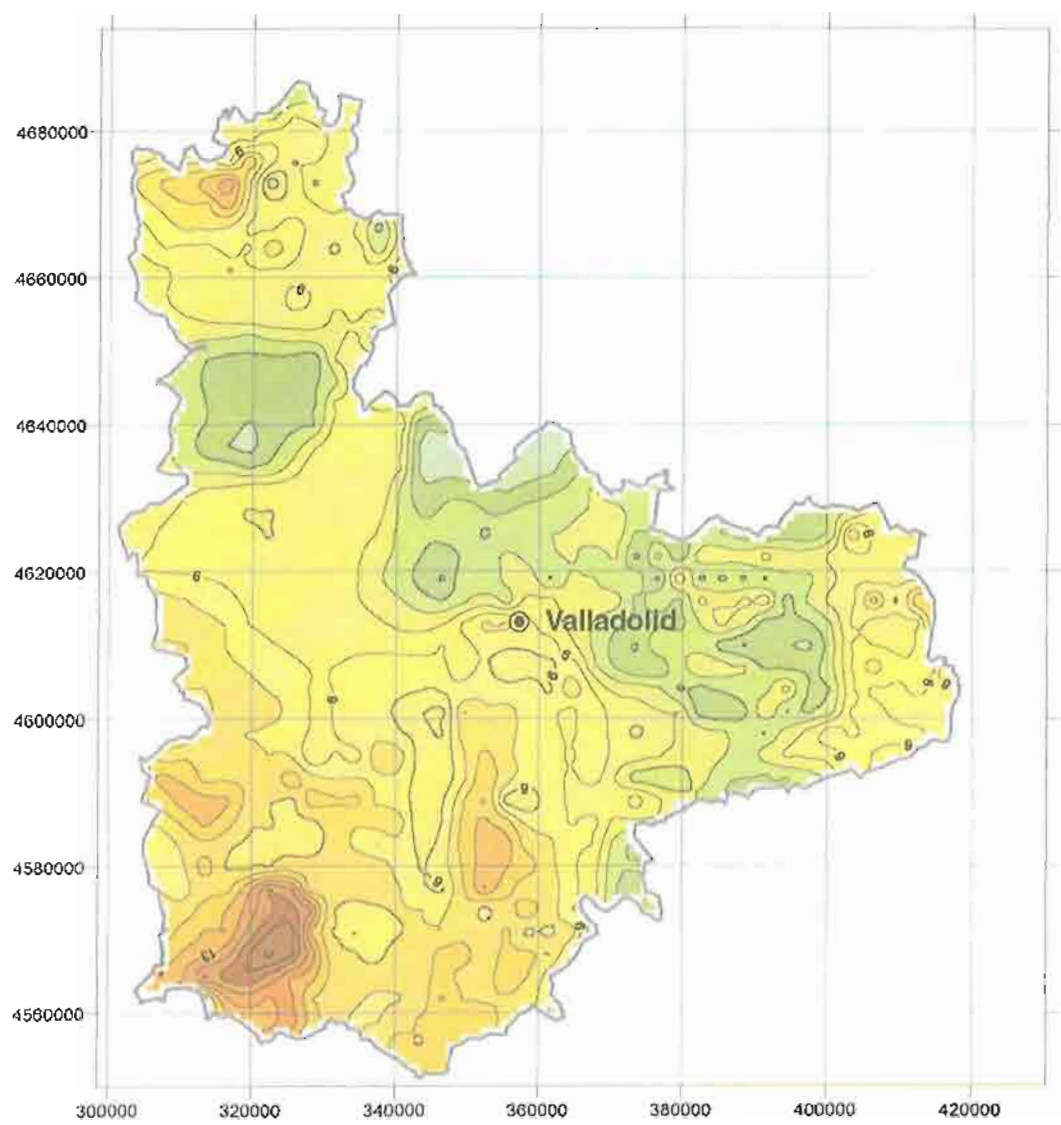


Valencia

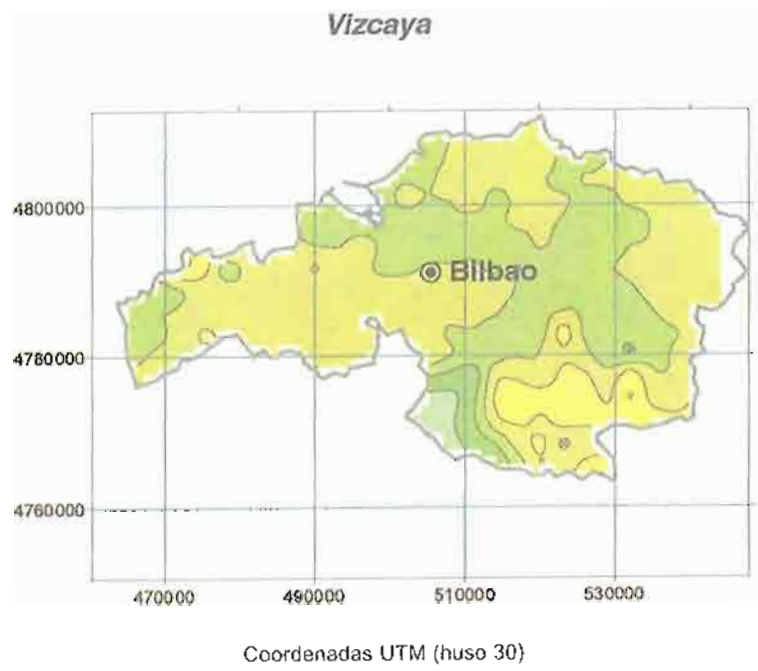


