

CLIMATOLOGÍA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS Y DE DÍAS DE TORMENTA EN ESPAÑA

José Ángel Núñez Mora
Jesús Riesco Martín
Manuel Antonio Mora García



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA

AEmet
Agencia Estatal de Meteorología

CLIMATOLOGÍA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS Y DE DÍAS DE TORMENTA EN ESPAÑA

José Ángel NÚÑEZ MORA, Jesús RIESCO MARTÍN, Manuel Antonio MORA GARCÍA

Agencia Estatal de Meteorología

jnunezm@aemet.es, jriescom@aemet.es, mmoray@aemet.es



MINISTERIO
PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA



Madrid, 2019

Las imágenes de las cubiertas están extraídas de una fotografía de David Mancebo Atienza que muestra un trío de descargas con mesociclón, sin ningún tipo de composición.



Aviso Legal: los contenidos de esta publicación podrán ser reutilizados, citando la fuente y la fecha, en su caso, de la última actualización

Edita:

© Ministerio para la Transición Ecológica
Agencia Estatal de Meteorología
Madrid, 2019

Catálogo de Publicaciones de la Administración General del Estado:
<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

NIPO: 639-19-007-7
Depósito legal: M-23855-2019
<https://doi.org/10.31978/639-19-007-7>

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET)
C/ Leonardo Prieto Castro, 8
28040 Madrid
<http://www.aemet.es/>



@Aemet_Esp



<https://www.facebook.com/AgenciaEstatalMeteorologia>

ÍNDICE

PRÓLOGO	7
1. INTRODUCCIÓN	9
2. GENERALIDADES SOBRE ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA	13
3. ESTUDIO ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS	17
3.1. Datos utilizados	19
3.2. Estadística descriptiva de descargas eléctricas en la Península y Baleares	19
3.2.1. <i>Distribución anual y mensual</i>	20
3.2.2. <i>Distribución horaria</i>	21
3.2.3. <i>Polaridad</i>	23
3.2.4. <i>Intensidad</i>	24
3.2.5. <i>Multiplicidad</i>	25
3.3. Estadística descriptiva de descargas eléctricas en las islas Canarias	26
3.3.1. <i>Distribución anual y mensual</i>	26
3.3.2. <i>Distribución horaria</i>	27
3.3.3. <i>Polaridad</i>	29
3.3.4. <i>Intensidad</i>	30
3.3.5. <i>Multiplicidad</i>	31
4. DENSIDAD DE DESCARGAS ELÉCTRICAS	33
4.1. Valores medios de densidad	35
4.2. Mapas de densidad de descargas	35
4.3. Conclusiones sobre la densidad de descargas	52
5. DÍAS DE TORMENTA	63
5.1. Estadística descriptiva del número de días de tormenta	65
5.1.1. <i>Días de tormenta en la Península y Baleares</i>	65
5.1.2. <i>Días de tormenta en Canarias</i>	66
5.1.3. <i>Días de tormenta en capitales de provincia y ciudades autónomas</i>	68
5.2. Mapas de días de tormenta	69
5.2.1. <i>Conclusiones sobre el número de días de tormenta</i>	87
5.3. Número de descargas en cada día de tormenta en la Península y Baleares	95
5.4. Días de tormenta de gran actividad eléctrica	97
5.4.1. <i>Días con mayor número de descargas en la península ibérica e islas Baleares</i>	97
5.4.2. <i>Días con mayor número de descargas en las islas Canarias</i>	100

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
ANEXO I. Características de la red de detección de descargas eléctricas de AEMET. .	107
ANEXO II. Datos seleccionados. Parámetros de calidad y precisión de la red. Filtrado de datos.....	113
Anexo II.A. Preselección de la ventana espacial y filtrado de datos	115
Anexo II.B. Datos utilizados para la generación de esta climatología.....	122
ANEXO III. Metodología utilizada para el cálculo de la densidad de descargas eléctricas	123
ANEXO IV. Metodología utilizada para la estimación del número de días de tormenta. .	127
Anexo IV.A. Ejemplos de radios estimados para la consideración de tormenta en observatorios	134
AGRADECIMIENTOS	139

PRÓLOGO

Las tormentas constituyen uno de los fenómenos de la naturaleza más asombrosos. Los majestuosos cumulonimbos y el espectáculo de luz y sonido que ofrecen relámpagos y truenos es fascinante. Sin embargo, se trata de un fenómeno meteorológico adverso de primer orden. Todos los años, a nivel global, miles de personas son fulminadas y los daños en infraestructuras y bienes materiales son muy cuantiosos. Si consideramos otros fenómenos adversos asociados a las tormentas, como intensas precipitaciones, granizo, fuertes rachas de viento o tornados, el número de víctimas se incrementa en un orden de magnitud, por lo que una de las principales tareas de los Servicios Meteorológicos es la predicción y vigilancia de las tormentas.

El calendario meteoro-fenológico del Servicio Meteorológico Nacional, iniciado en 1943 y que actualmente edita AEMET, comenzó a incluir la estadística anual de fallecidos por rayo en 1950. A iniciativa de José María Lorente, que publicó un artículo titulado *“Triste estadística. ¿Cuántos mueren por rayos en España”*, se recopilaron datos desde 1941. Durante el período 1941-1981 fallecieron en España 1981 personas. Algunos años resultaron desoladores, como 1955, con 133 muertos; 1949, con 132; o 1959, con 130. Sin embargo, a finales de los años 70 y principios de los 80 del pasado siglo el número de fallecidos disminuyó notablemente, por lo que esta sección se dejó de incluir en el calendario, siendo la meteoróloga Mari Mili García Pertierra, fallecida recientemente y a quien todos recordamos, la encargada de elaborar la última estadística que apareció en el calendario de 1982. Aunque en la década 1995-2015 fallecieron 52 personas fulminadas por rayo en España, el despoblamiento rural, la labor de divulgación de los peligros asociados a las tormentas y las alertas a la población en base a los avisos meteorológicos han contribuido a que estas cifras disminuyan drásticamente en España.

El rayo es un fenómeno casi instantáneo que afecta a un área muy pequeña, por lo que su detección y localización es muy compleja. La red de detección de descargas eléctricas, con cobertura nacional, se inició en 1992. Los avances tecnológicos de los últimos años confieren a estos datos una gran precisión y fiabilidad, constituyendo una herramienta fundamental para la vigilancia de los fenómenos tormentosos.

La presente climatología de tormentas y descargas eléctricas no se limita a mostrar los datos estadísticos, sino que también analiza desde el punto de vista técnico la mayor o menor incidencia de las tormentas en nuestro territorio y las épocas más propicias para su ocurrencia. Esta climatología, de carácter objetivo, toma el relevo de los anteriores mapas de días de tormenta elaborados manualmente, con gran profusión de mapas y gráficos muy descriptivos. Las excelentes fotografías de tormentas que se incluyen captan la esencia de este fenómeno atmosférico, tan bello como peligroso. Los aficionados a la meteorología, en especial los “caza-tormentas”, que realizan una valiosa labor de seguimiento y vigilancia de este fenómeno en las redes sociales, dispondrán de abundante información complementaria para sus actividades.

En el actual escenario de cambio climático, en el que es muy probable una mayor frecuencia e intensidad de fenómenos extremos como las tormentas en nuestro país, adquieren gran importancia los estudios climatológicos, por lo que esta obra será sin duda una referencia para los próximos años.

Son numerosos los adjetivos que se utilizan para calificar a las tormentas. Nuestro gran poeta, Antonio Machado, se refiere a ellas como “*la nube torva*”, que significa “*fiera, espantosa, airada y terrible a la vista*”. Pero para los meteorólogos sigue siendo “*la nube caprichosa*” y la predicción de tormentas continúa mostrándose como un gran desafío. Los modelos numéricos de alta resolución, cada vez más fiables, son una herramienta inestimable, pero ubicar espaciotemporalmente con precisión la ocurrencia de intensas tormentas sigue siendo el gran reto para los próximos años.

*Mis viejos mares duermen; se apagaron
sus espumas sonoras
sobre la playa estéril.
La tormenta
camina lejos en la nube torva.
Vuelve la paz al cielo;
la brisa tutelar esparce aromas
otra vez sobre el campo, y aparece,
en la bendita soledad, tu sombra.*

Fragmento del poema “En la desnuda tierra
del camino”. Antonio Machado

Miguel Ángel López González
Presidente de AEMET

1. INTRODUCCIÓN



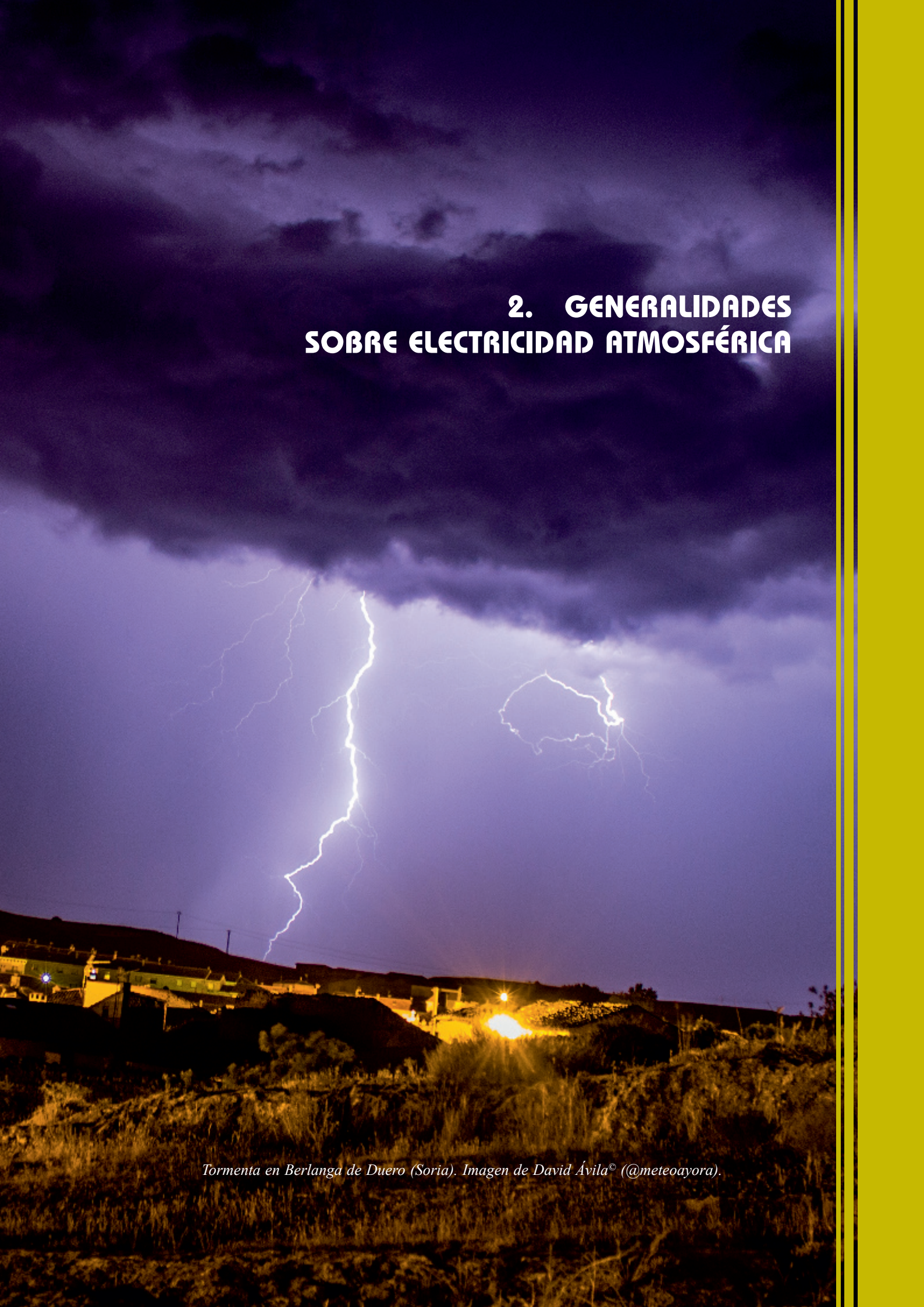
La actividad eléctrica asociada a las tormentas es un fenómeno meteorológico de gran impacto que provoca numerosas pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños materiales. Por tanto, conocer la distribución espacial y temporal de las descargas eléctricas en tiempo real es fundamental para la adecuada vigilancia de este fenómeno meteorológico adverso, que afecta notablemente a las actividades humanas realizadas al aire libre, a la gestión del tráfico aéreo y las operaciones de repostaje de aeronaves, provoca averías e interrupciones de suministro eléctrico y daños en aerogeneradores de parques eólicos y otras infraestructuras, genera incendios forestales, etc. Los datos almacenados a lo largo de los años son fundamentales para una mejor comprensión de la actividad tormentosa, a través de las climatologías de descargas eléctricas y del número de días de tormenta, que también contribuyen a una mejor predicción de este fenómeno. Asimismo, estos datos son imprescindibles para la investigación de determinados siniestros, siendo demandados por las compañías aseguradoras y juzgados.

El objeto de esta publicación es mostrar a partir de gráficos, tablas y mapas, la representación espaciotemporal de la distribución de descargas eléctricas y del número de días de tormentas en España, a partir de la información contenida en la base de datos de descargas de la Agencia Estatal de Meteorología.

La distribución seguida es la siguiente:

- en el capítulo 2 se hace una introducción breve teórica sobre descargas eléctricas, así como de conceptos básicos sobre rayos y tormentas;
- el capítulo 3 está dedicado al estudio estadístico de las descargas en dos áreas geográficas (Península-Baleares y Canarias);
- en el capítulo 4 se analiza la densidad espacial, incluyendo mapas y tablas, así como algunas conclusiones básicas;
- el capítulo 5 se estructura de forma análoga al capítulo 4, pero en este caso se dedica al número estimado de días de tormenta; y
- finalmente se adjunta un apartado de referencias bibliográficas y los distintos anexos, destinados a detallar la metodología seguida y algunos aspectos técnicos.

2. GENERALIDADES SOBRE ELECTRICIDAD ATMOSFÉRICA



Tormenta en Berlanga de Duero (Soria). Imagen de David Ávila® (@meteoayora).

La atmósfera se caracteriza por la presencia de un campo eléctrico orientado desde niveles altos hacia la superficie terrestre, dando lugar a una débil corriente eléctrica conocida como “corriente de buen tiempo”. Este campo eléctrico se debe a la presencia de dos superficies distantes cargadas eléctricamente con signo opuesto, por un lado, la ionosfera y por otro la superficie terrestre. En la ionosfera, una de las capas elevadas de la atmósfera, existe una gran densidad de electrones y de iones (carga positiva) como resultado de la interacción de la radiación solar más energética (rayos X y radiación ultravioleta) con los gases que conforman la atmósfera en niveles altos. Por otro lado, la superficie terrestre se caracteriza por la presencia de cargas eléctricas negativas y positivas, siendo más numerosas las primeras, es decir, posee una carga neta negativa. La corriente de buen tiempo no es más que el proceso natural de descarga del gran condensador eléctrico esférico o condensador telúrico formado por la ionosfera (carga positiva) y la superficie terrestre (carga negativa). Los rayos nube-tierra realizan un trasvase neto de carga eléctrica negativa entre la nube cumulonimbo y la superficie terrestre, por lo que las tormentas eléctricas constituyen el proceso natural por el que este gran condensador vuelve a recuperar su carga, cerrando un ciclo que se repite indefinidamente.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) define una tormenta como “*descarga brusca de electricidad atmosférica que se manifiesta por un resplandor breve (relámpago) y por un ruido seco o un estruendo sordo (trueno). Las tormentas se asocian a nubes convectivas (Cumulonimbus) y suelen acompañarse de precipitación en forma de chubascos de lluvia o de hielo o, en ocasiones, de nieve, nieve granulada, hielo granulado o granizo*”.

La descarga eléctrica (*stroke*) se genera en el seno de la nube cumulonimbo, como resultado de un complejo proceso microfísico previo de electrificación en el que son fundamentales las corrientes verticales de aire que permiten la interacción de agua subfundida (en estado líquido a temperaturas inferiores a 0 °C) y partículas de hielo de diferente tamaño. El resultado final es una distribución de cargas eléctricas característica, conocida como modelo tripolar, con un centro de carga positiva en la zona superior del cumulonimbo y un centro de carga negativo en la parte inferior próxima a la isoterma de -10 °C, y de forma complementaria, un pequeño núcleo de cargas positivas en el extremo inferior a una altura próxima a la isoterma de 0 °C. La ruptura del fuerte campo eléctrico generado da lugar a la formación de intensas corrientes eléctricas intranube, nube a nube, nube a aire o bien nube a tierra a partir de los distintos centros de carga eléctrica. Aunque la formación de una descarga eléctrica se trata de un proceso complejo que consta de diferentes fases, el resultado final es un estrecho canal de gas ionizado (plasma) que puede tener longitudes de varios kilómetros, transportando en un breve lapso de tiempo carga eléctrica con intensidades de decenas de kiloamperios y alcanzando temperaturas del orden de 30 000 °C.

A nivel global, se producen en torno a unos 44 rayos cada segundo (CHRISTIAN *et al.*, 2003), fundamentalmente en zonas terrestres y en zonas intertropicales, aunque menos de la mitad impactan en la superficie terrestre (UMAN y KRIDER, 1989). La mayor densidad anual de rayos se produce en países de África central (figura 2.1).

Dentro de las descargas nube a tierra, de acuerdo a su polaridad, se puede distinguir entre descargas positivas y descargas negativas, y según el sentido de la transferencia de carga inicial, entre corrientes ascendentes o corrientes descendentes. La mayoría de las descargas son negativas descendentes (90 %).

Las descargas nube a tierra no suelen producirse de forma aislada, sino agrupadas en el espacio (a través de un mismo canal o separadas metros o decenas de metros y excepcionalmente varios kilómetros) y en el tiempo. Aquellas descargas (*strokes*) que se producen en un intervalo temporal inferior a

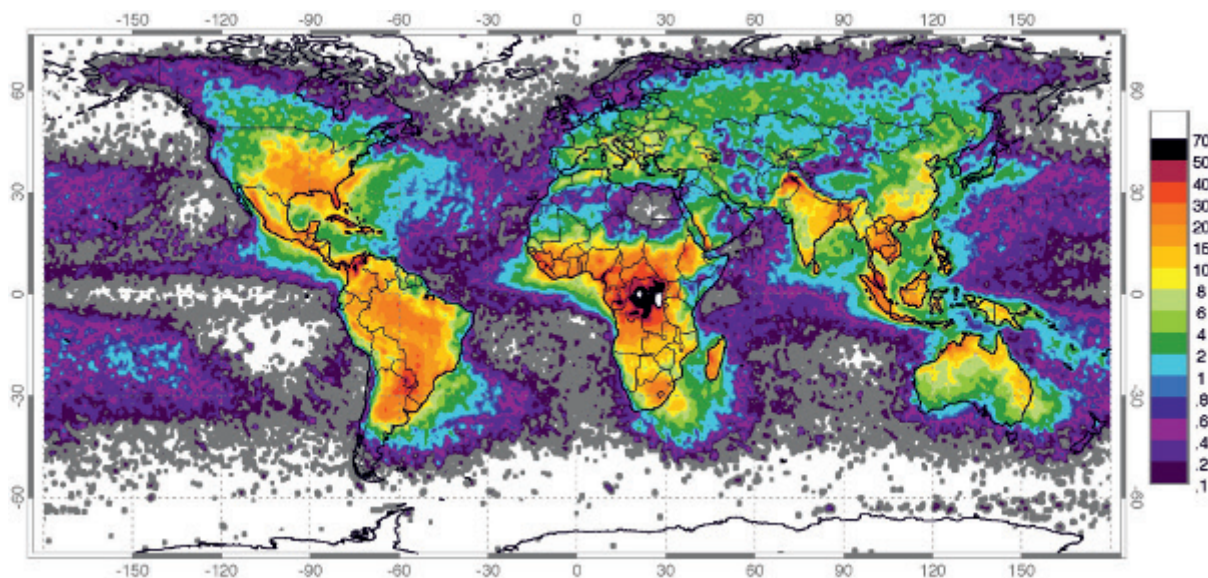


Figura 2.1. Distribución global de la densidad anual de rayos (rayos/km², período de abril de 1995 a febrero de 2003) con observaciones combinadas del sensor OTD (hasta marzo de 2000) y del sensor LIS (desde enero de 1998) de la NASA. Fuente: GHRC-NASA.

un segundo y distantes menos de 10 km de la primera descarga se consideran asociadas a un único rayo (*flash*, *strike* o *lightning*), que por tanto puede presentar distinta multiplicidad, según el número de descargas asociadas, que suele oscilar entre 3 y 5, aunque el rango varía entre 1 y 26. Cada descarga individual tiene una duración temporal muy breve, del orden de pocos microsegundos (millonésimas de segundo) hasta varios cientos de milisegundos. Durante este proceso se emite energía electromagnética en un amplio espectro, desde unos pocos hercios hasta altas frecuencias (rayos gamma), incluyendo frecuencias acústicas que generan el sonido asociado al trueno, y el espectro visible, que permite visualizar el relámpago. Esta señal electromagnética, que se propaga en todas las direcciones, es utilizada por los distintos sistemas de detección para la localización espaciotemporal de la descarga.

En el anexo I se explican las características de la red de detección de descargas eléctricas de AEMET y en el anexo II se describen los errores asociados a estas redes, analizando distintos parámetros de calidad y su evolución en el tiempo desde su puesta en operación en el año 1992.



3. ESTUDIO ESTADÍSTICO DESCRIPTIVO DE DESCARGAS ELÉCTRICAS

*Imagen de una tormenta en València sobre las 23:30 del 4 de junio de 2017 captada con objetivo ojo de pez.
Fotografía de Paco Burguera Catalá® (@PacoBurguera).*

En el presente capítulo se realiza un completo estudio estadístico de las descargas eléctricas nube-tierra registradas durante el período 2007-2016 en las dos zonas geográficas de estudio, teniendo en cuenta su distribución anual, estacional, mensual y según su polaridad, intensidad y multiplicidad.

3.1. Datos utilizados

En el anexo II se describe la metodología empleada para la selección de los datos de descargas. En primer lugar, se determinan las ventanas geográficas que contienen los datos que se van a analizar, una para la Península y Baleares y otra para las islas Canarias (figura 3.1). En segundo lugar, se justifica la elección del período 2007-2016 como el más adecuado desde el punto de vista de la máxima calidad. Por último, los datos seleccionados de esta forma son sometidos adicionalmente a un filtro adicional de calidad según se explica en dicho anexo.

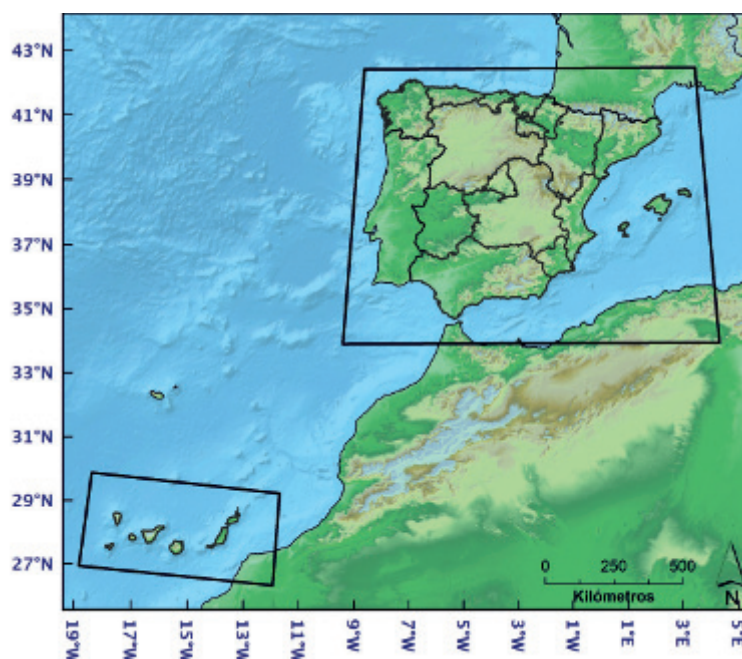


Figura 3.1. Ventanas geográficas utilizadas para realizar el estudio estadístico y representar distintos mapas.

3.2. Estadística descriptiva de descargas eléctricas en la Península y Baleares

A continuación se muestra el análisis estadístico descriptivo de la distribución temporal y de las principales características como polaridad, intensidad y multiplicidad de las descargas eléctricas para el área geográfica de la Península y Baleares.

3.2.1. Distribución anual y mensual

En la base de datos depurada de descargas del período 2007-2016 hay un total de 12 577 044 registros en la ventana geográfica de la Península e islas Baleares. En los diez años del estudio, el de mayor actividad fue 2014, y el de menor actividad 2012, como puede apreciarse en la figura 3.2.

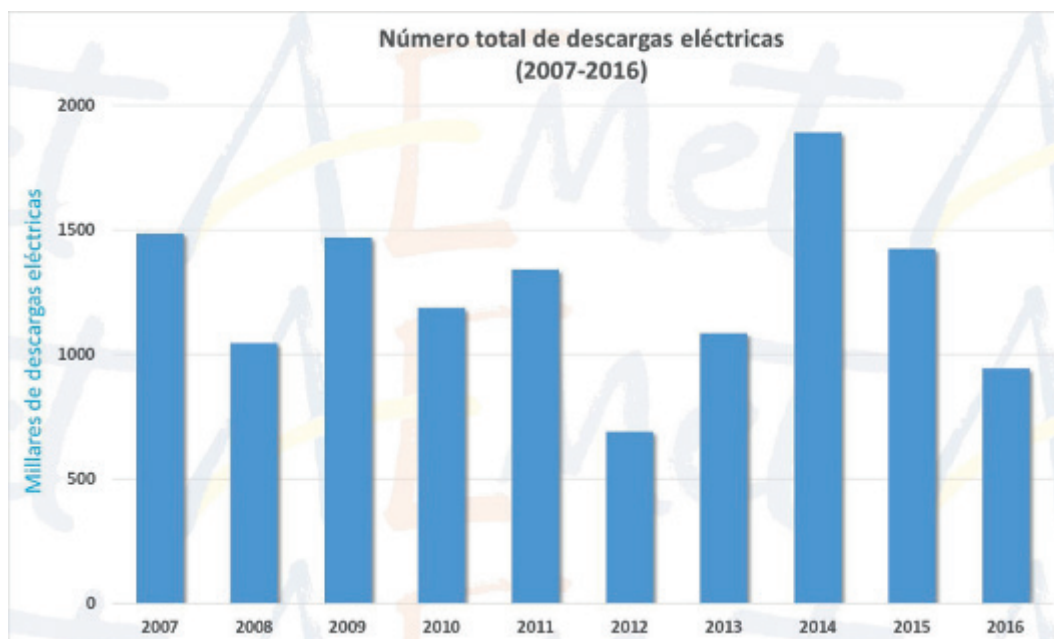


Figura 3.2. Número total anual de descargas eléctricas en la Península y Baleares (millares de descargas).

El mes con mayor número de descargas en la Península y Baleares es septiembre, con casi una cuarta parte del total anual, y el menor número de descargas se registra en los meses invernales y en el inicio de la primavera, de enero a marzo, con menos de un 2 % del total anual en cada uno de estos meses (figura 3.3), resultados similares a los de estudios anteriores que figuran en la bibliografía.

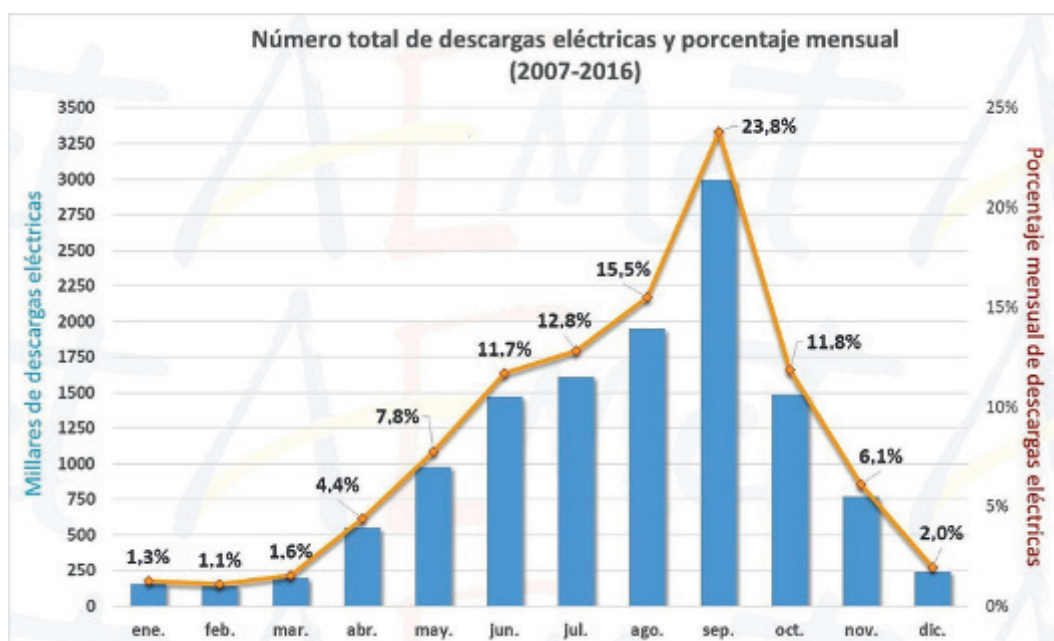


Figura 3.3. Número total mensual y porcentaje mensual de descargas eléctricas en la Península y Baleares (millares de descargas).

Sobre el porcentaje mensual de descargas frente al total anual, hay que tener en cuenta que los meses tienen diferente número de días (por ejemplo, agosto siempre tiene 31 y febrero 28 o 29), lo cual afecta al resultado. Otro aspecto a tener en cuenta es que para contabilizar las descargas diarias se utiliza el periodo 00-24 UTC, que difiere en una o dos horas respecto el horario oficial según la época del año.

3.2.2. Distribución horaria

Por horas, la máxima actividad anual en la Península y Baleares se presenta por la tarde, entre las 15:00 y las 17:00 UTC (figura 3.4), en fase con el máximo de calentamiento diurno, que se presenta como un elemento fundamental como mecanismo de disparo de las tormentas, mientras que el mínimo de actividad se observa desde primera hora de la mañana hasta poco antes del mediodía, entre las 07:00 y las 11:00 (hora UTC).

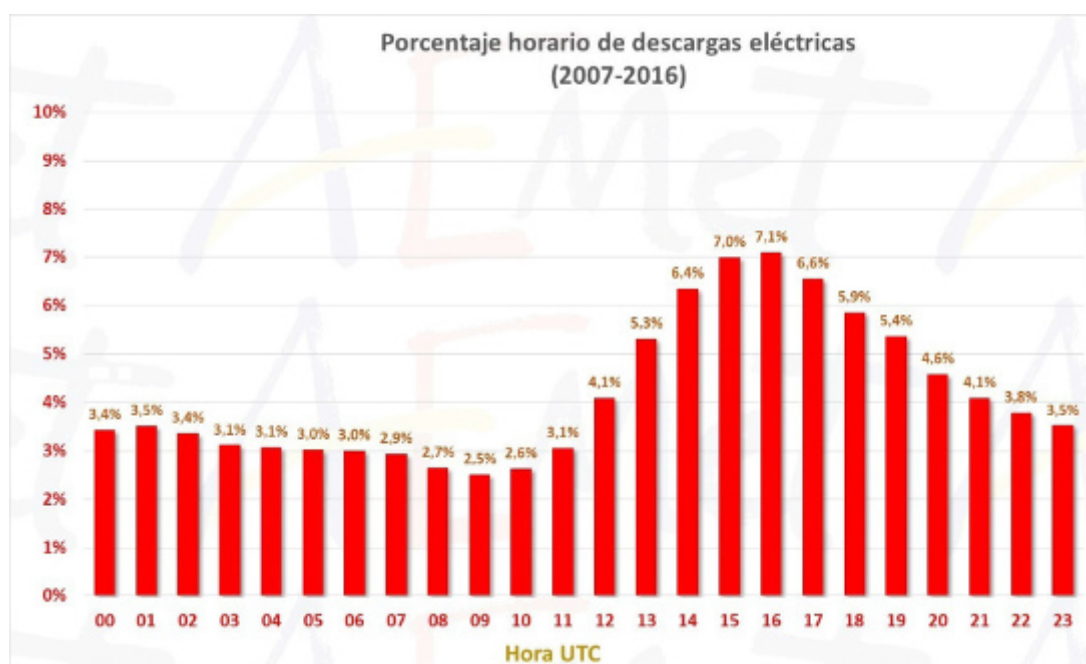


Figura 3.4. Porcentaje horario de descargas eléctricas en la Península y Baleares (hora UTC).

Pero si se agrupan los datos horarios por meses y por estaciones (figura 3.5), se obtienen resultados muy interesantes que ya ofrecen una primera caracterización de los tipos de tormentas en la península ibérica en las diferentes estaciones del año, y señalan cuáles son los factores clave que prevalecen en el mecanismo de disparo de cada tipo de tormentas.

En primavera y verano hay un clarísimo predominio de las tormentas de primera hora de la tarde (ligeramente más adelantadas en horario las tormentas primaverales), lo que indica que en primavera y verano las tormentas se desarrollan en fase con el calentamiento diurno y con las convergencias de viento que surgen en el interior de la Península debido al distinto comportamiento térmico de las tierras y los mares a partir de mediodía. En primavera y verano el porcentaje de descargas respecto al total estacional en horario nocturno y por la mañana, es mucho más bajo que el porcentaje de descargas en esa fase del día en otoño e invierno.

Sin una clara preferencia horaria se presenta la distribución de las descargas en las tormentas de invierno y de otoño, aunque en invierno se suele observar una ligera mayor frecuencia de madrugada y en otoño por la tarde. Sin embargo, en ambos casos, el principal mecanismo de disparo convectivo responde a situaciones en las que aparece una depresión o vaguada atlántica con pasos frontales, o bien la existencia de una dana (depresión aislada en niveles altos), respondiendo más a factores dinámicos que al calentamiento diurno.

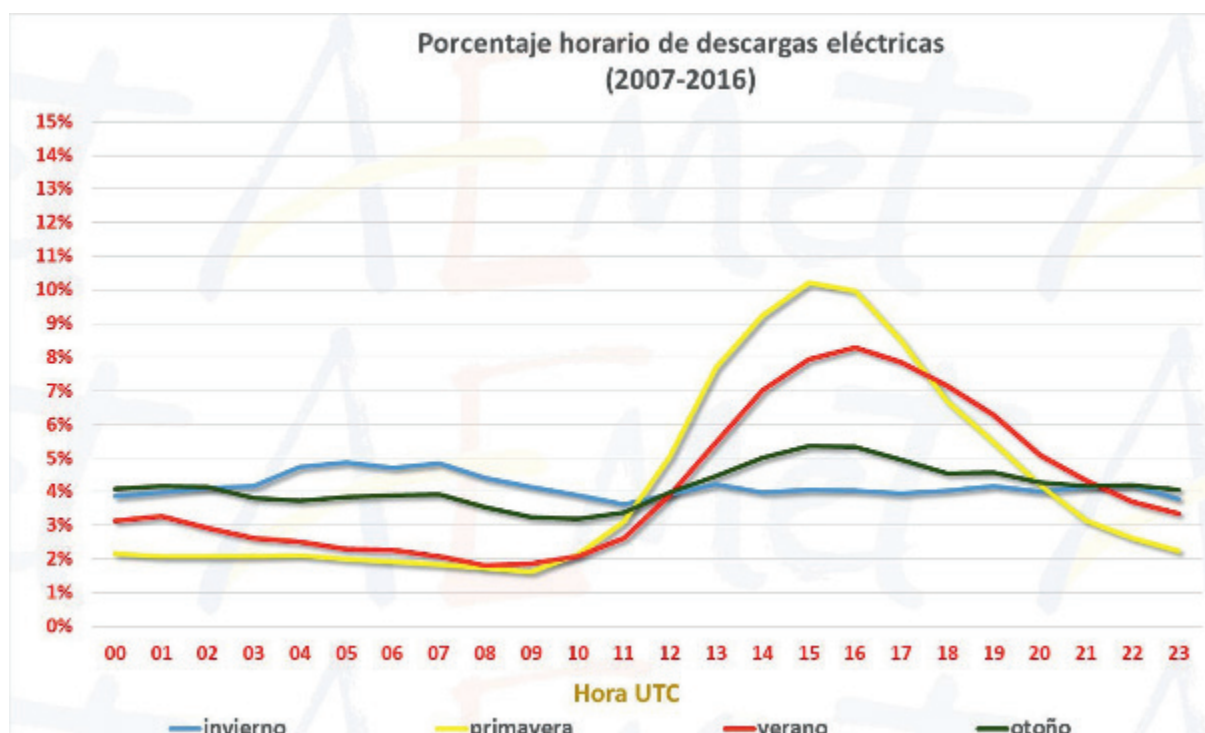


Figura 3.5. Porcentaje horario de descargas eléctricas por estaciones en la Península y Baleares.

Entre febrero y septiembre (tabla 3.1), las horas de mayor frecuencia de descargas son las 15 y las 16 UTC (entre las 15:00 y las 16:59 UTC), pero es sobre todo a las 16 UTC cuando más descargas se producen en los meses de verano (junio, julio y agosto), que en hora oficial peninsular de verano (2 horas más que la hora UTC), significa que en la Península y Baleares el mayor número de descargas se registra entre las 18:00 y las 18:59 hora oficial.

En diciembre y enero, meses con pocas descargas, estas presentan un máximo a última hora de la madrugada, entre las 05:00 y las 07:59 UTC (06:00 a 08:59 hora oficial peninsular de invierno), y en los meses centrales del otoño, el mayor número de descargas se registra a última hora del día, entre las 20:00 y las 22:59 UTC, coherente con el modelo conceptual de tormentas otoñales asociadas a la inestabilidad mediterránea.

Mes	Hora de mayor frecuencia de descargas (UTC)
Enero	05 UTC
Febrero	15 UTC
Marzo	16 UTC
Abril	15 UTC
Mayo	15 UTC
Junio	16 UTC
Julio	16 UTC
Agosto	16 UTC
Septiembre	15 UTC
Octubre	22 UTC
Noviembre	20 UTC
Diciembre	07 UTC

Tabla 3.1. Hora de mayor frecuencia de descargas en el cómputo mensual.

3.2.3. Polaridad

En cuanto a la polaridad, en el promedio anual, el 89 % de las descargas tienen polaridad negativa, frente al 11 % de las positivas (figura 3.6).

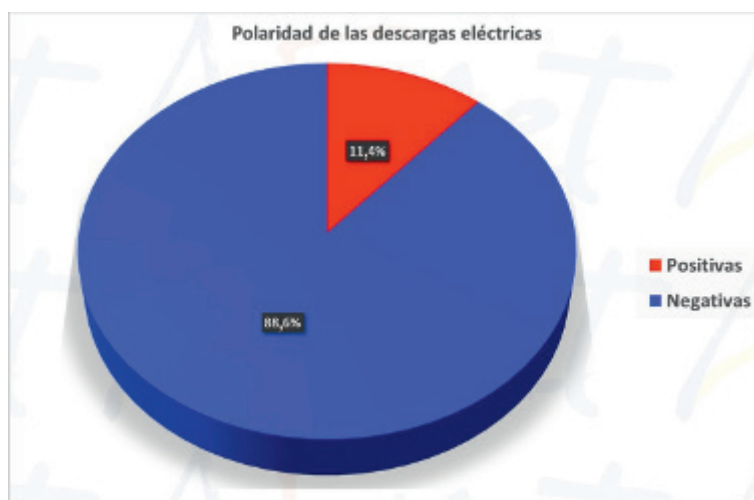


Figura 3.6. Porcentaje de descargas eléctricas en la Península y Baleares según su polaridad.

Se observa un mayor porcentaje de descargas de polaridad positiva en los meses de invierno (figura 3.7), especialmente en febrero, cuando superan el 20 % en el promedio mensual, coincidiendo con el modelo conceptual de tormenta invernal, en el que debido a una tropopausa baja y una cizalladura vertical del viento notable, el núcleo de carga positiva en la parte superior del cumulonimbo se encuentra más bajo y no está apantallado inferiormente por el núcleo de carga negativa, favoreciendo la generación de descargas positivas nube-tierra. Es en el otoño, en septiembre y sobre todo en octubre, cuando el porcentaje de descargas de polaridad positiva es inferior al 10 %.

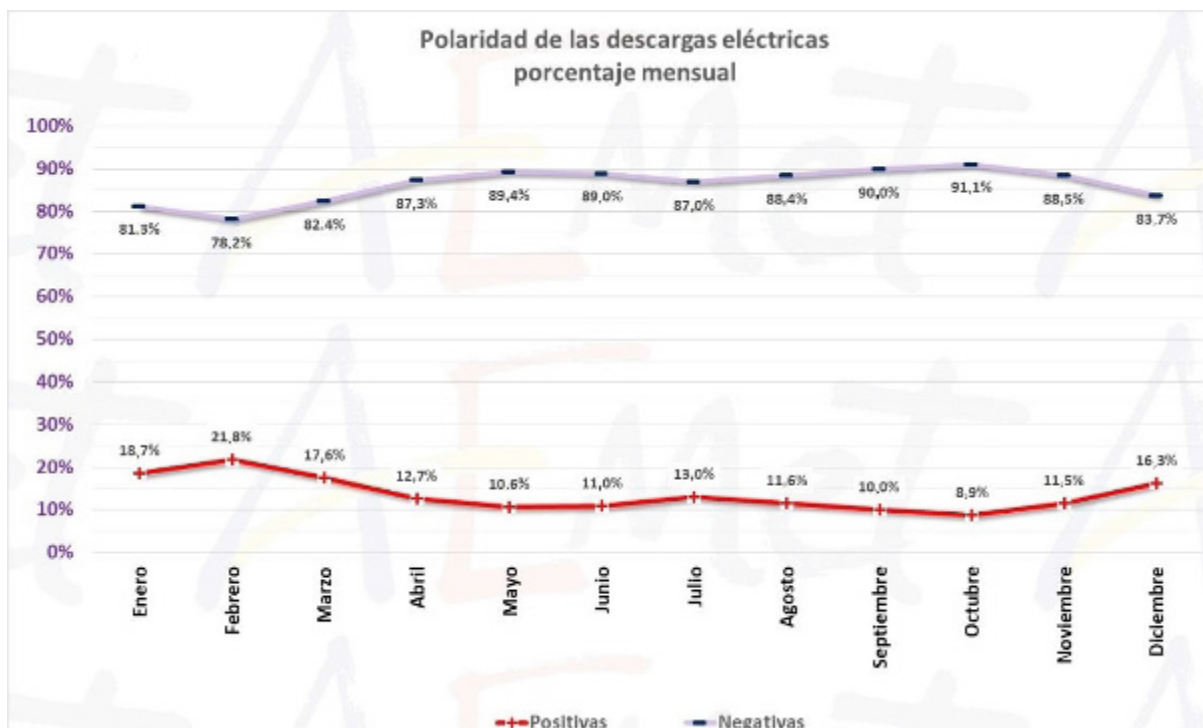


Figura 3.7. Porcentaje mensual de descargas eléctricas en la Península y Baleares según su polaridad.

3.2.4. Intensidad

En cuanto a la intensidad de las descargas registradas en la ventana geográfica de la Península e islas Baleares, en general, las más intensas (positivas o negativas) se suelen registrar en el mar (sobre todo en el Cantábrico), y sobre tierra las más intensas se suelen registrar en zonas próximas a los Pirineos, a las costas del Cantábrico y en el litoral atlántico de Galicia. Destacan, en cualquier caso, en este apartado, las zonas marítimas y litorales, como se observa en la figura 3.8.



Figura 3.8. Distribución de las descargas más intensas en la Península y Baleares según su polaridad.

En promedio, las descargas de polaridad positiva son más intensas que las de polaridad negativa, +47,5 kA frente a -26,0 kA. En el período analizado, la descarga más intensa de polaridad negativa se registró el día 27 de febrero de 2016 en el mar, frente a la costa de Argelia, con una intensidad de -965,61 kA. También destaca, pero ya sobre tierra, la descarga negativa que se registró el 16 de enero de 2015 al norte de la provincia de Lugo, en la comarca de La Mariña, con una intensidad de -901,0 kA. La descarga más intensa de polaridad positiva se registró el día 6 de octubre de 2016 en Lleida, en la comarca del Pallars Jussà, con una intensidad de +1216,9 kA.

En distribución mensual (figura 3.9), las descargas más intensas se registran en los meses de invierno, que son los que presentan menor actividad convectiva. Las descargas de polaridad positiva son, en promedio, 3 veces más intensas en febrero que en agosto, y las de polaridad negativa son casi el doble de intensas en enero que en agosto.