Coordenadas UTM (huso 30)

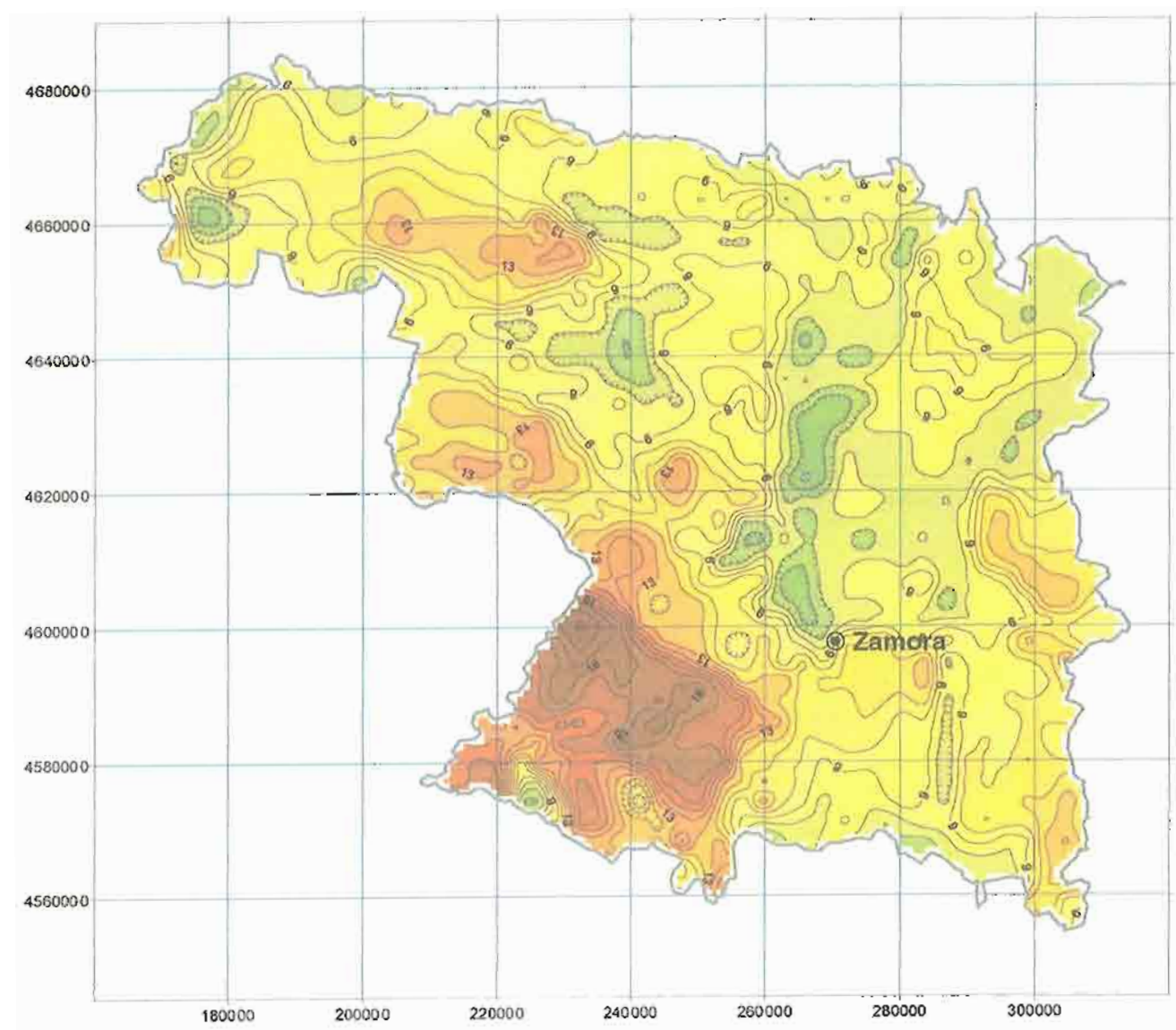
Valladolid



Coordenadas UTM (huso 30)