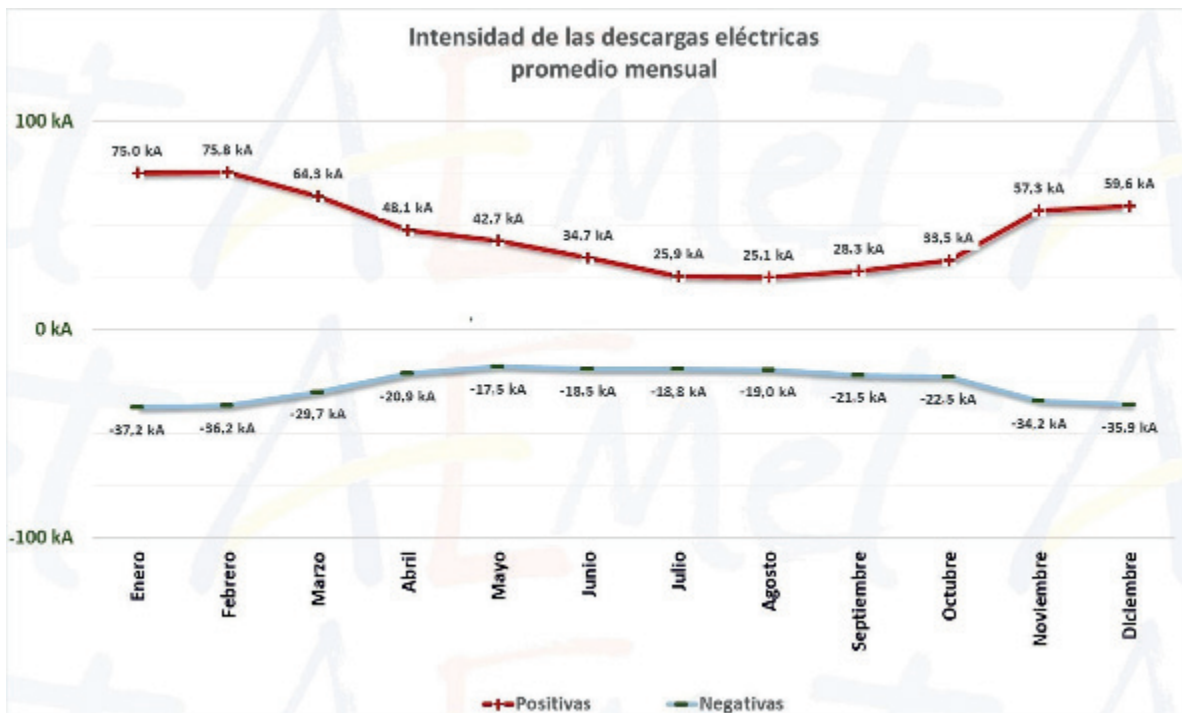


Figura 3.9. Distribución del promedio mensual de la intensidad de descargas eléctricas en la Península y Baleares (kA).

3.2.5. Multiplicidad

Durante el período analizado, más de dos terceras partes de los rayos presentan más de una descarga, y el 32,5 % solo una descarga, como se puede observar en la figura 3.10.

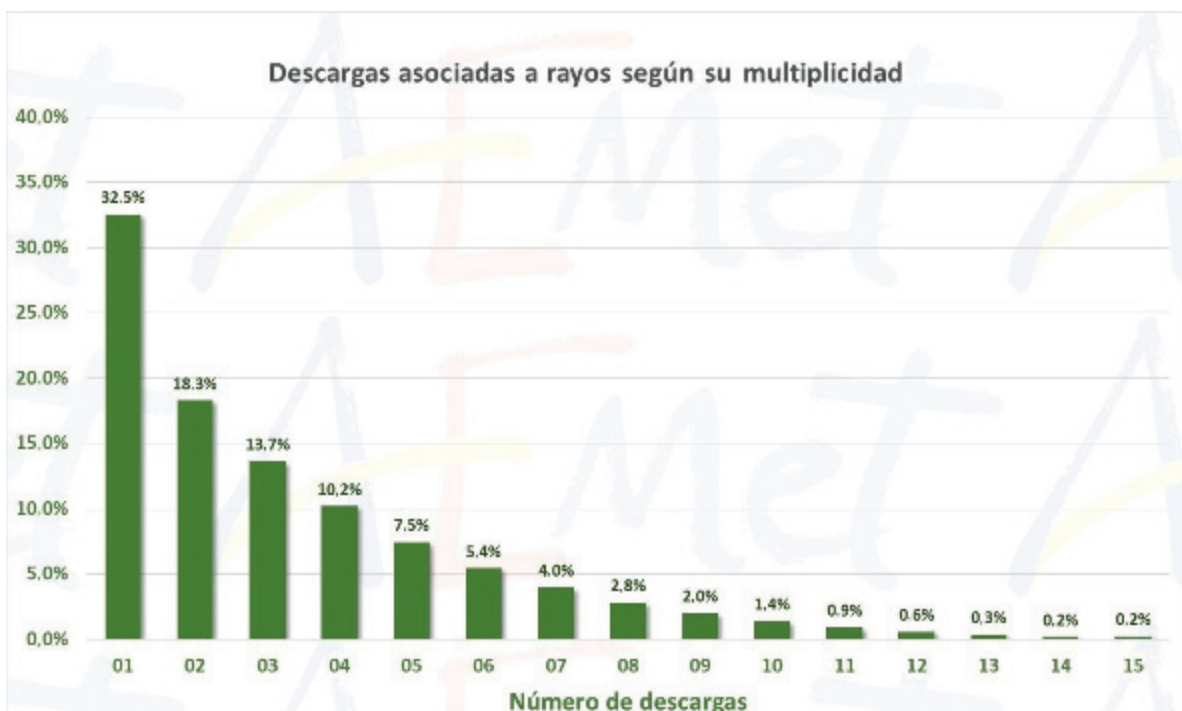


Figura 3.10. Distribución estadística de la multiplicidad del rayo en función del número de descargas en la Península y Baleares.

3.3. Estadística descriptiva de descargas eléctricas en las islas Canarias

En Canarias se registran muchos menos rayos que en la mayoría de zonas peninsulares. En el período de 10 años estudiado (2007-2016) se dispone de un total de 176 704 registros. La superficie considerada para el caso de Canarias es casi ocho veces y media inferior a la de la ventana geográfica de estudio de la Península y Baleares, pero en valor absoluto, el número total de descargas es 72 veces inferior en Canarias que en la Península y Baleares.

3.3.1. Distribución anual y mensual

En los mapas de distribución de descargas del capítulo 4, se observa la escasez de descargas eléctricas en Canarias, comparada con la Península. También al analizar la distribución de descargas registradas en tierra, las dos provincias canarias son las de menor densidad media de todas las provincias españolas y de las ciudades autónomas. En cuanto a la distribución temporal, este limitado número de tormentas se distribuye irregularmente, de forma que existe fuerte contraste interanual, como se observa en la figura 3.11.

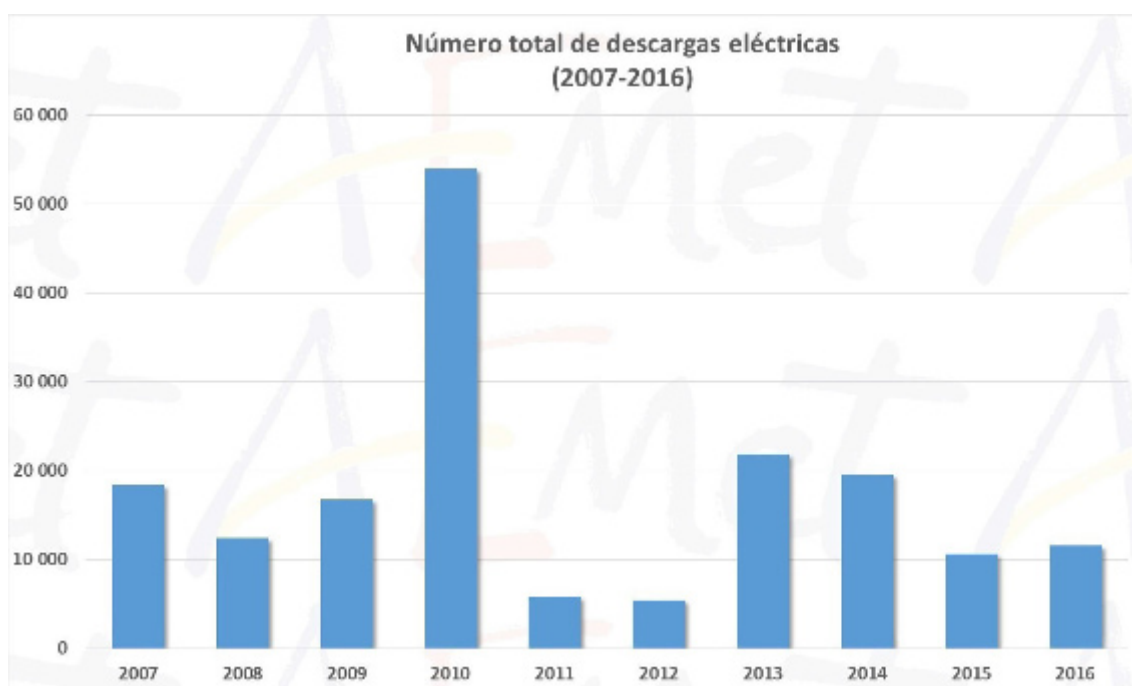


Figura 3.11. Número total anual de descargas eléctricas en las islas Canarias.

Pero además hay que tener en cuenta que el 20 % de todas las descargas de las registradas en 10 años en la base de datos de Canarias utilizada para esta climatología, se registraron en solo dos días, concretamente en el episodio tormentoso del 29 y 30 de noviembre de 2010, lo cual influye en toda la estadística de descargas de Canarias. Solo entre ambas fechas se registraron 35 463 descargas en Canarias. Este anómalo y singular episodio convierte al año 2010 y al mes de noviembre de ese año en los de mayor número de descargas anual y mensual, respectivamente, en Canarias.

Los meses de mayor número de descargas en Canarias son los de final del otoño y los de invierno, al contrario que en la Península y Baleares, mientras que, entre abril y julio, el porcentaje de descargas en Canarias es inferior al 1 % del total anual, como se observa en la figura 3.12.

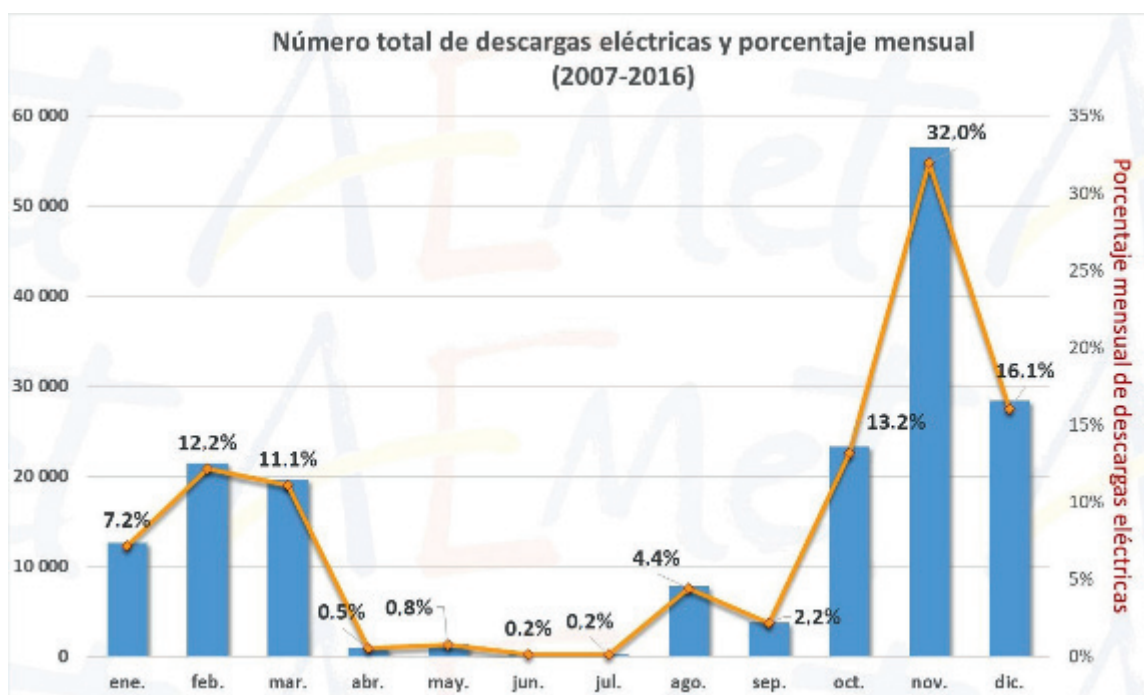


Figura 3.12. Número total mensual y porcentaje mensual de descargas eléctricas en las islas Canarias.

3.3.2. Distribución horaria

En Canarias la distribución horaria de las descargas es más homogénea que en la Península, donde había un claro patrón vespertino de máximo de descargas. En Canarias, aunque la amplitud no está tan marcada como en la estadística de la Península y Baleares, el máximo se observa por la mañana y el mínimo diario a última hora de la tarde, aunque con una distribución en general bastante uniforme (figura 3.13).

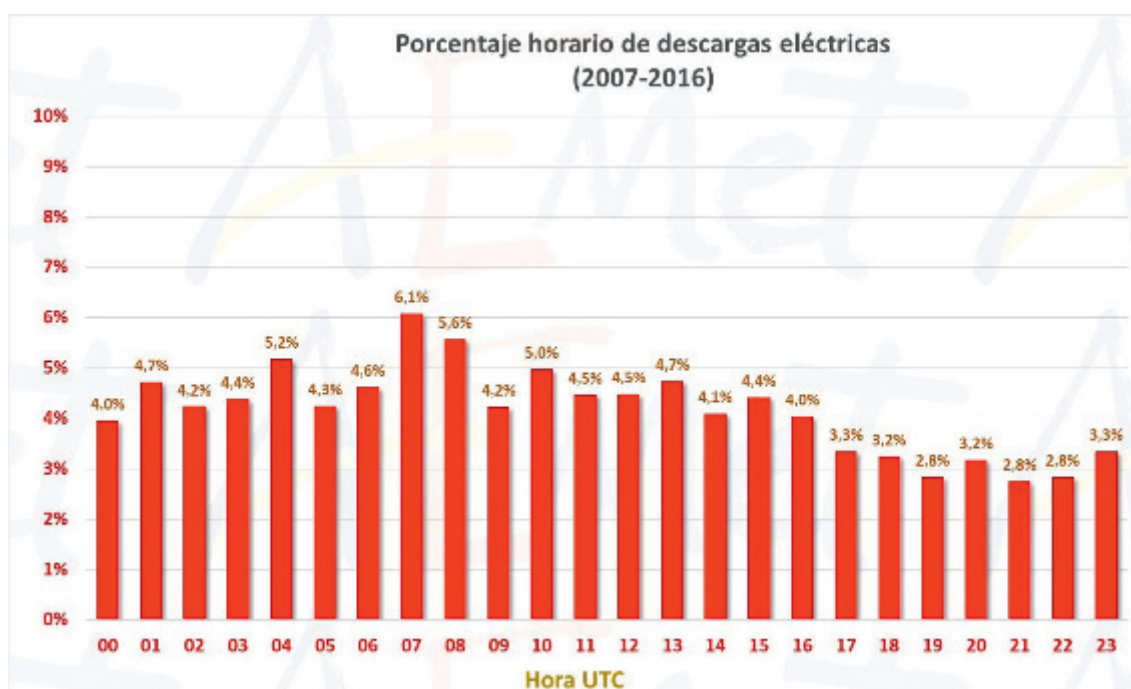


Figura 3.13. Porcentaje horario de descargas eléctricas en las islas Canarias (hora UTC).

Si se analizan los datos horarios por meses (tabla 3.2) y por estaciones (figura 3.14), no se obtiene un patrón tan claro como en la Península y Baleares. Aunque hay un máximo muy destacado en verano a última hora del día entre las 20:00 y las 23:59 (de 21:00 a 00:59 hora oficial insular de verano), hay que tener en cuenta que junio y julio, que son meses veraniegos, apenas registran tormentas en Canarias, y solo agosto es un mes con un número de descargas suficiente para afirmar que existe un patrón de máximo de descargas en las islas Canarias a última hora del día.

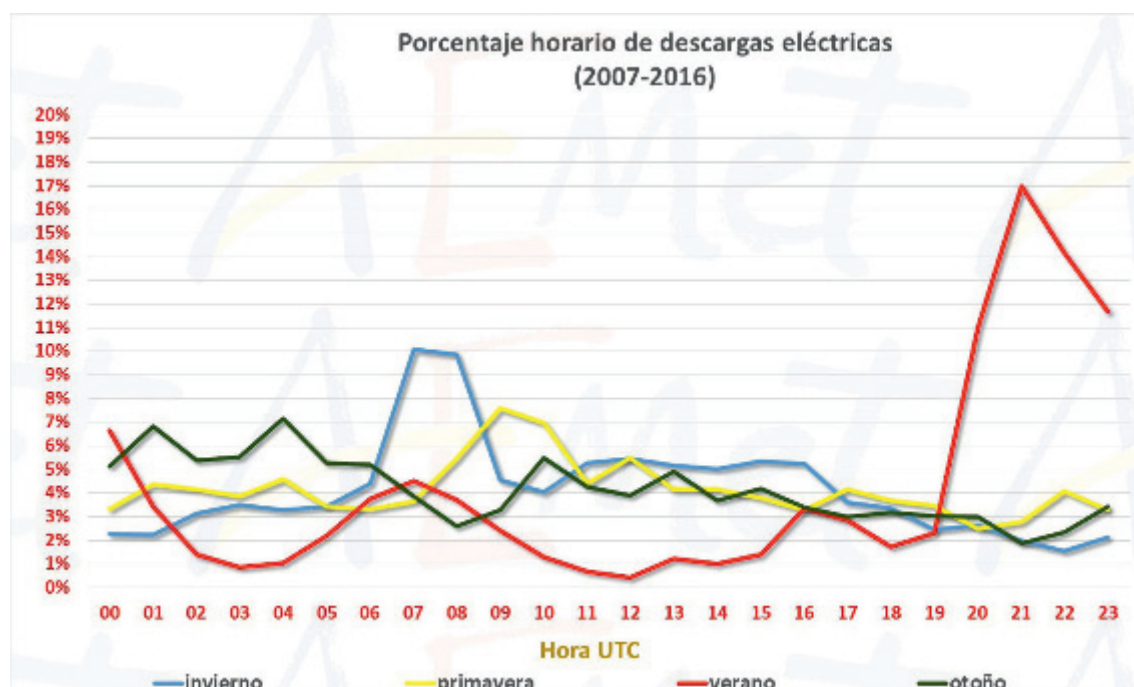


Figura 3.14. Porcentaje horario estacional de descargas eléctricas en las islas Canarias.

En invierno y primavera el máximo de descargas en Canarias se registra a última hora de la madrugada y por la mañana, algo más desplazado hacia el mediodía en el caso de la primavera.

Mes	Hora de mayor frecuencia de descargas (UTC)
Enero	07 UTC
Febrero	16 UTC
Marzo	09 UTC
Abril	02 UTC
Mayo	04 UTC
Junio	21 UTC
Julio	02 UTC
Agosto	21 UTC
Septiembre	13 UTC
Octubre	04 UTC
Noviembre	01 UTC
Diciembre	08 UTC

Tabla 3.2. Hora de mayor frecuencia de descargas en el cómputo mensual.

3.3.3. Polaridad

En cuanto a la polaridad, en el promedio anual, en Canarias son más abundantes que en la Península las descargas de polaridad positiva, 21 % en Canarias, frente al 11 % en la Península y Baleares, con menos del 80 % del total anual de polaridad negativa (figura 3.15).

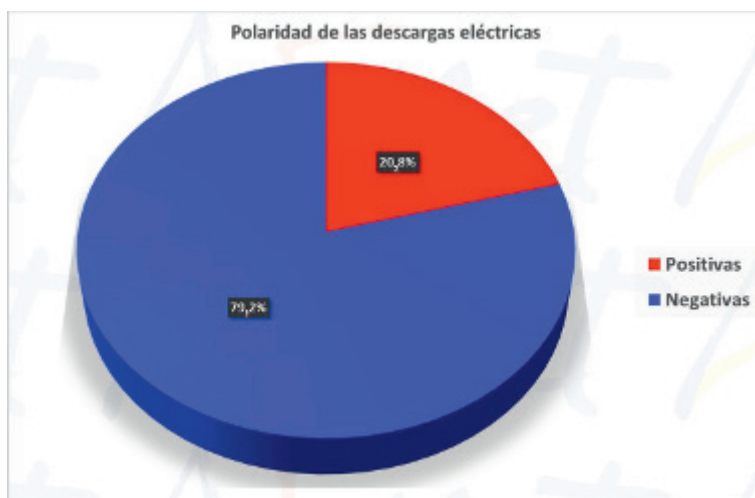


Figura 3.15. Porcentaje de descargas eléctricas en las islas Canarias según su polaridad.

En las islas Canarias no hay un patrón tan marcado de mayor porcentaje de descargas de polaridad positiva en invierno y, aunque el máximo absoluto se observa en julio (figura 3.16), hay un máximo relativo en enero, y en febrero descienden mucho las descargas de polaridad positiva.

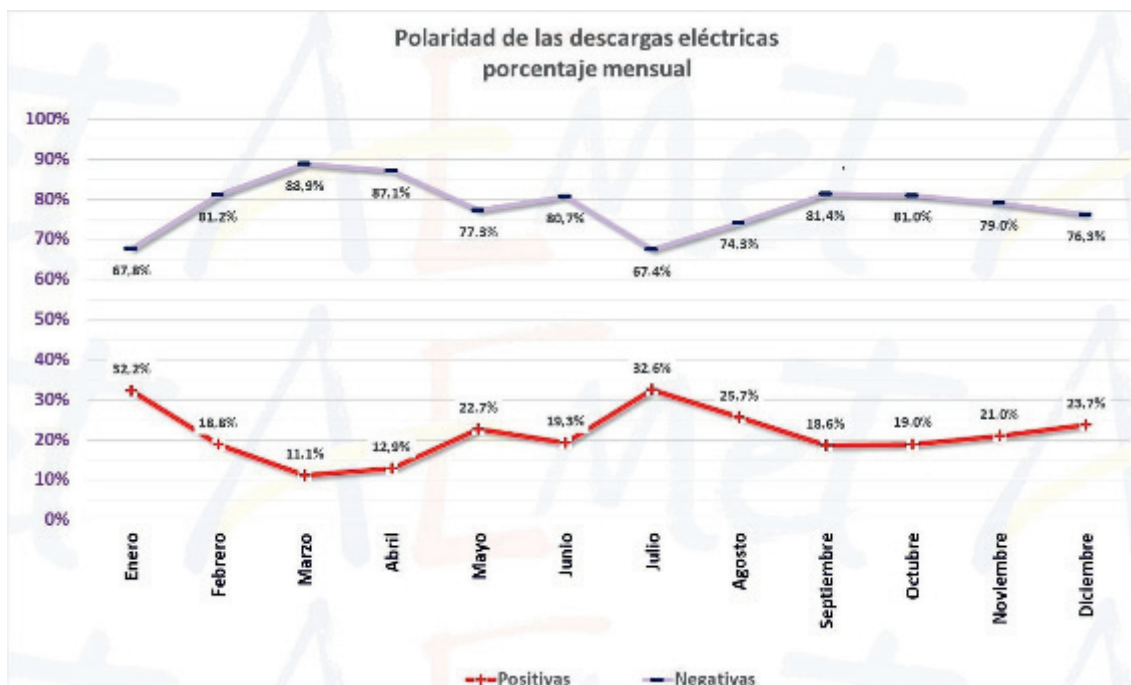


Figura 3.16. Porcentaje mensual de descargas eléctricas en las islas Canarias según su polaridad.

3.3.4. Intensidad

En cuanto a la intensidad de las descargas registradas en la ventana geográfica de las islas Canarias, en general, las más intensas (positivas o negativas) se suelen registrar en el mar, y sobre todo en el norte de las islas, como se observa en la figura 3.17.

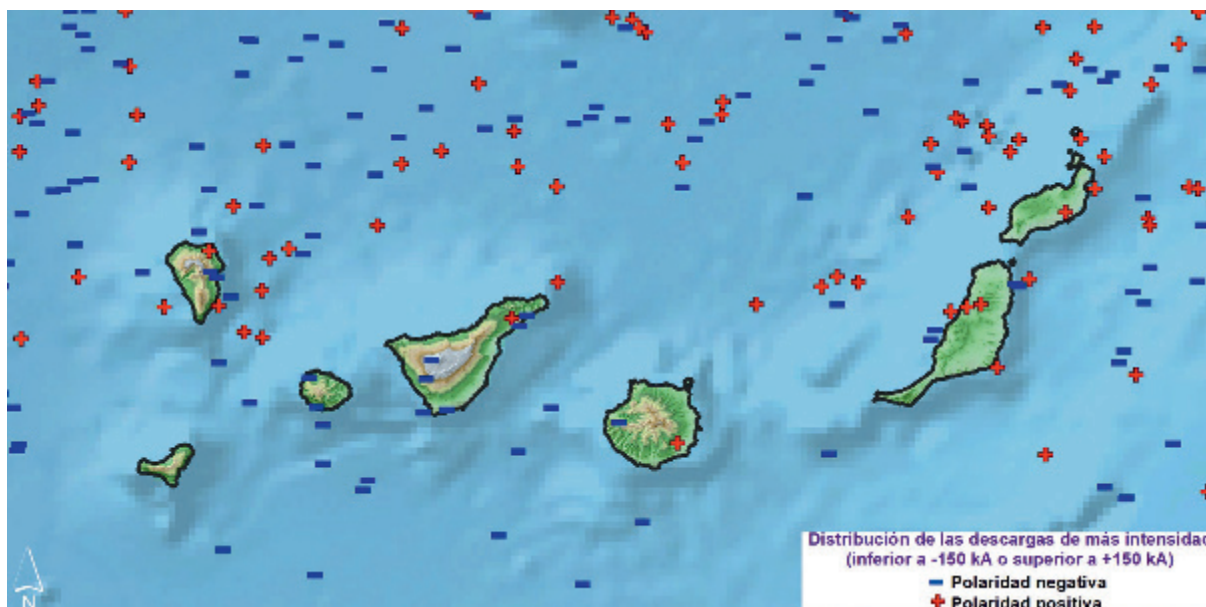


Figura 3.17. Distribución de las descargas más intensas en las islas Canarias según su polaridad.

En promedio, las descargas de polaridad negativa son más intensas que las de polaridad positiva, $-22,2$ kA frente a $+15,0$ kA, lo que también resulta contrario al patrón peninsular. En el período analizado, las descargas más intensas, tanto de polaridad positiva, registrada el 13 de agosto de 2015, como

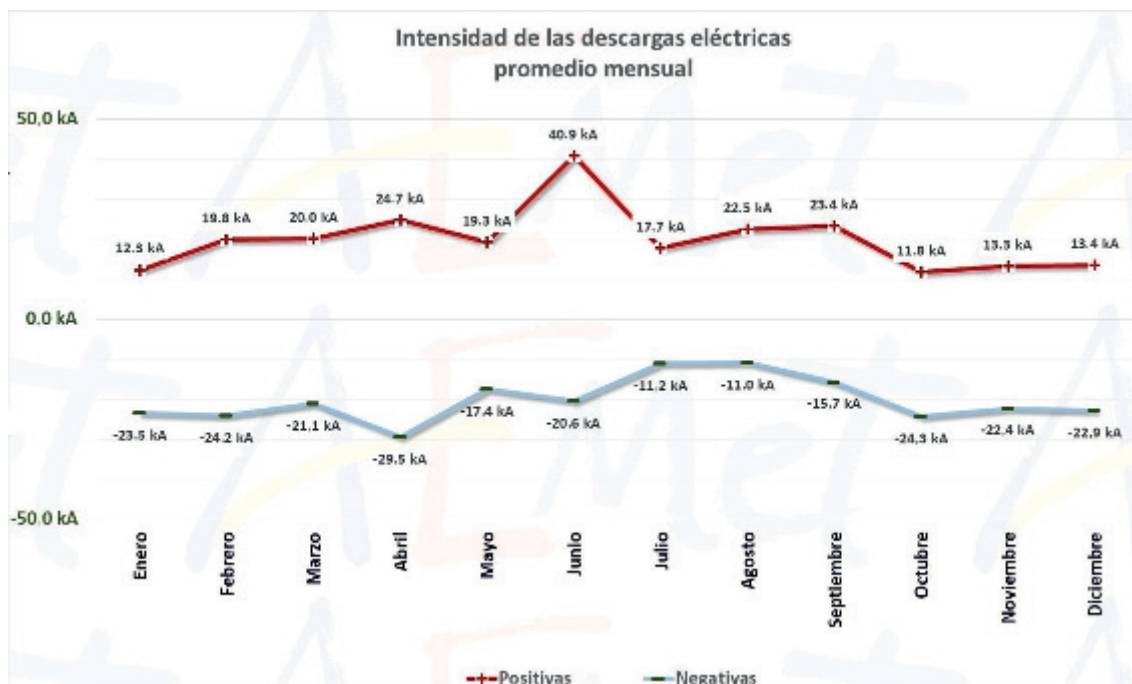


Figura 3.18. Distribución del promedio mensual de la intensidad de descargas eléctricas en las islas Canarias (kA).

de polaridad negativa, el 2 de diciembre de 2015, se localizaron en el mar, al este de Lanzarote y Fuerteventura. Sobre tierra, la descarga negativa de mayor intensidad se registró el 11 de diciembre de 2013, muy cerca del aeropuerto de Tenerife Sur, con una intensidad de $-236,8$ kA. La descarga más intensa de polaridad positiva se registró el día 13 de agosto de 2015 en el oeste de la isla de Fuerteventura, con una intensidad de $+240,3$ kA. Estos valores máximos son bastante inferiores a los obtenidos para la Península y Baleares.

En cuanto a la distribución mensual, también el patrón en las islas Canarias es contrario al observado en la Península e islas Baleares (figura 3.18), ya que las descargas más intensas se registran en los meses de verano, que son los que presentan menor actividad convectiva.

3.3.5. Multiplicidad

En el período analizado, el 56 % de los rayos que se han registrado en las islas Canarias presentan más de una descarga, y el 43,5 % solo una descarga, siendo la multiplicidad inferior que en la Península y Baleares (figura 3.19).

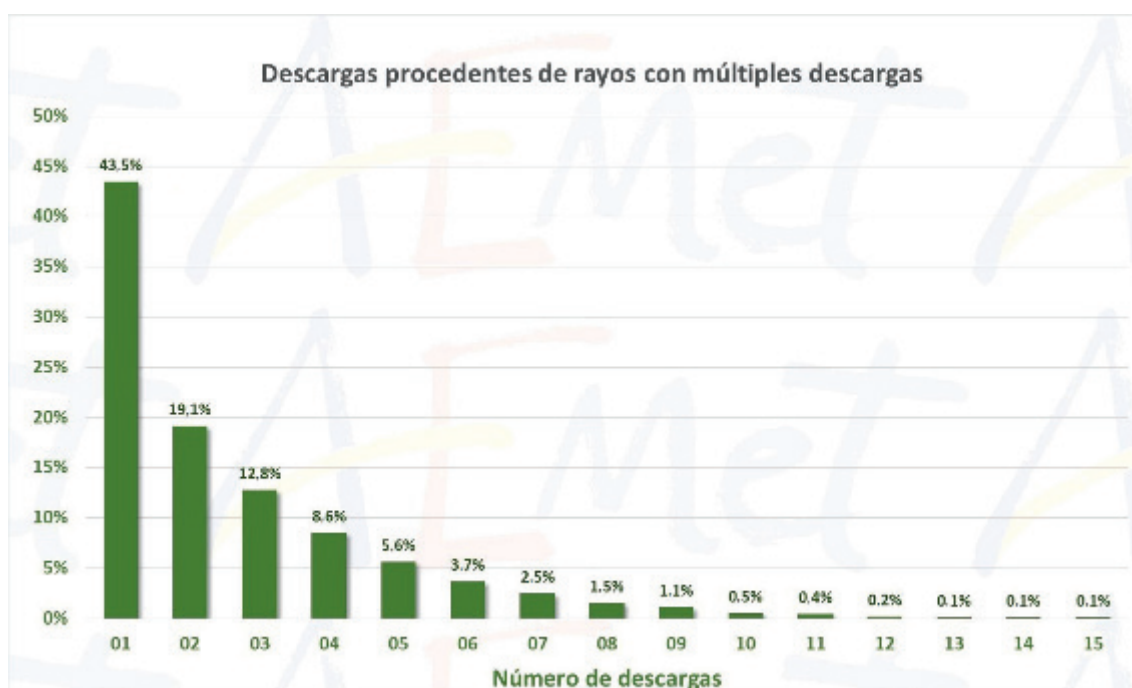


Figura 3.19. Porcentaje de rayos en las islas Canarias según el número de descargas.

4. DENSIDAD DE DESCARGAS ELÉCTRICAS



Fotografía de David Mancebo Atienza® (@objtormentas).

En este apartado se presentan distintos mapas de densidad de descargas para ambas zonas tenidas en cuenta, y para diferentes ámbitos temporales (anual, estacional y mensual), obtenidas según la metodología que se expone en el anexo III. También se incluyen las conclusiones más destacables.

4.1. Valores medios de densidad

En promedio anual, la densidad media de descargas en la zona de estudio de la zona de la Península y Baleares (ventana definida por los paralelos 44°N y 35°N y los meridianos 10°W y 5°E, zonas terrestres y marítimas), es de 0,86 descargas/km²/año. En zonas exclusivamente terrestres de la España peninsular y Baleares (sin incluir, por tanto, zonas marítimas y la parte terrestre de Francia, Portugal y el norte de África), la densidad media anual de descargas es ligeramente superior, 0,93 descargas/km²/año.

En la zona de estudio del área de Canarias (ventana definida por los paralelos 30°N y 27°N y los meridianos 19°W y 12°W, zonas terrestres y marítimas), la densidad media anual de descargas es muy inferior a la de la Península: 0,07 descargas/km²/año (unas 12 veces menor). En zonas terrestres (sin incluir, por tanto, zonas marítimas y la parte terrestre de África que recae dentro de la ventana geográfica de estudio), la densidad media anual de descargas es, como ocurría en el caso de la Península e islas Baleares, superior, 0,13 descargas/km²/año (unas 7 veces menor que en el caso de Península y Baleares).

4.2. Mapas de densidad de descargas

En primer lugar, se muestran los mapas de densidad para la Península y Baleares y para Canarias, seguidos de los mapas estacionales y mensuales de ambas regiones; todos los mapas están referidos al período 2007-2016. La escala gráfica utilizada para ambas zonas es la misma, sin embargo, la menor actividad eléctrica en las islas Canarias se traduce en valores bajos de densidad, por lo que algunos meses los mapas son uniformes, sin ningún punto singular (por ello se han ploteado las descargas individualmente en los meses de abril a septiembre inclusive).

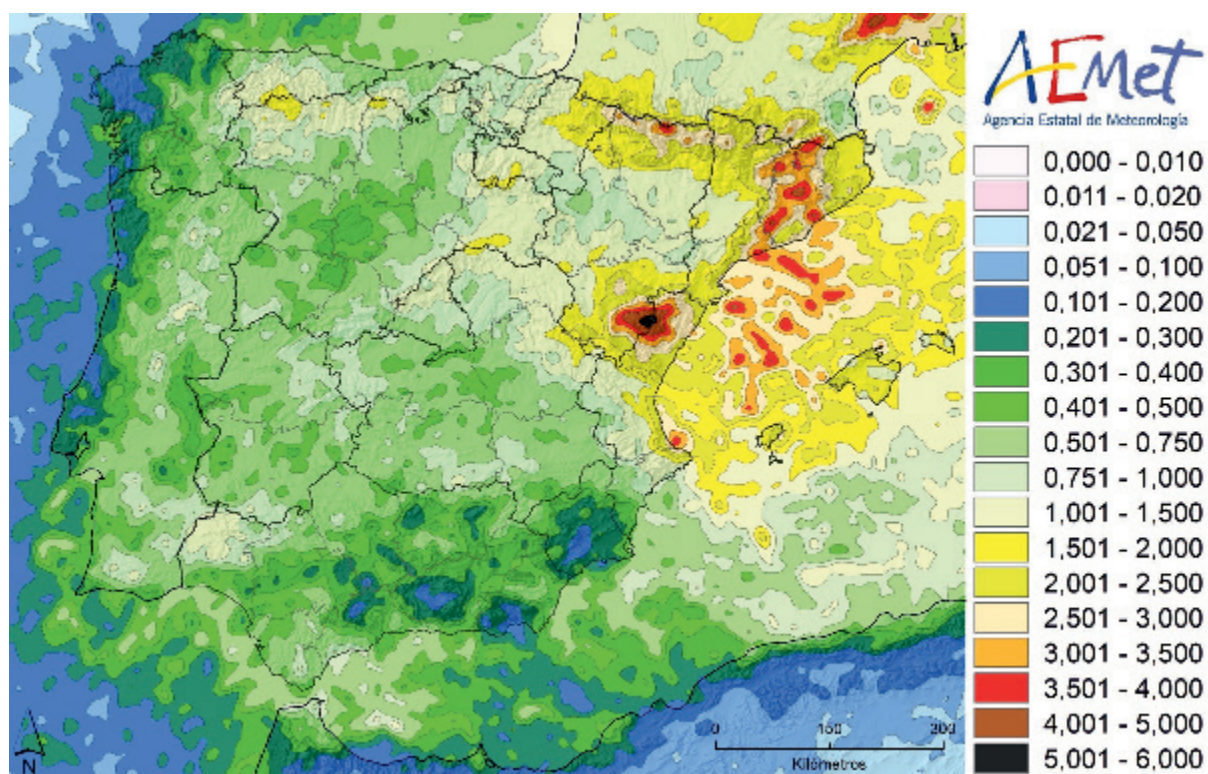


Figura 4.1. Densidad anual de descargas en la Península e islas Baleares.

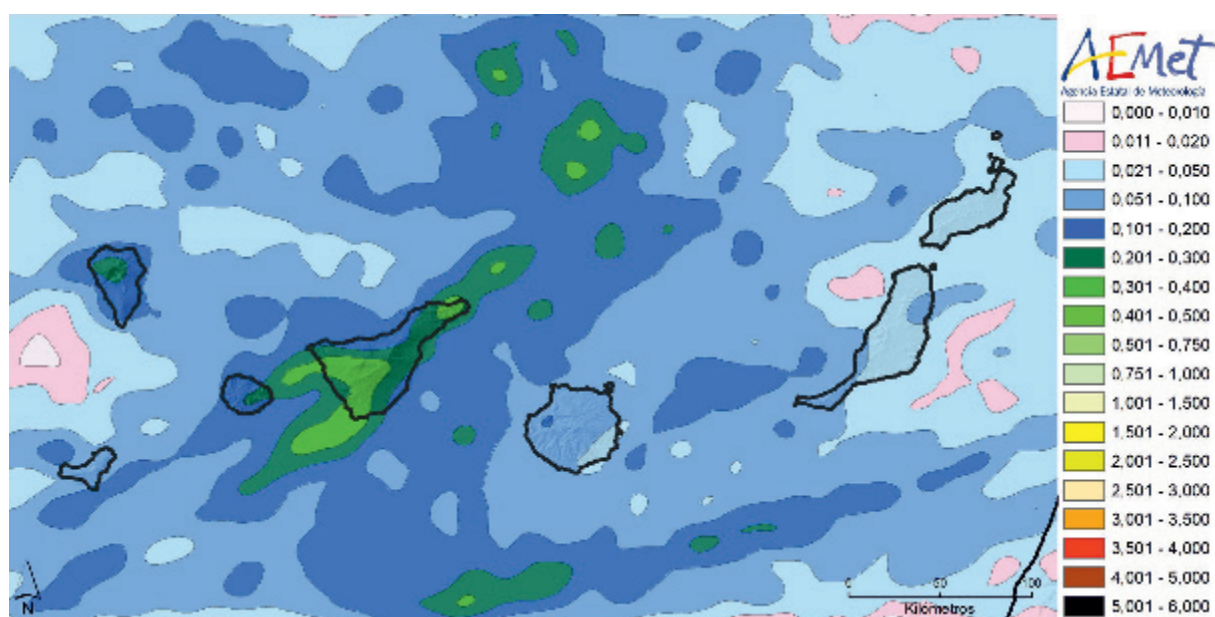


Figura 4.2. Densidad anual de descargas en las islas Canarias.

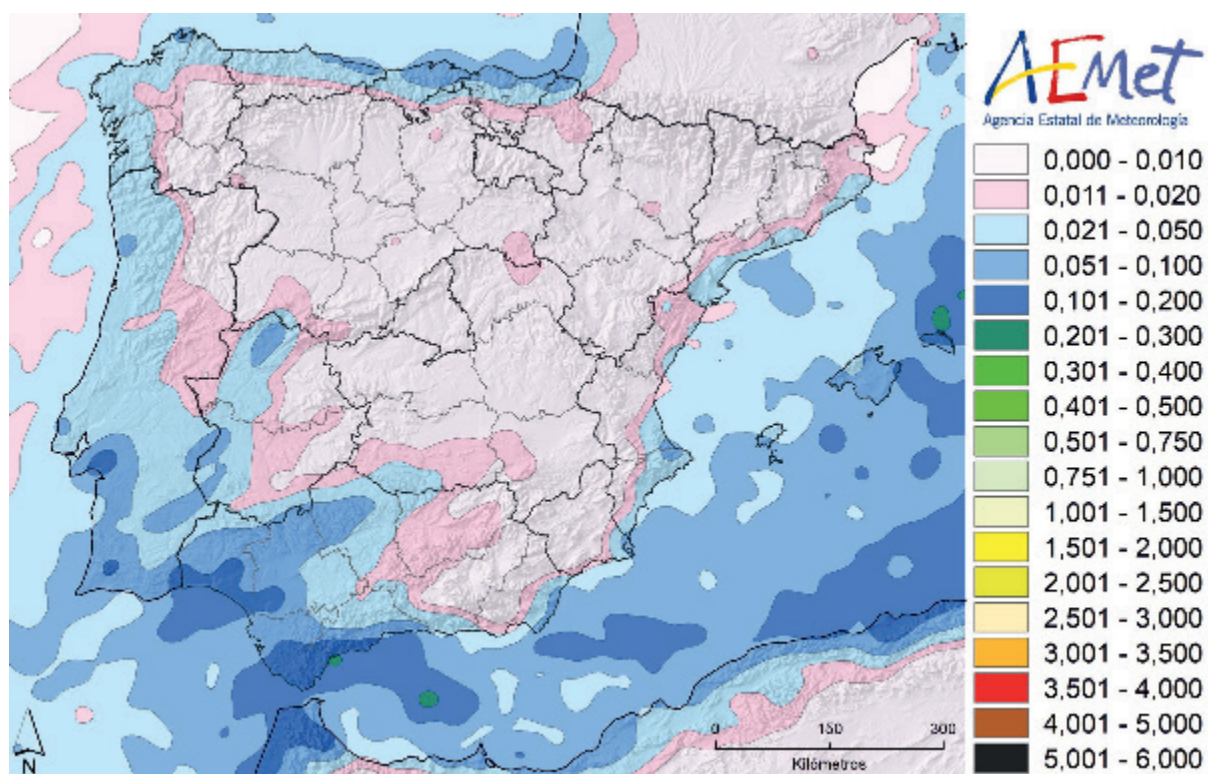


Figura 4.3. Densidad estacional de descargas en la Península e islas Baleares. Invierno.