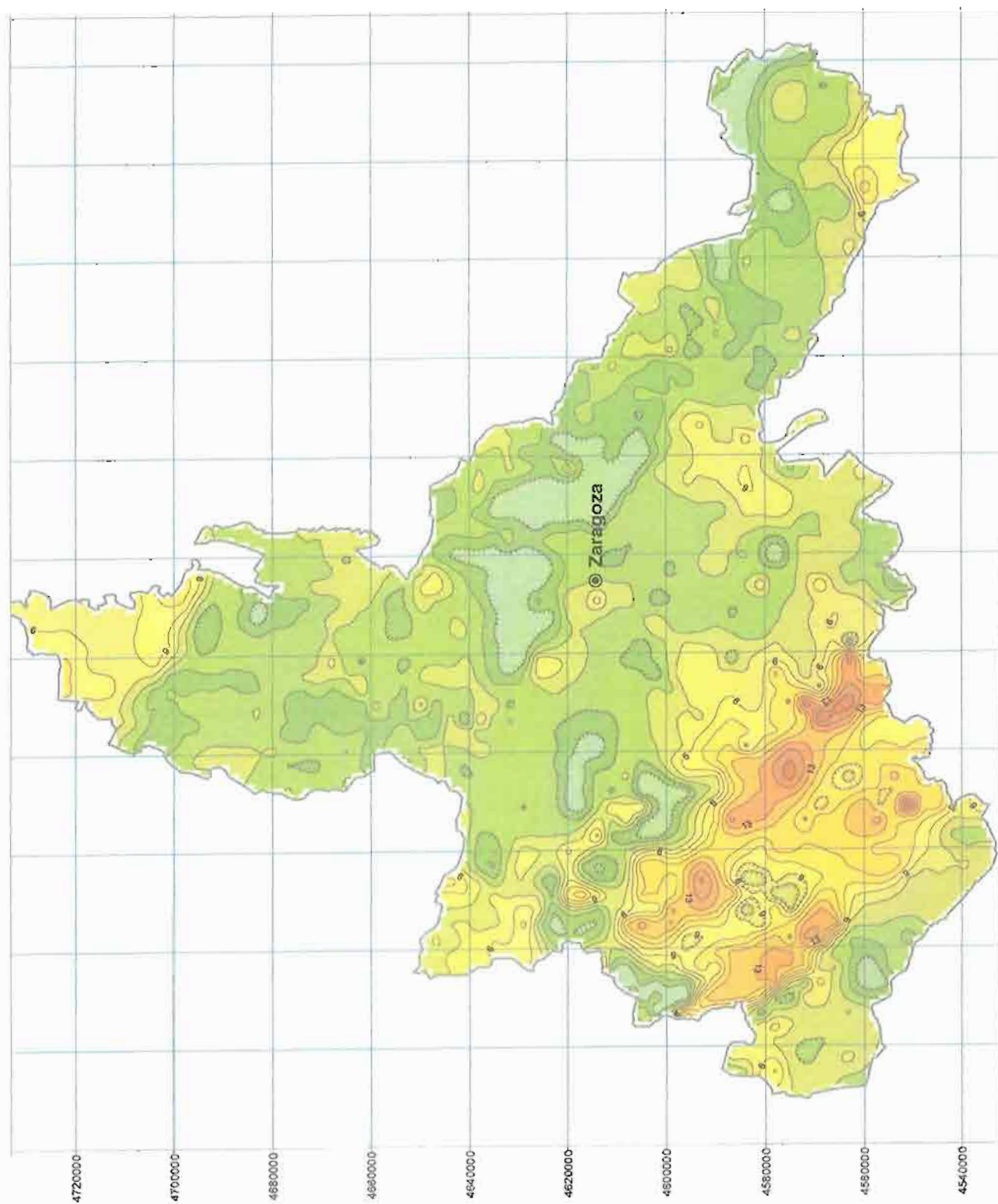


Zamora



Coordenadas UTM (huso 30)

Zaragoza



Coordenadas UTM (huso 30)