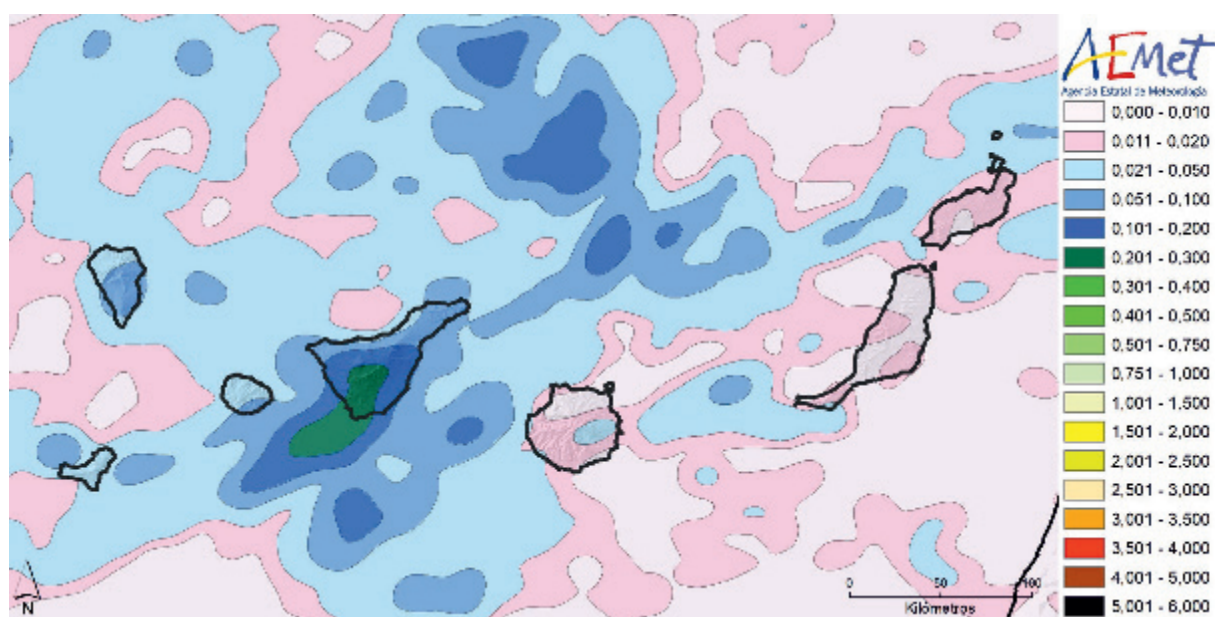


Figura 4.4. Densidad estacional de descargas en las islas Canarias. Invierno.

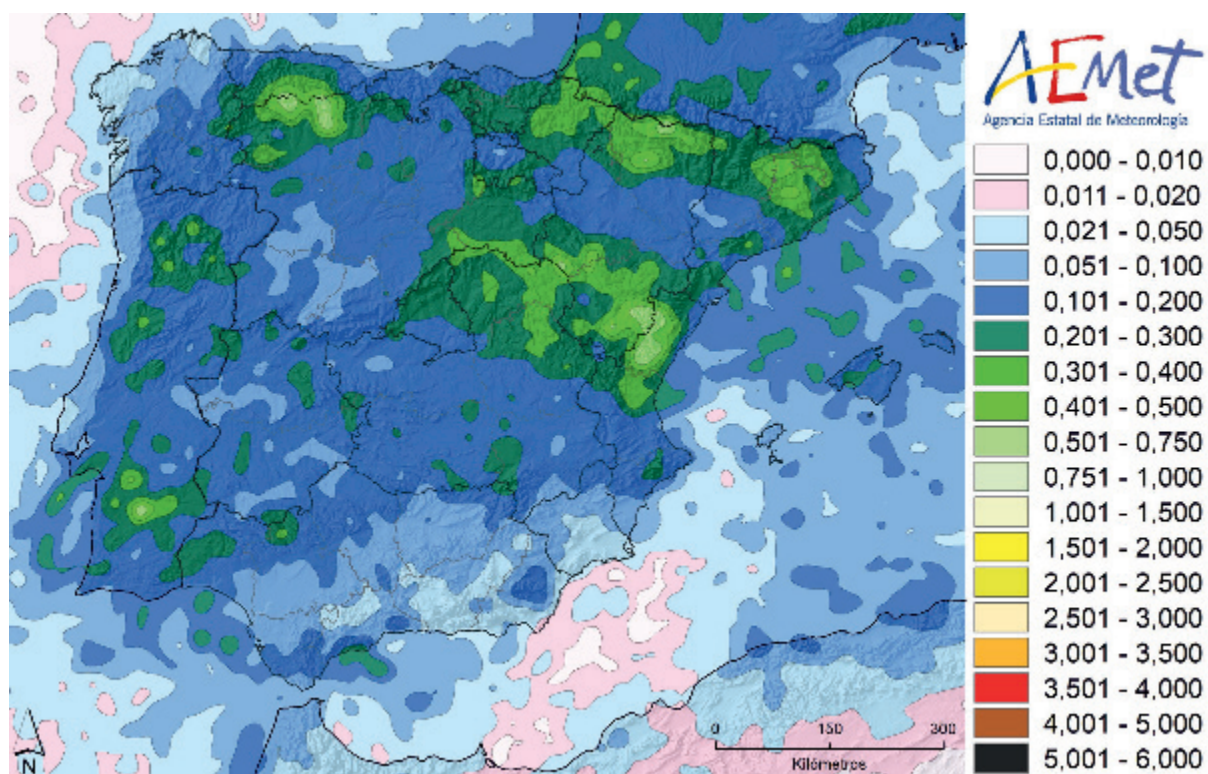


Figura 4.5. Densidad estacional de descargas en la Península e islas Baleares. Primavera.

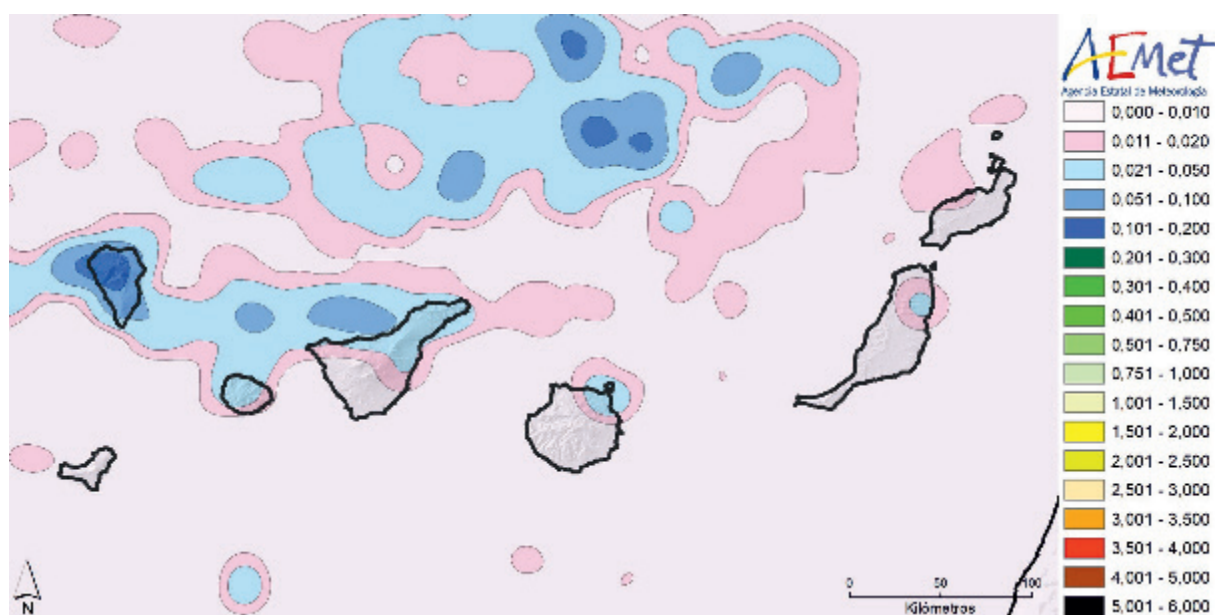


Figura 4.6. Densidad estacional de descargas en las islas Canarias. Primavera.

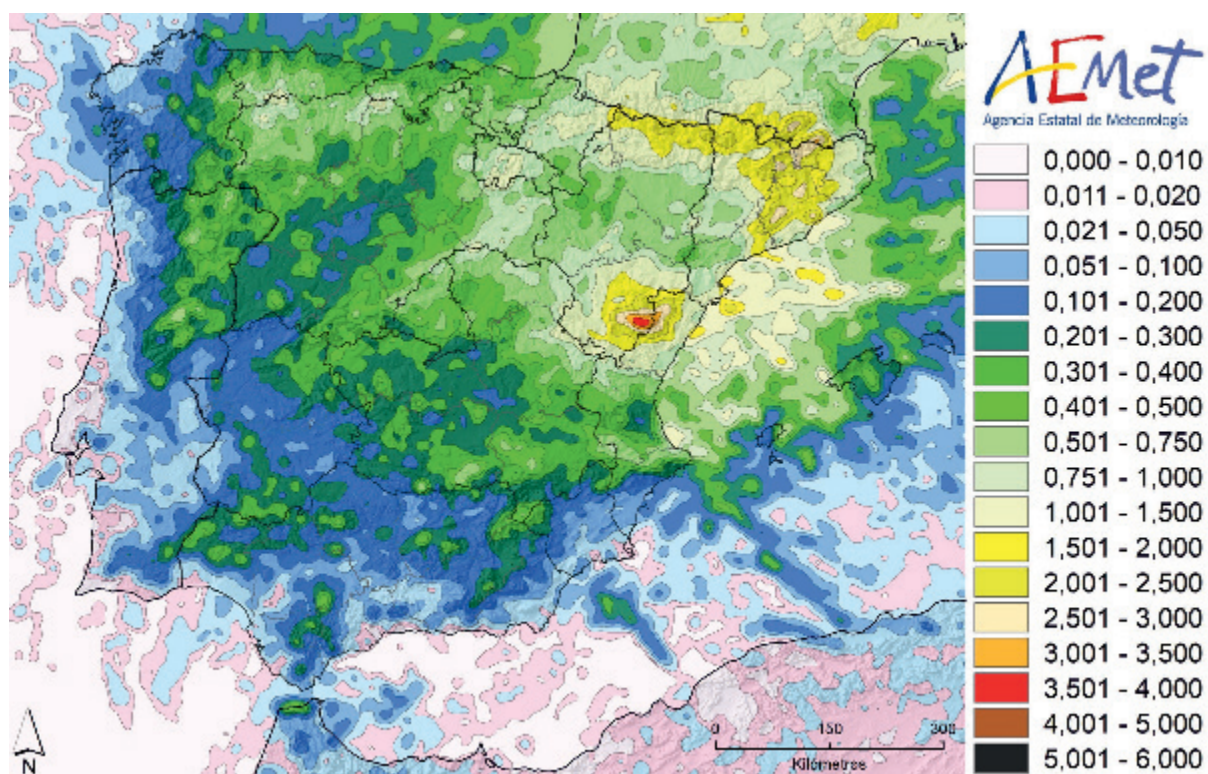


Figura 4.7. Densidad estacional de descargas en la Península e islas Baleares. Verano.

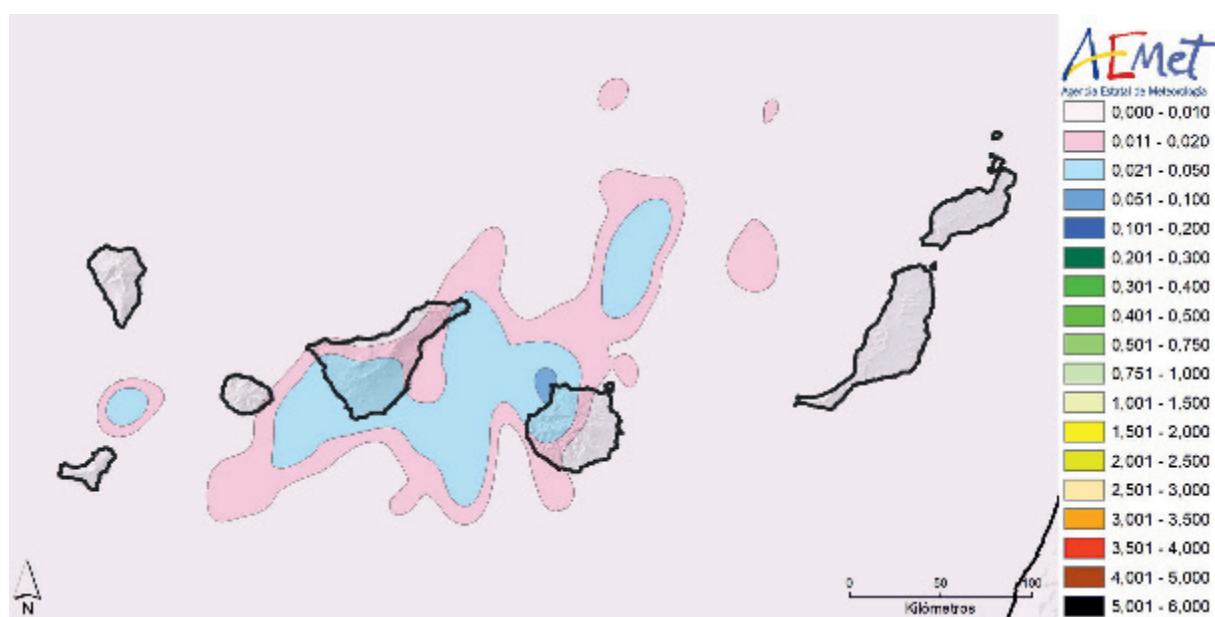


Figura 4.8. Densidad estacional de descargas en las islas Canarias. Verano.

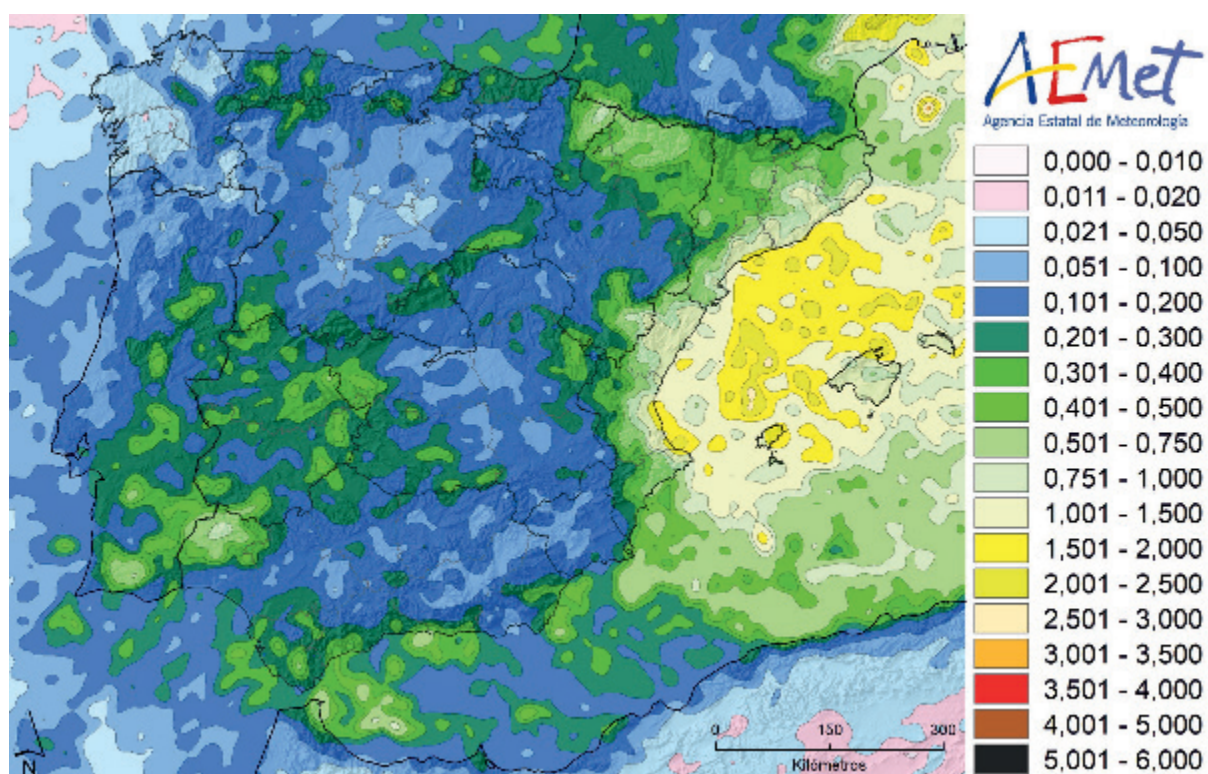


Figura 4.9. Densidad estacional de descargas en la Península e islas Baleares. Otoño.

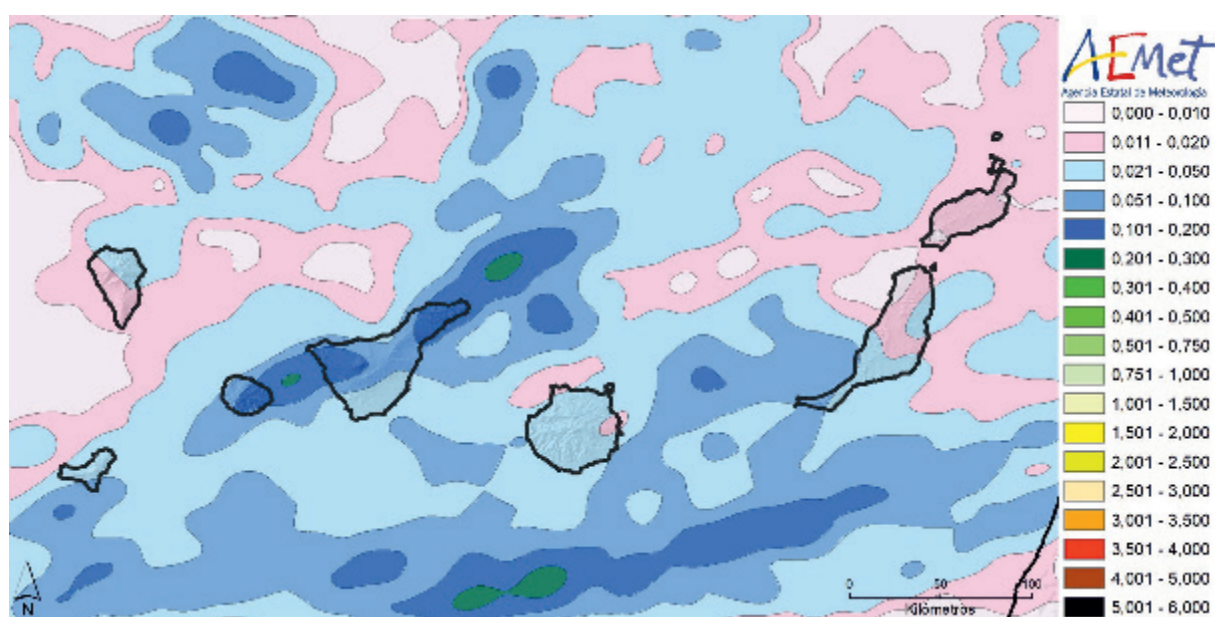


Figura 4.10. Densidad estacional de descargas en las islas Canarias. Otoño.

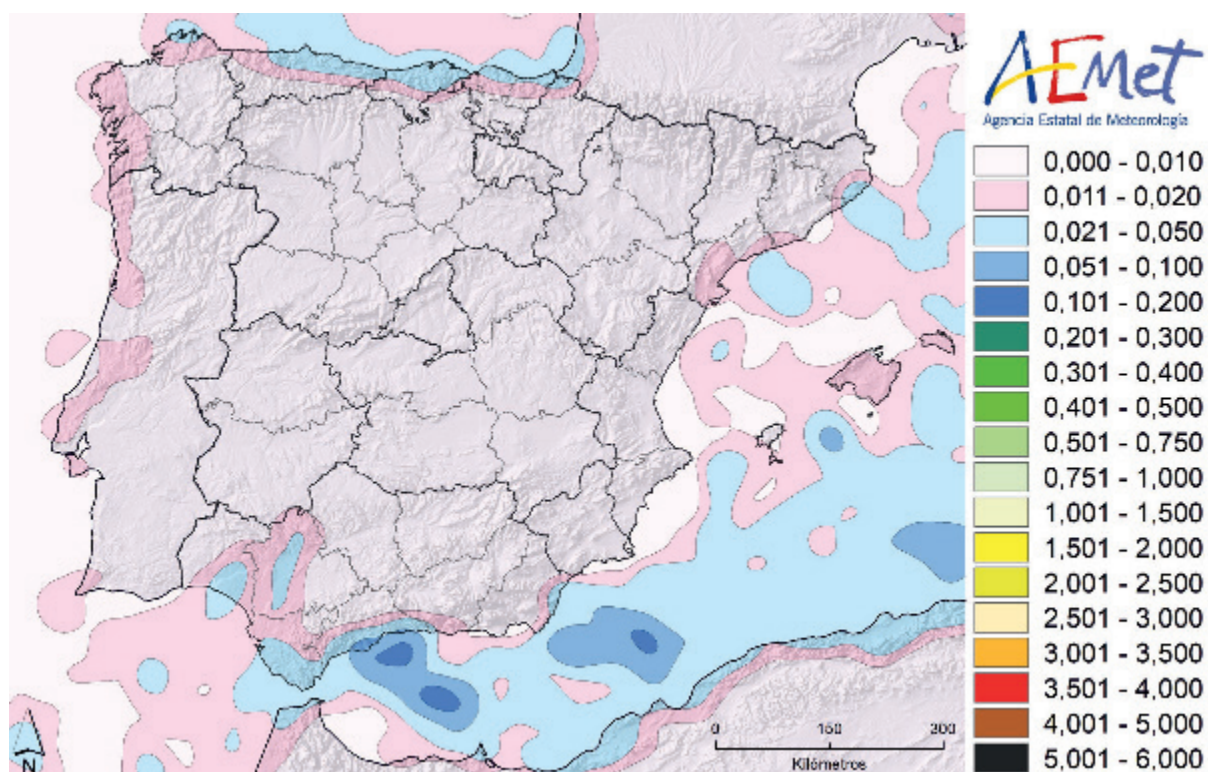


Figura 4.11. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Enero.

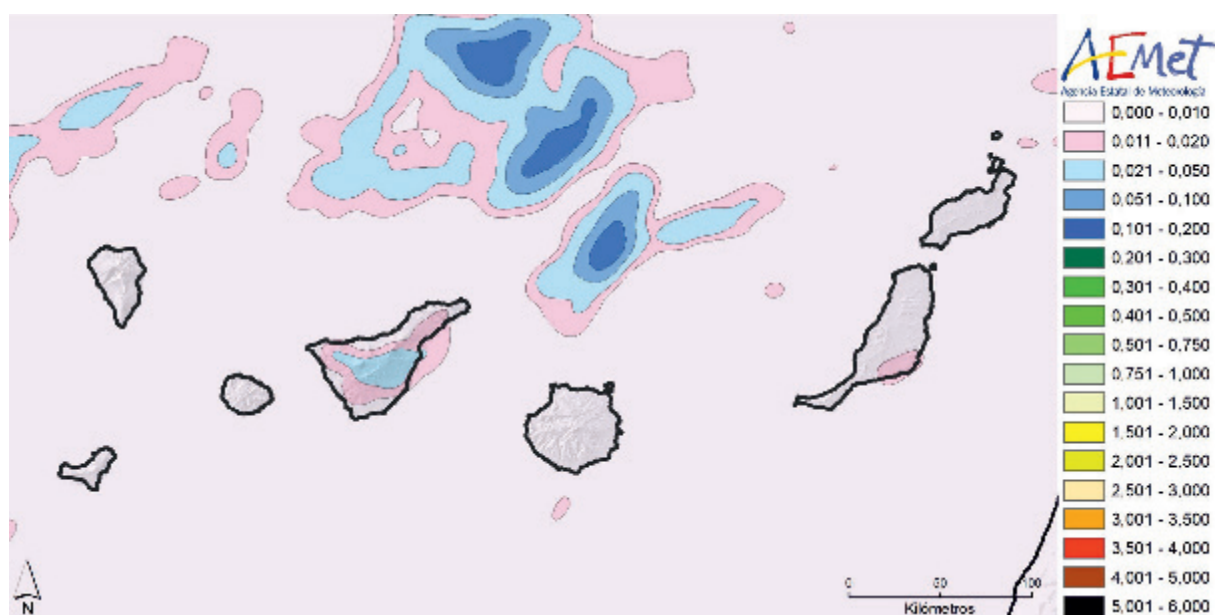


Figura 4.12. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Enero.

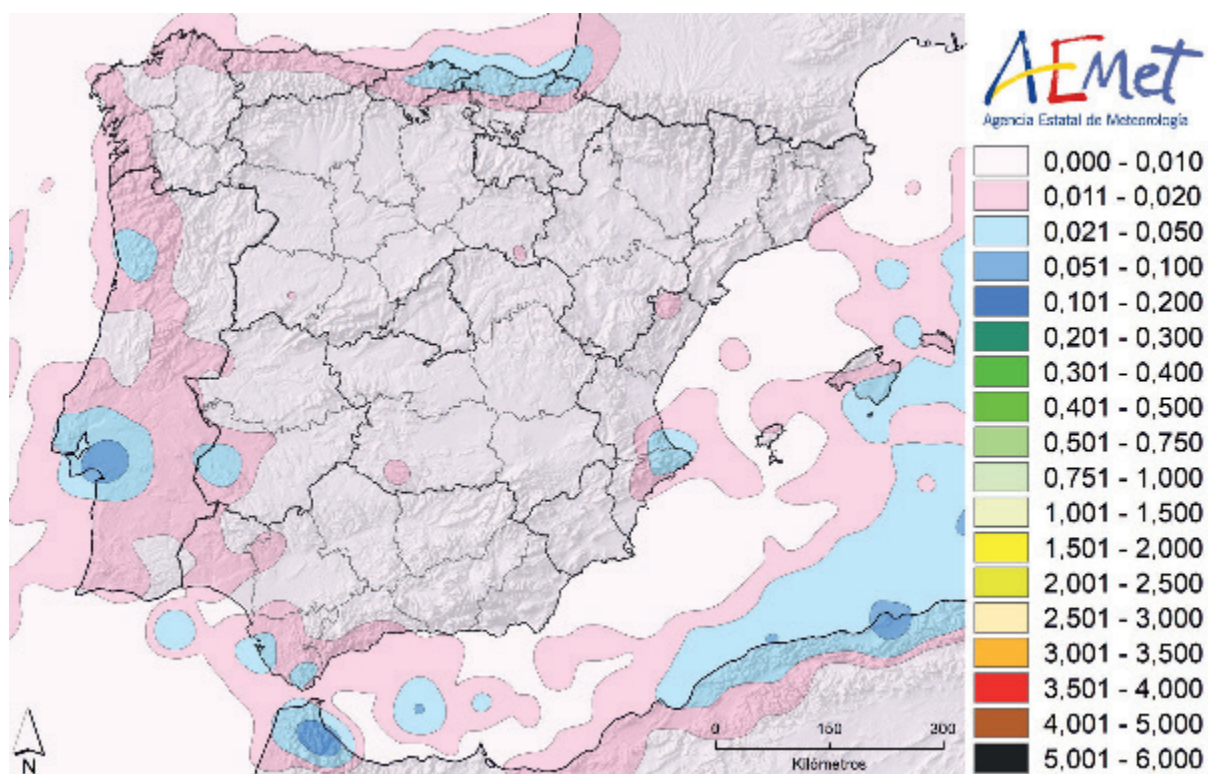


Figura 4.13. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Febrero.

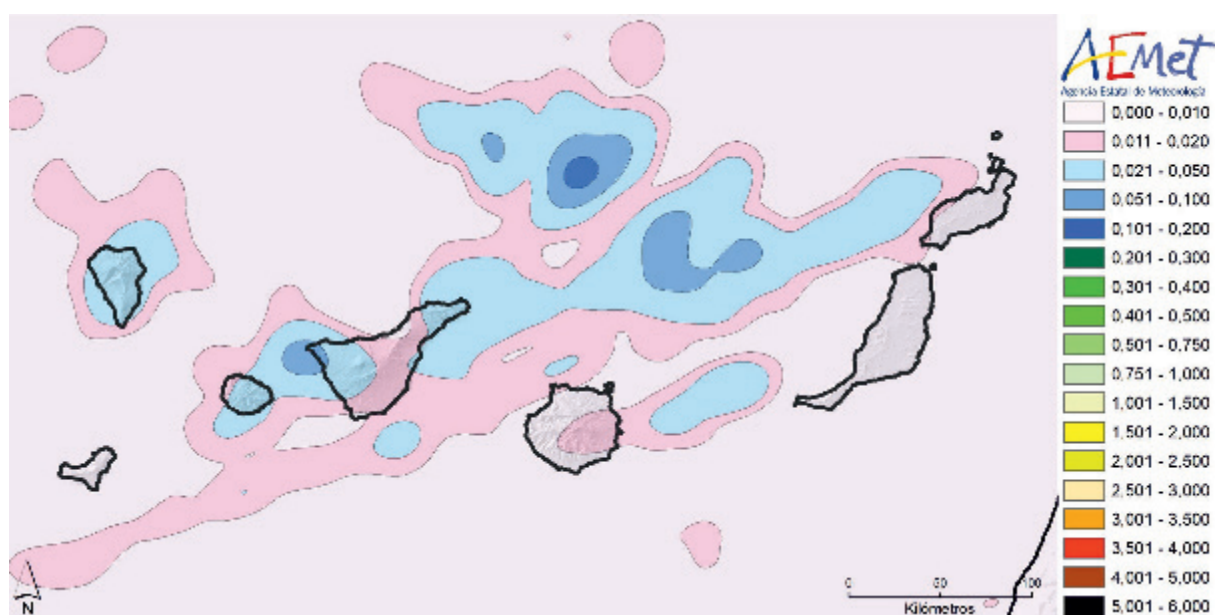


Figura 4.14. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Febrero.

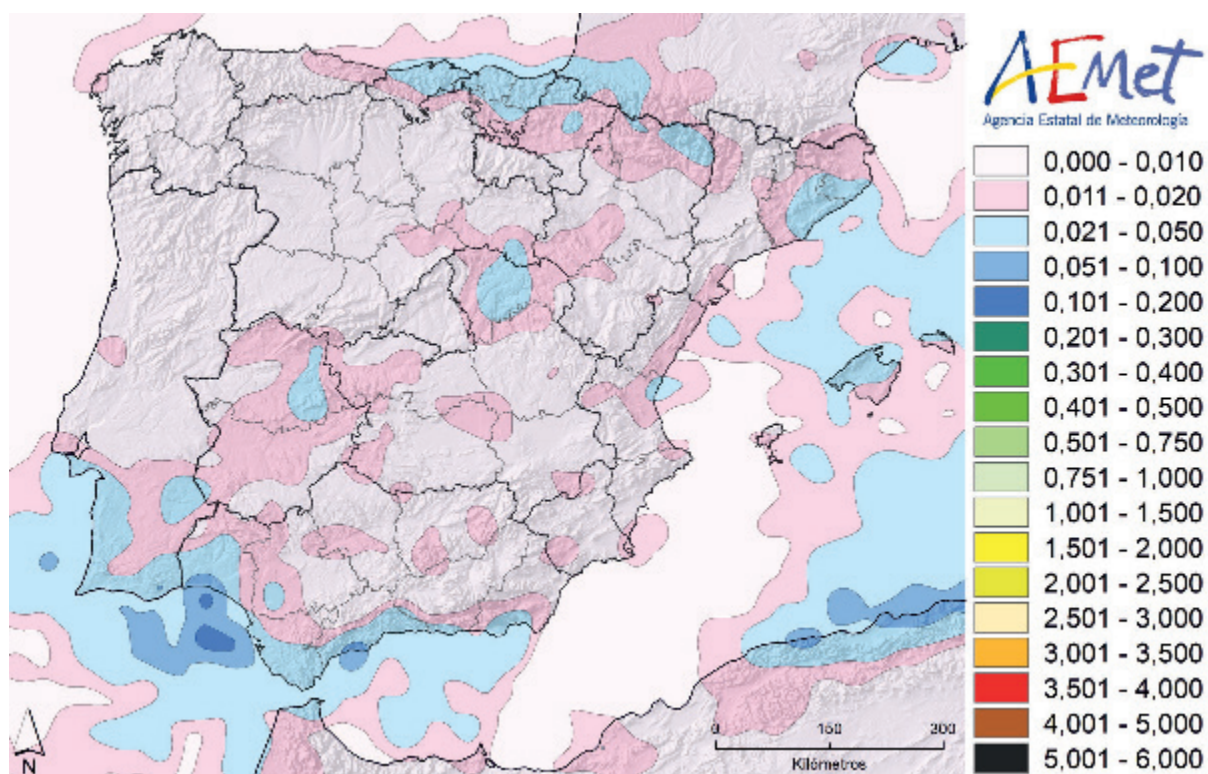


Figura 4.15. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Marzo.

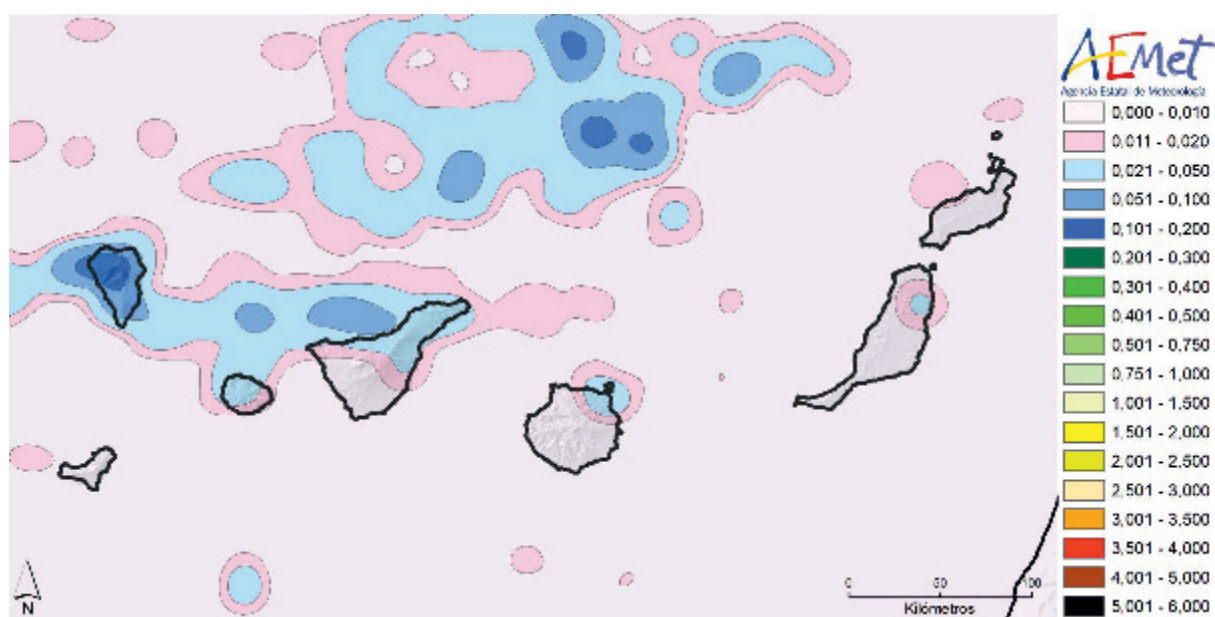


Figura 4.16. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Marzo.

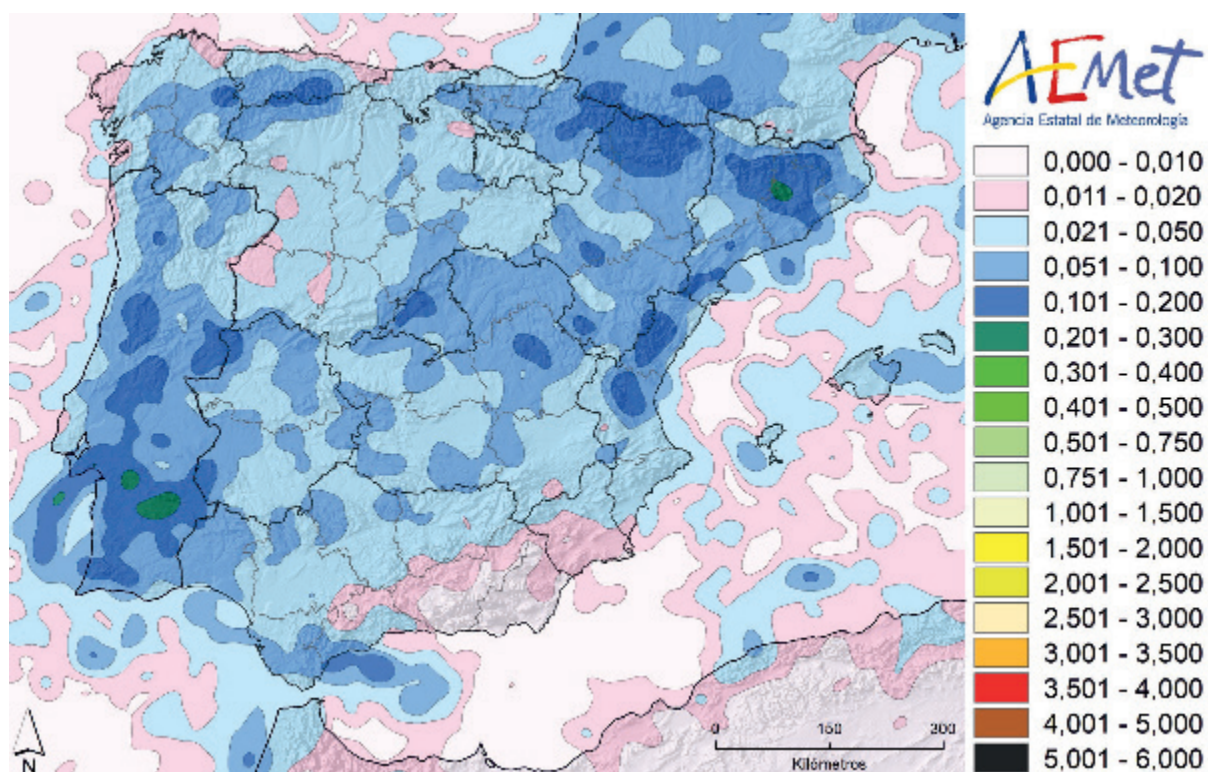


Figura 4.17. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Abril.

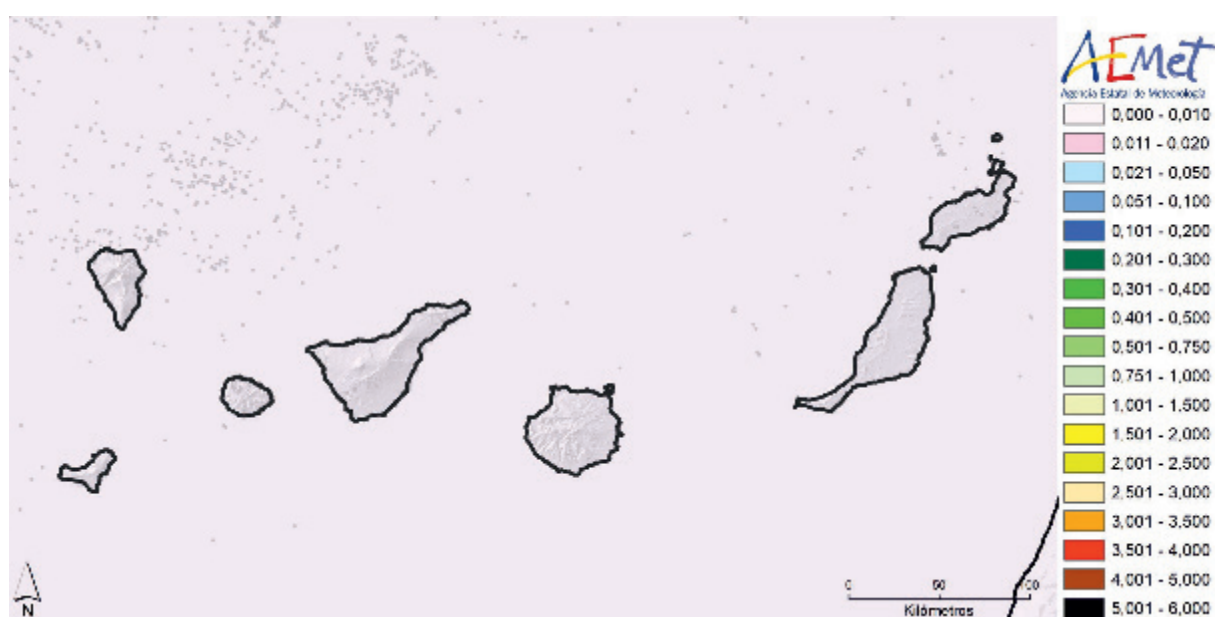


Figura 4.18. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el período 2007-2016. Abril.

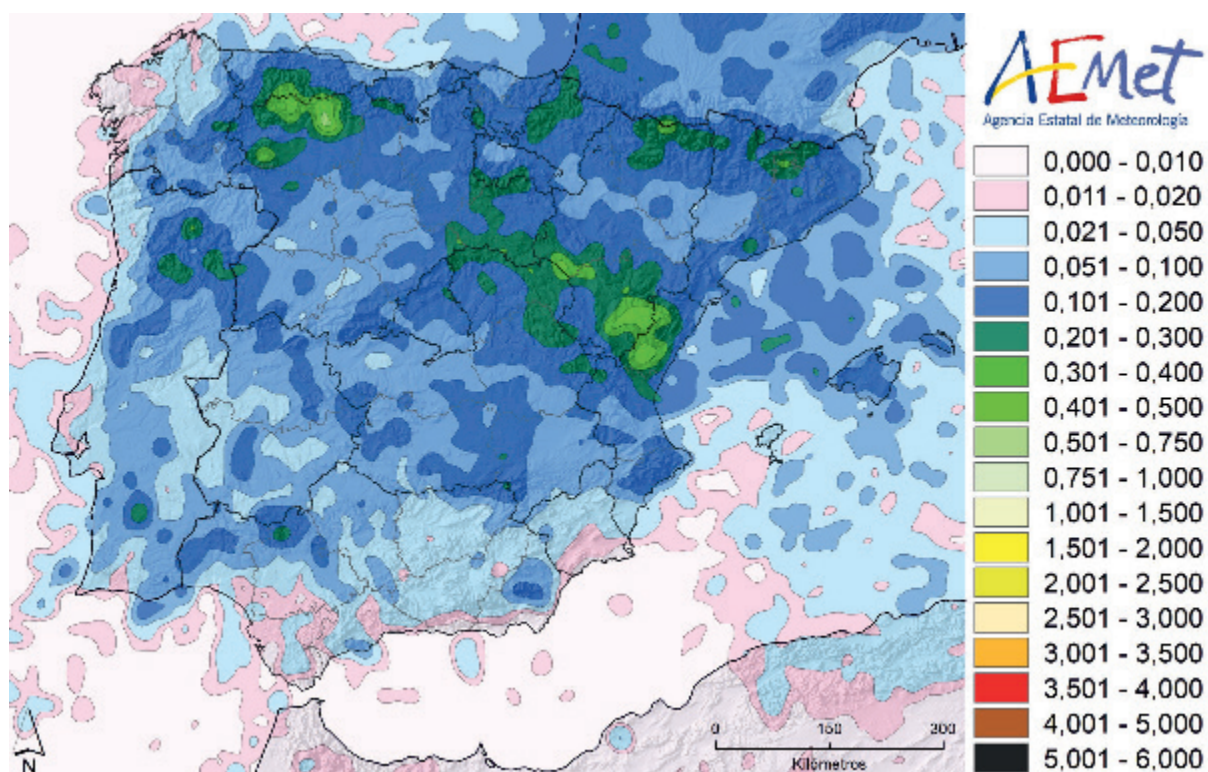


Figura 4.19. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Mayo.

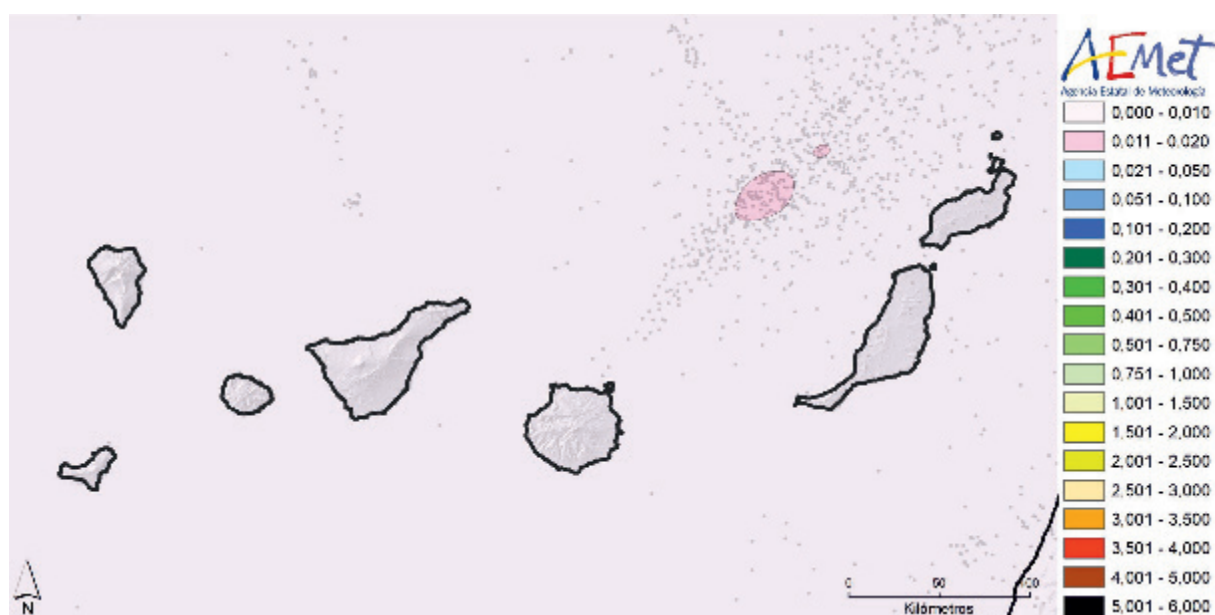


Figura 4.20. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el periodo 2007-2016. Mayo.