Índice de contenidos

INTRODUCCIÓN	9
SUMARIO	11
ESTRUCTURA DE LA PUBLICACIÓN	13
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO MARNA	15
2. LA RADIACIÓN IONIZANTE NATURAL EN EL AMBIENTE. FUENTES DE RADIACIÓN EXTERNA E INTERNA	19
Fuentes de radiación externa e interna	21
1. Radiación cósmica	22
1.1. Radiación cósmica primaria: rayos cósmicos galácticos y solares	22
1.1.1. Variaciones de la radiación cósmica con el espacio y tiempo	23
1.1.2. Contribución de la radiación cósmica a la dosis equivalente anual de origen cósmico ..	24
1.2. Radiación cósmica secundaria: radionucleidos cosmogénicos	24
1.2.1. Radionucleidos producidos por espalación	25
1.2.2. Radionucleidos producidos por captura de neutrones	26
2. Radiación terrestre	27
2.1. Potasio	28
2.1.1. Características	28
2.1.2. Potasio en los minerales y rocas	29
- Potasio en los minerales	29
- Contenido de potasio en rocas ígneas efusivas o plutónicas	29
- Contenido de potasio en rocas efusivas o volcánicas	29
- Contenido de potasio en rocas carbonatadas	30
- Contenido de potasio en sedimentos arcillosos	30
- Contenido de potasio en las areniscas	30
- Contenido de potasio en rocas metamórficas	30
- Potasio en suelos	31
- Potasio en aguas	31
2.2. Rubidio	31
2.2.1. Características	31
2.2.2. Rubidio en las rocas	32
2.3. Uranio	32
2.3.1. Características	32
2.3.2. Isótopos del uranio	34
Características del uranio natural	34
La serie de desintegración del uranio-238	35
- Primera subserie, Uranio-238 → uranio-234	36
- Segunda subserie, Torio-230	36

- Tercera subserie. Radio-226	36
- Cuarta subserie. Radón-222	36
- Quinta subserie. Plomo-210	43
La serie de desintegración del uranio-235	43
El reactor natural de Oklo	44
2.4. Torio	45
2.4.1. Características	45
2.4.2. Isotopos del torio	46
Características del torio-232	46
- Primera subserie. Torio-232	47
- Segunda subserie. Radio-228 a radio-224	47
- Tercera subserie. Radón-220 a talio-208	47
2.5. Correlaciones entre los contenidos de uranio, torio y potasio	48
2.6. Variaciones en la radiactividad natural terrestre	51
3. CONSIDERACIONES DOSIMÉTRICAS	53
1. Unidades de medida más frecuentes	54
2. Equivalencia entre unidades	56
3. Fuentes naturales que más influyen en la dosis al ser humano	57
3.1. Radiación cósmica y radiación terrestre. Contribución relativa	57
3.2. Radiación externa y radiación interna. Contribución relativa	58
3.3. Radiación externa. Contribución relativa de las diferentes fuentes	58
3.4. Radiación interna. Contribución de la serie del uranio	58
3.5. Radiación interna. Contribución de la serie del torio	59
4. EL PROYECTO MARNA. MAPA DE RADIACIÓN GAMMA NATURAL	61
1. Antecedentes	62
2. Alternativas planteadas para cubrir los objetivos del proyecto Marna	63
2.1. Utilización de medidas de diferente representatividad. Medidas terrestres y aéreas	63
2.2. Utilización de registros brutos o en su lugar los mapas finales de exploración aérea	63
2.3. Utilización de medidas de radiación total o medidas de potasio, uranio y torio	64
3. Datos de partida	64
3.1. Medidas aéreas y terrestres anteriores al inicio del proyecto Marna	64
3.1. Nuevas medidas de tasa de exposición realizadas en el proyecto Marna	65
4. Equipos	66
4.1. Medidas de radiación gamma total	66
4.2. Medidas espectrométricas	66

4.3. Nuevas medidas realizadas en el proyecto Marna	67
4.4. Aviones, sistemas de navegación y de registro de las medidas	68
5. Metodología	68
5.1. Extracción e informatización de datos	68
5.2. Establecimiento de correlaciones	69
5.2.1. Correlaciones entre medidas de radiometría terrestre obtenidas con diferentes equipos	69
5.2.2. Correlaciones entre medidas terrestres y aéreas	69
5.2.3. Establecimiento de correlaciones entre vuelos de distinta naturaleza	70
5.2.4. Correlaciones geología-radiometría	70
5.3. La elaboración de mapas	71
5.3.1. El mapa a escala 1/1.000.000	71
5.3.2. Mapas detallados a otras escalas	73
6. Banco de datos generado	74
7. Resultados y aplicaciones del proyecto Marna	75
7.1. Evaluación de los niveles de radiación gamma natural	75
7.2. Mapas de tasa de exposición. Distribución por provincias	76
7.3. Evaluación de la representatividad de otros métodos de medida de la radiación	76
7.4. Evaluación y control de incrementos de radiación debidos a causas naturales o no naturales ...	76
7.5. Elaboración de mapas de tasa de dosis absorbida en aire	77
7.6. Elaboración de mapas de tasa de dosis equivalente anual	78
7.7. Mapas de potencial de emisión de radón	78
7.8. Mejora en el conocimiento de los fundamentos de la protección radiológica aplicada a las radiaciones de bajo nivel	81
8. Futuro	82
9. Agradecimientos	82
10. Publicaciones sobre el proyecto Marna	83
11. Referencias bibliográficas	84
5. MAPAS PROVINCIALES DE TASA DE EXPOSICIÓN	87