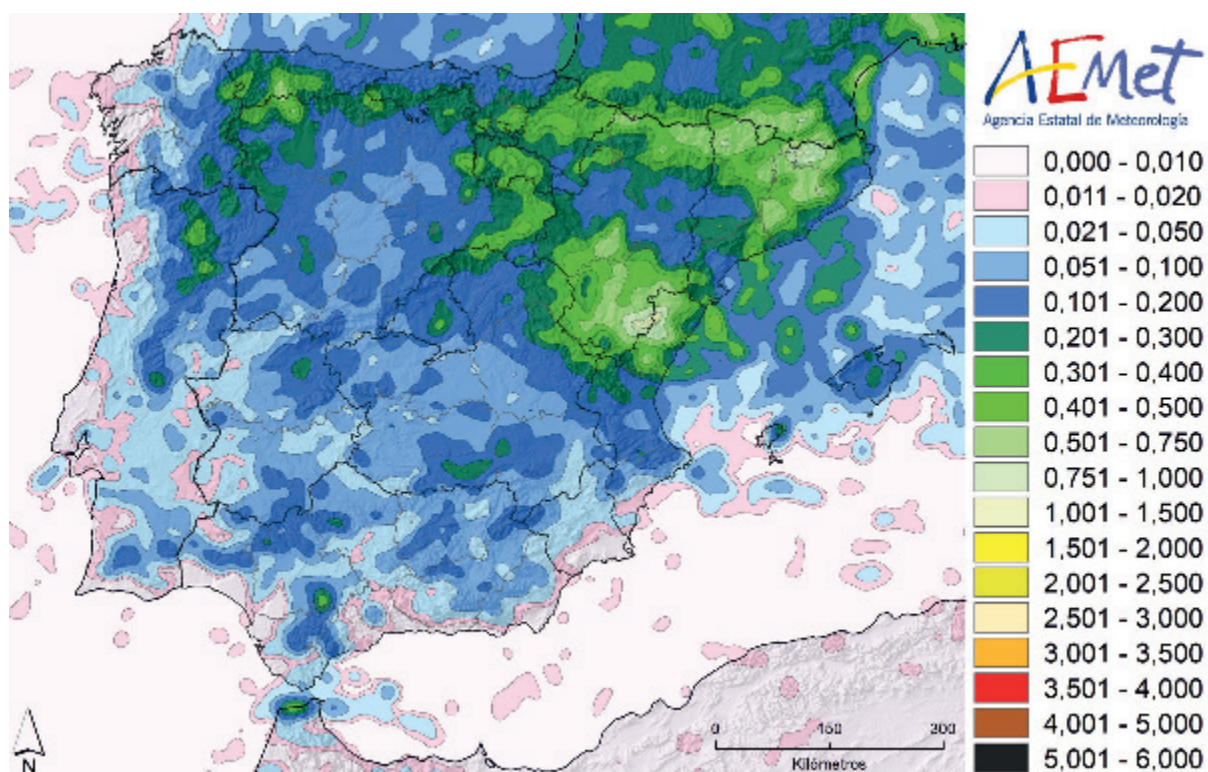


Figura 4.21. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Junio.

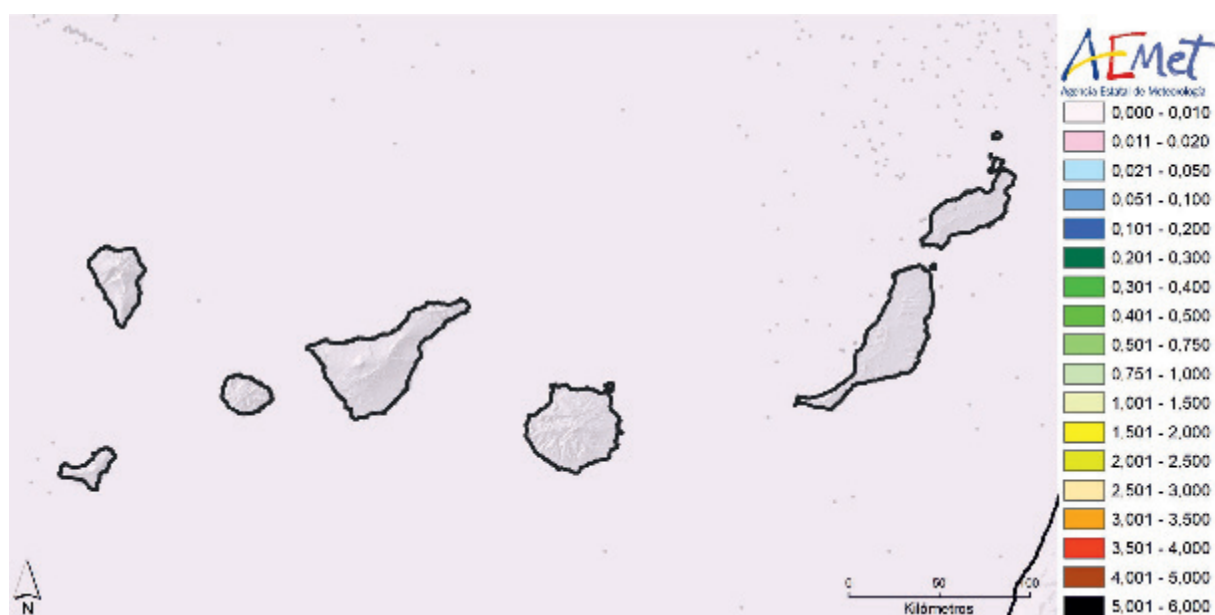


Figura 4.22. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el periodo 2007-2016. Junio.

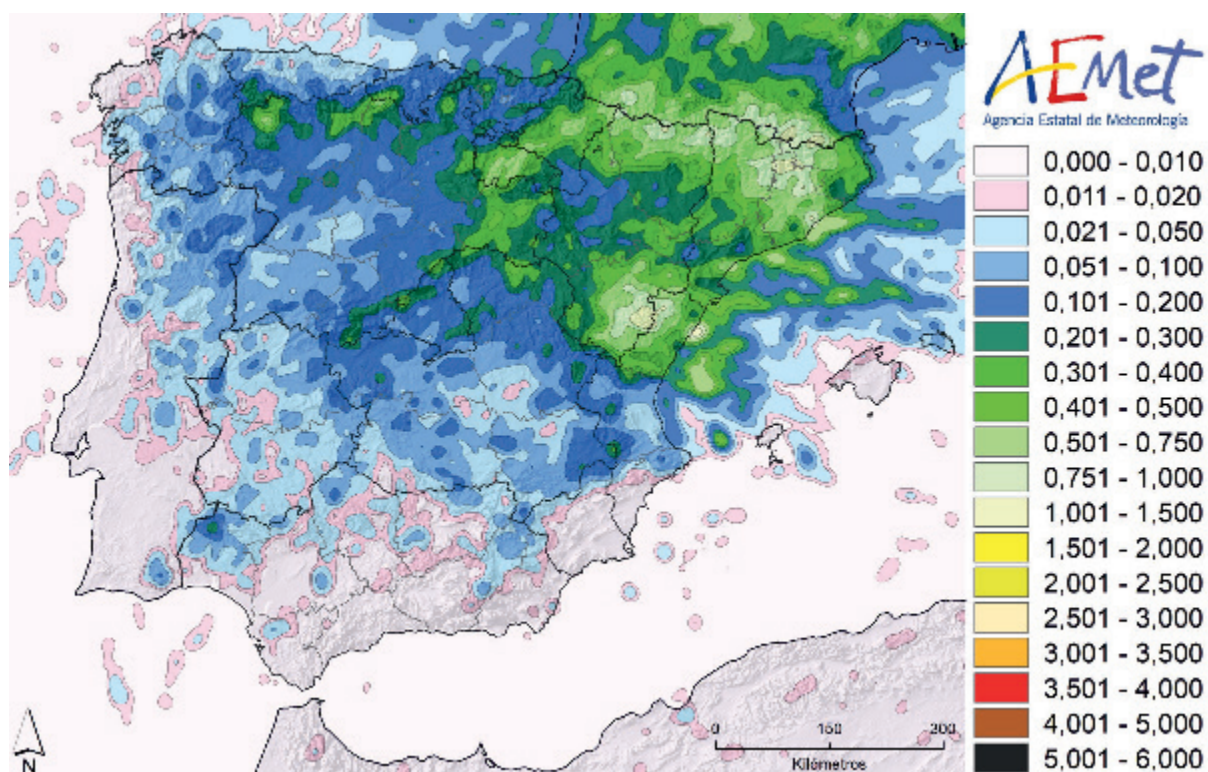


Figura 4.23. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Julio.

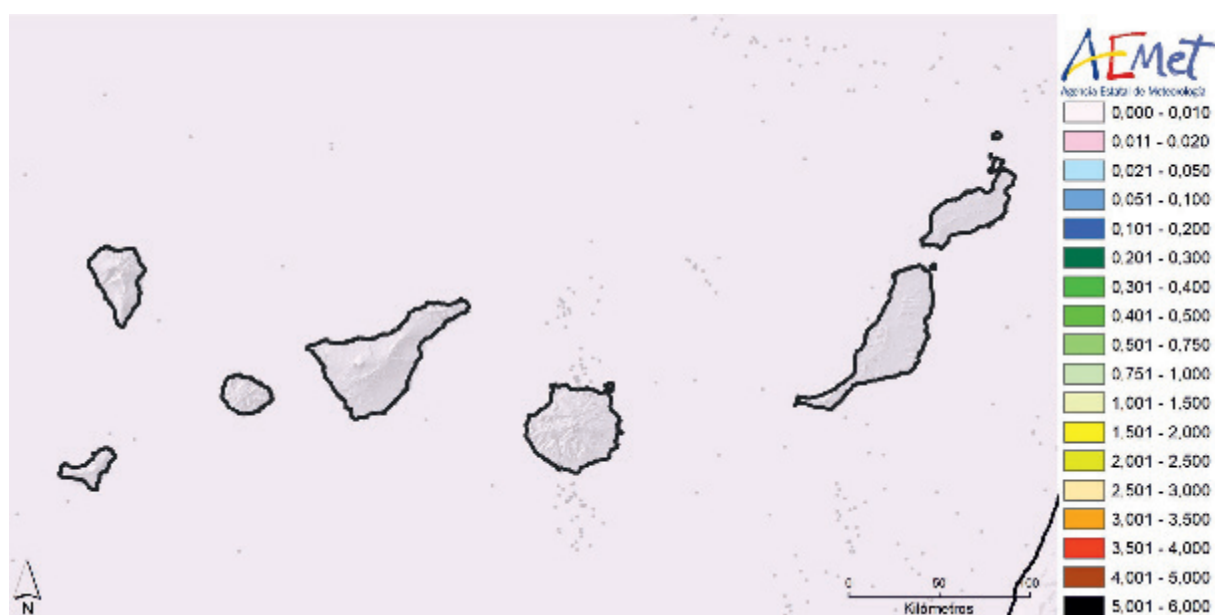


Figura 4.24. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el periodo 2007-2016. Julio.

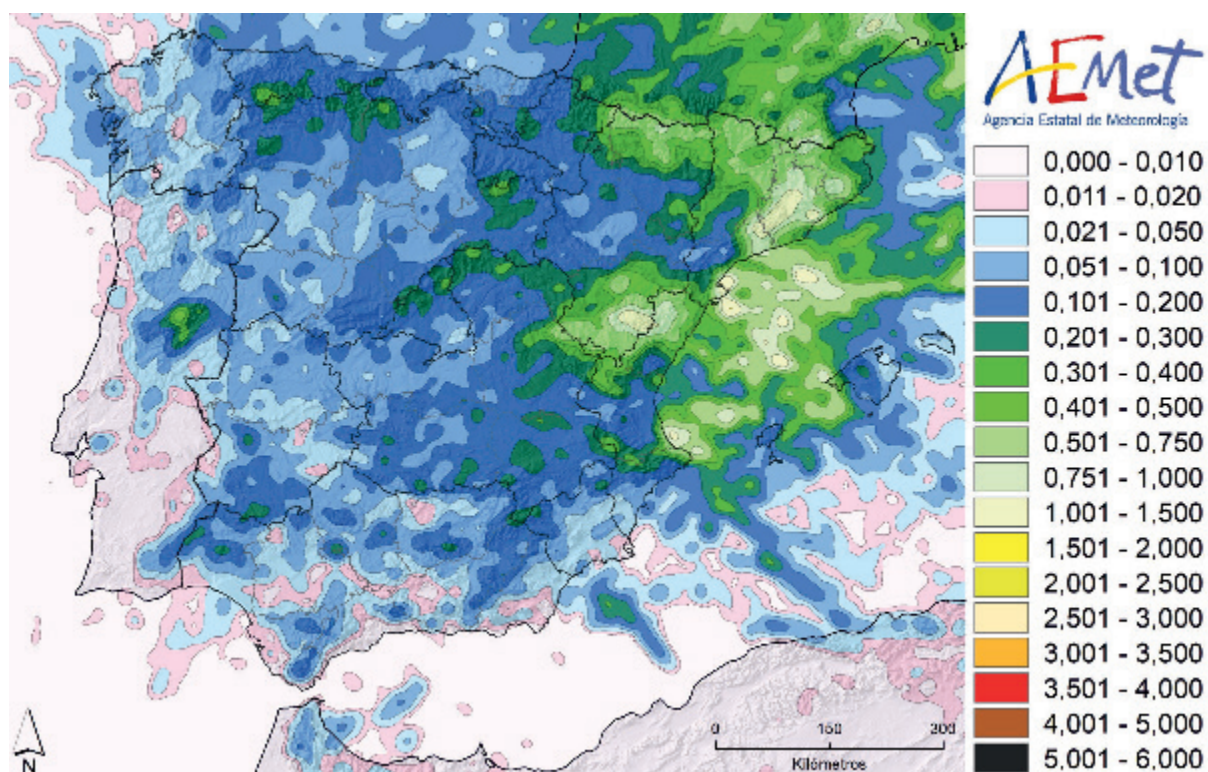


Figura 4.25. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Agosto.

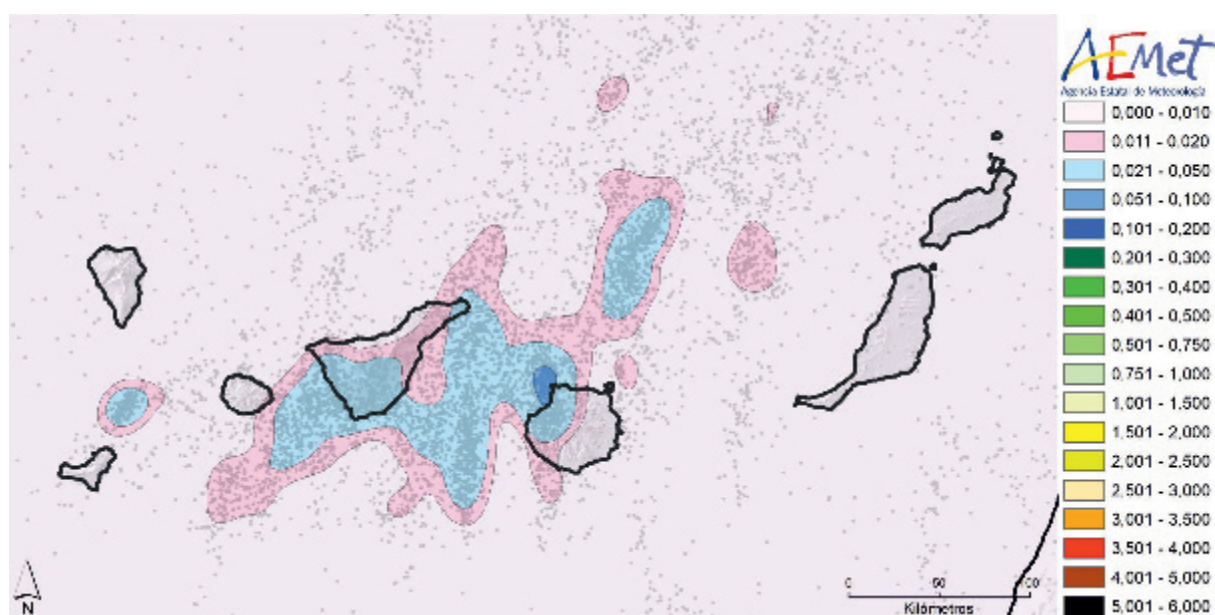


Figura 4.26. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el período 2007-2016. Agosto.

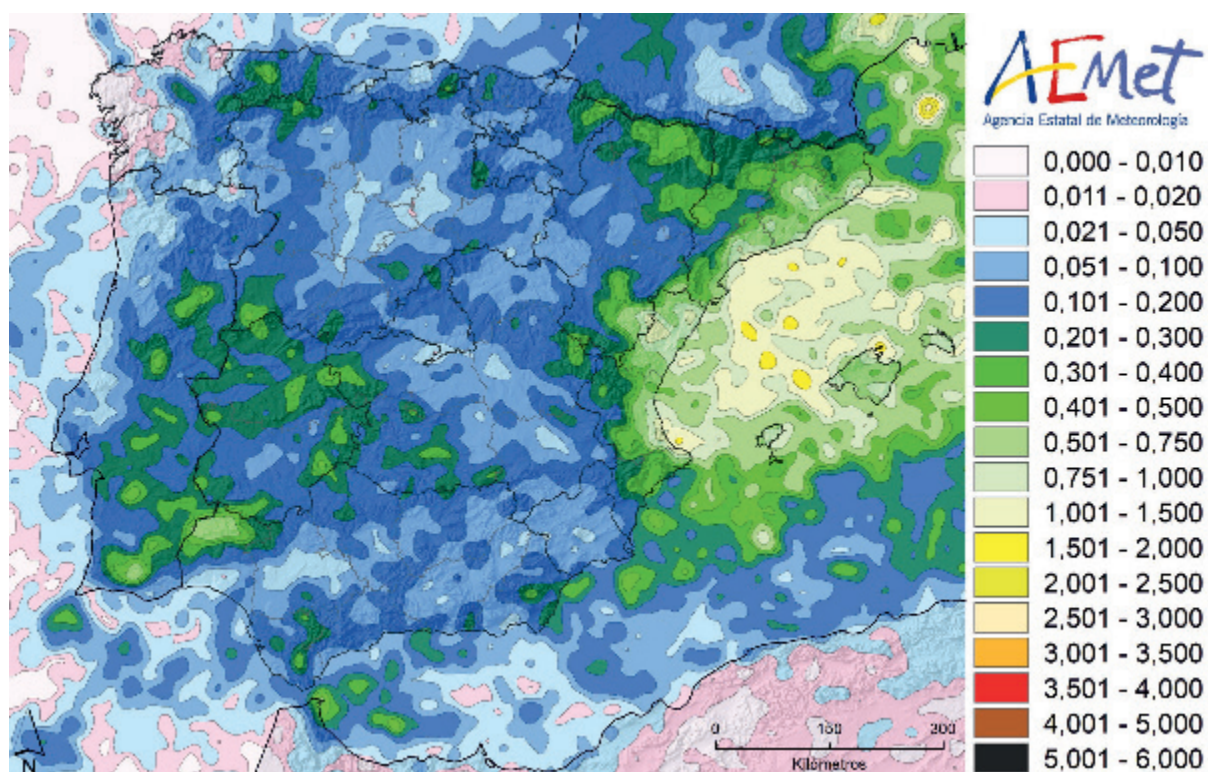


Figura 4.27. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Septiembre.

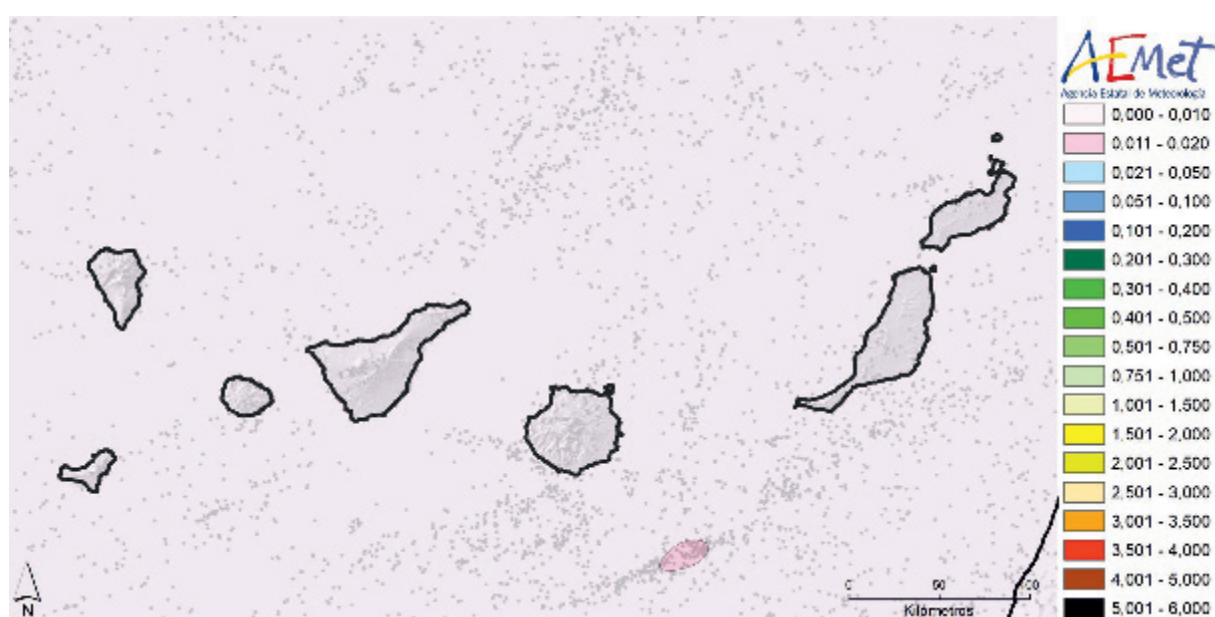


Figura 4.28. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias y descargas eléctricas en el período 2007-2016. Septiembre.

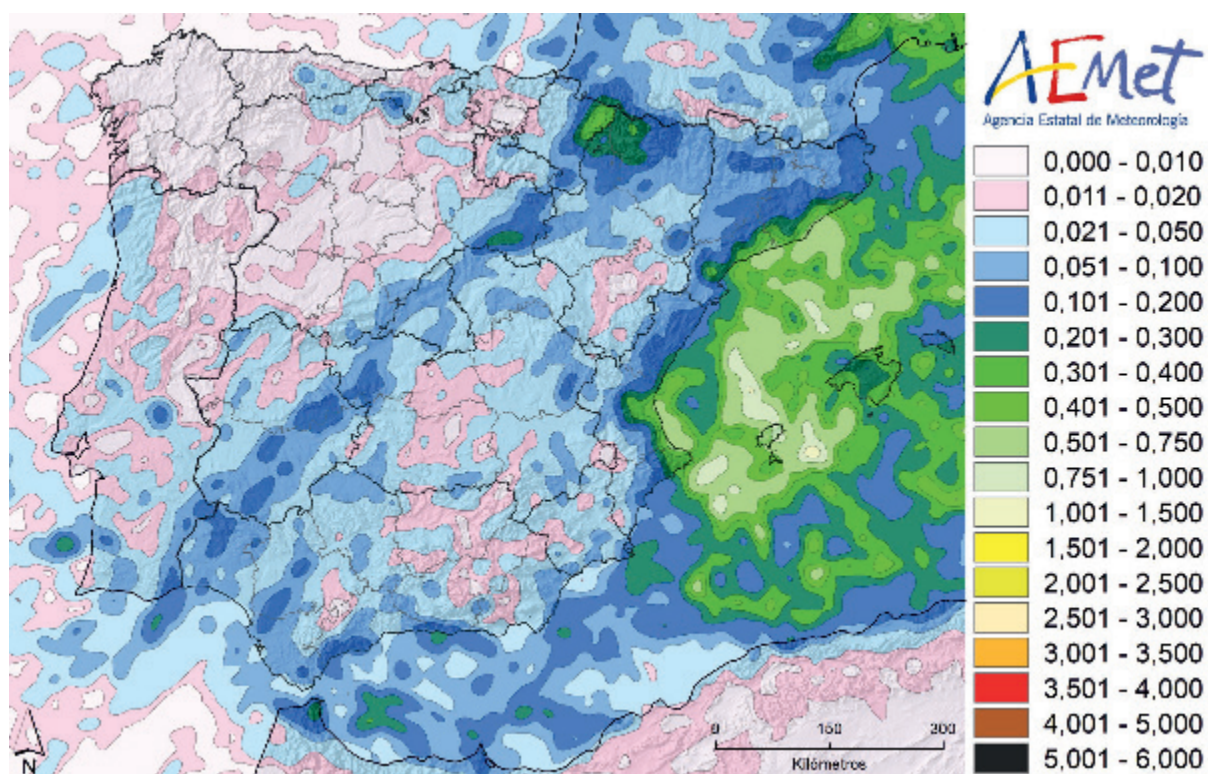


Figura 4.29. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Octubre.

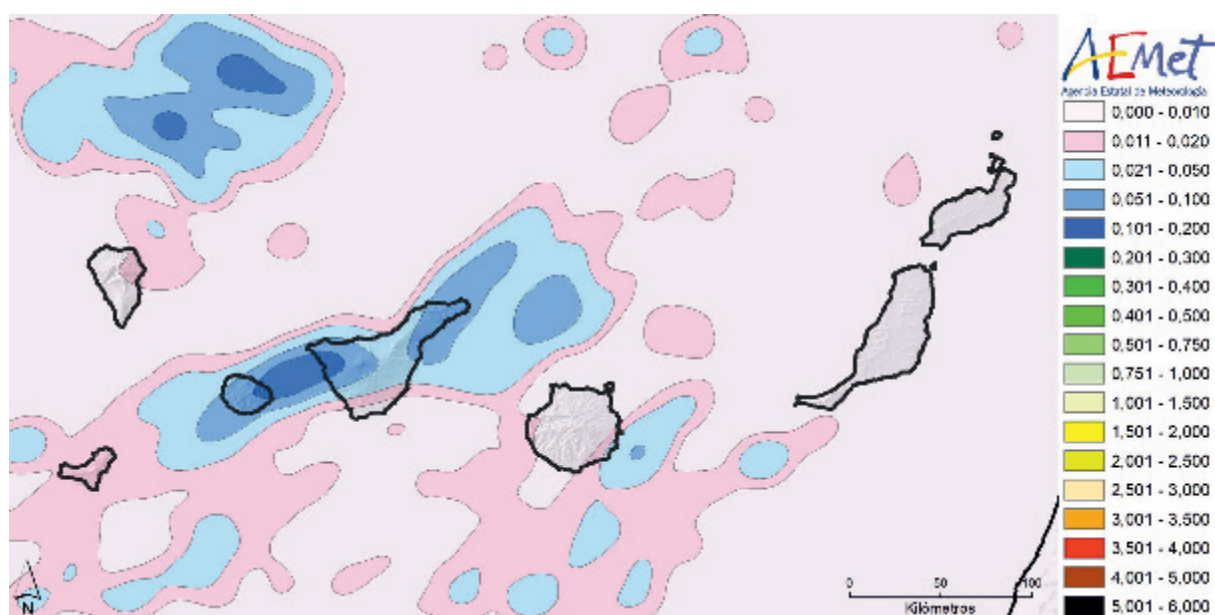


Figura 4.30. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Octubre.

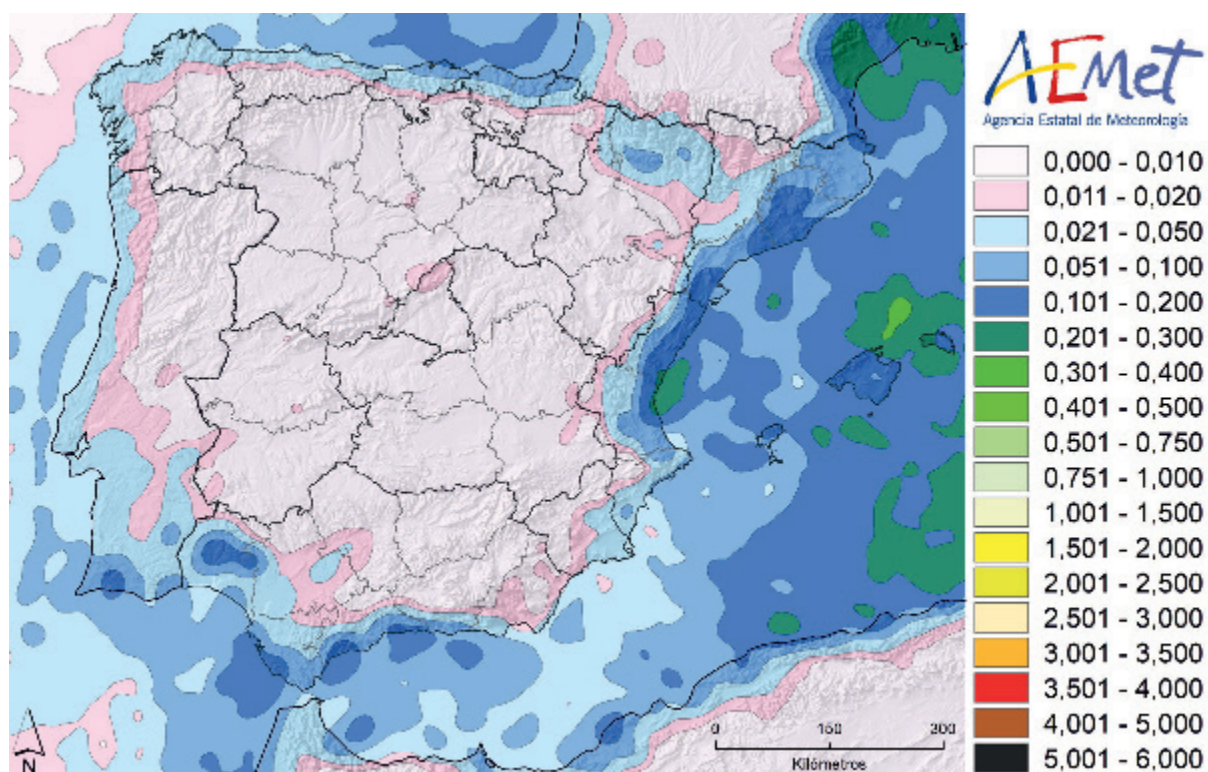


Figura 4.31. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Noviembre.

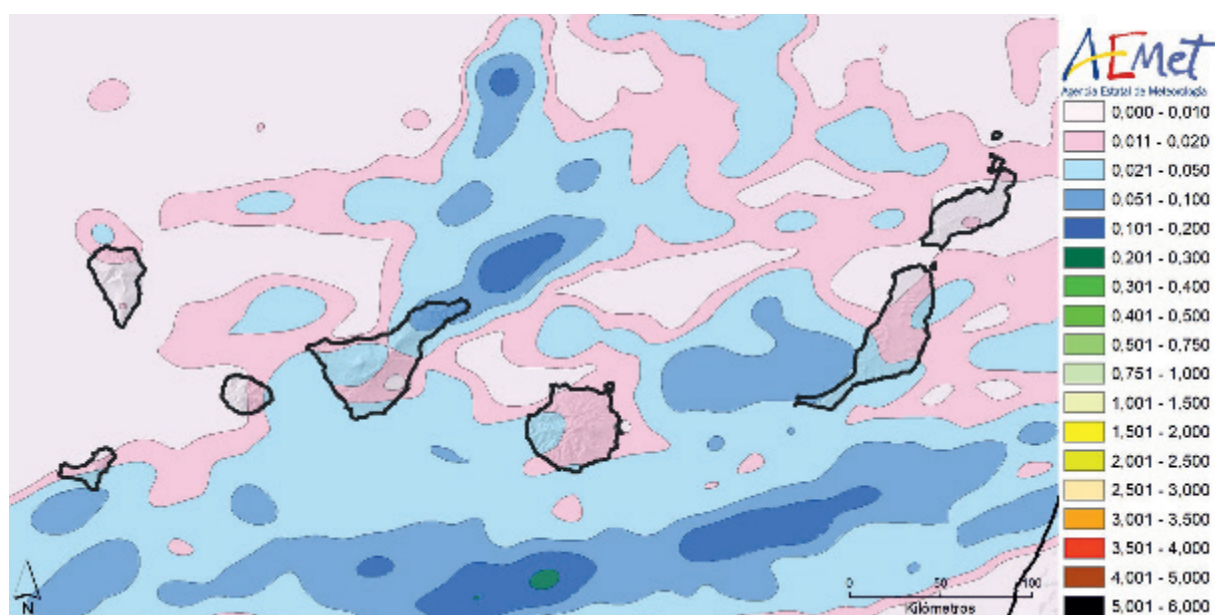


Figura 4.32. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Noviembre.

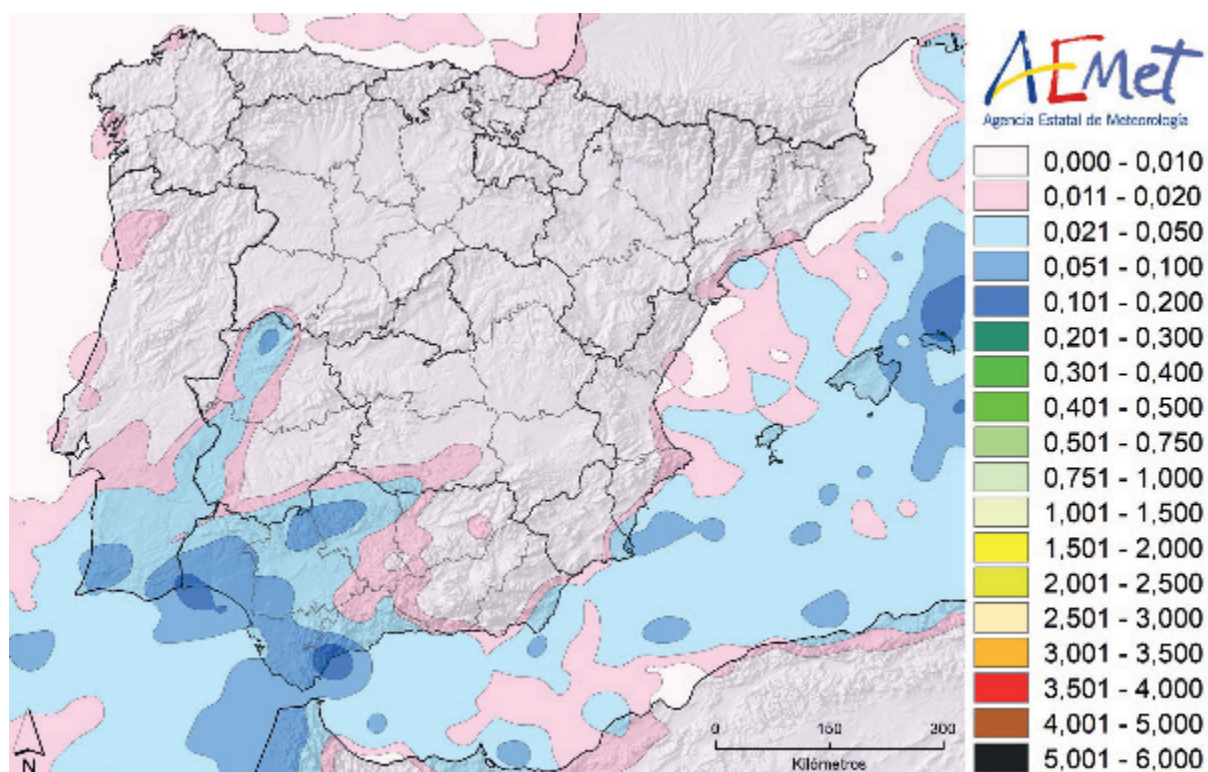


Figura 4.33. Densidad mensual de descargas en la Península e islas Baleares. Diciembre.

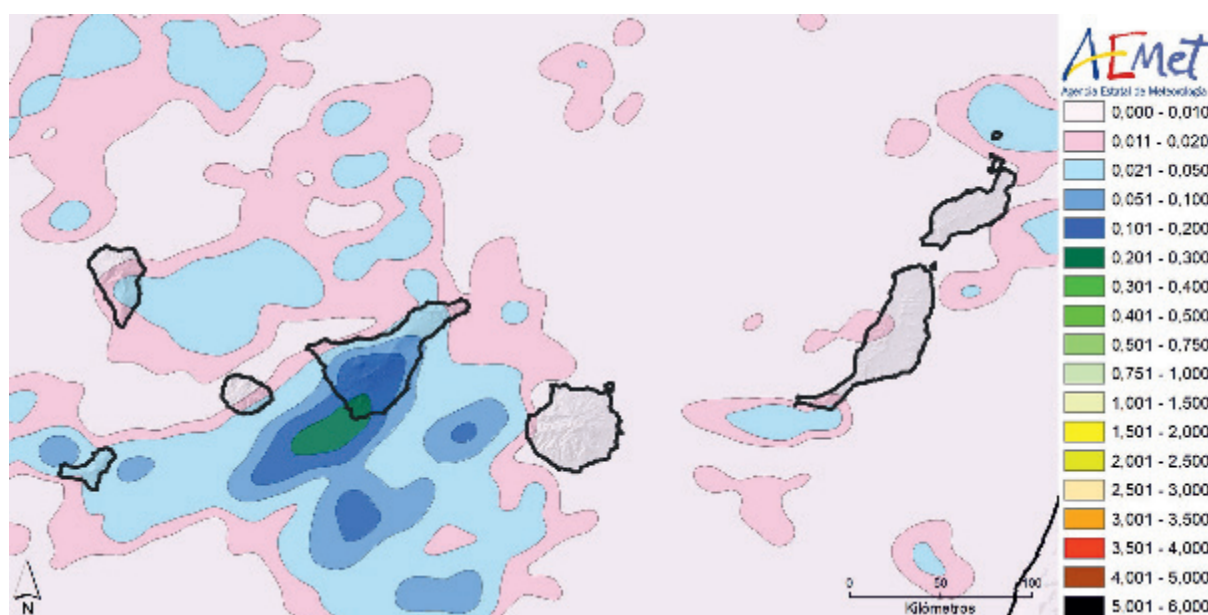


Figura 4.34. Densidad mensual de descargas en las islas Canarias. Diciembre.

4.3. Conclusiones sobre la densidad de descargas

En este apartado se muestran las zonas más significativas (máximos y mínimos) y ampliaciones locales en distintas áreas geográficas significativas, aparte de incluir un breve resumen con alguna conclusión destacable.

La zona de mayor densidad de descargas en la Península se encuentra en el Maestrazgo turolense y castellonense (figura 4.35), entre las localidades de Mosqueruela, Valdelinares y la Iglesuela del Cid

(Teruel), y Vilafranca (Castellón). En esta zona, la densidad media anual de descargas está próxima a 6 descargas/km²/año. El realce orográfico como factor desencadenante de tormentas en primavera y verano, así como la convergencia de vientos hace de esta zona la de mayor actividad ceráunica de España.

La zona de mínimos en la Península, con una densidad de descargas ligeramente superior a 0,1 descargas/km²/año se encuentra en la provincia de A Coruña, como se observa en la figura 4.36.

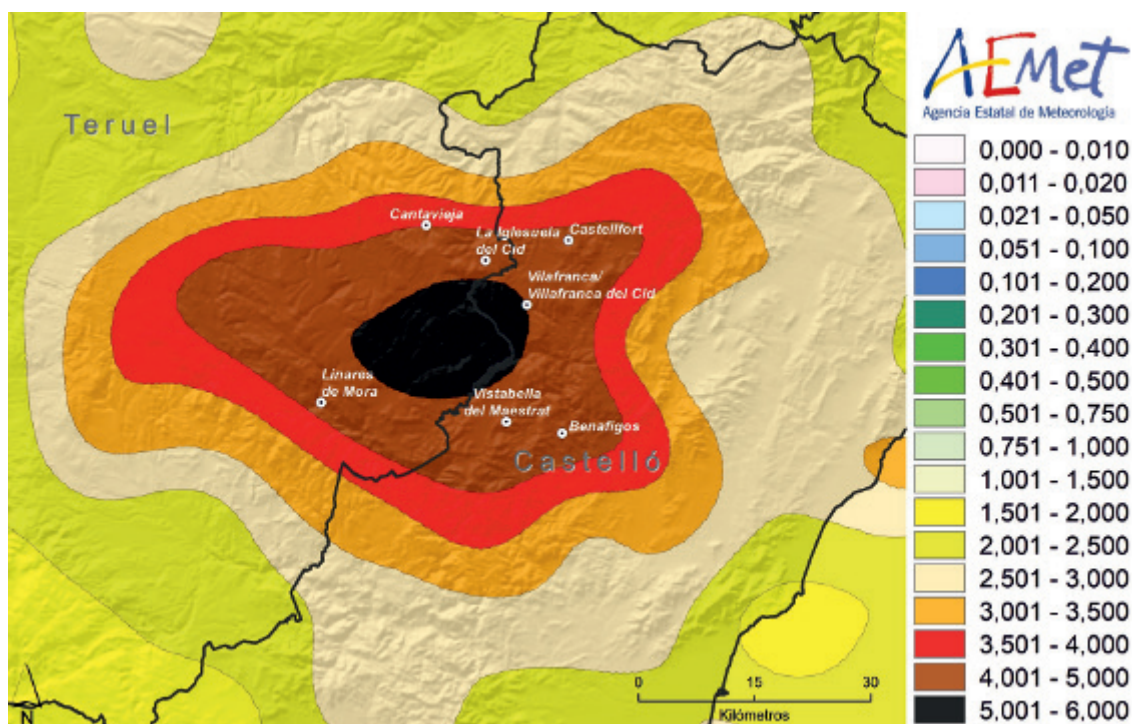


Figura 4.35. Detalle de la zona de mayor densidad anual de descargas en la Península e islas Baleares.

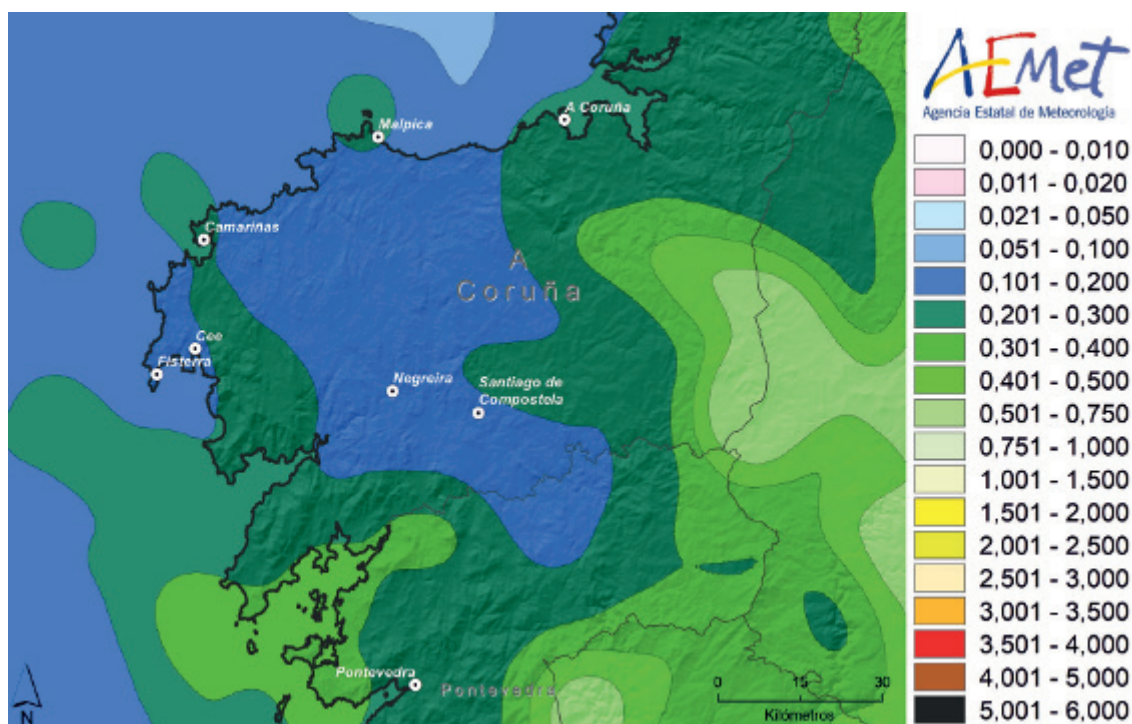


Figura 4.36. Detalle de la zona de menor densidad anual de descargas en la Península e islas Baleares.

Seguidamente (figuras 4.37 a 4.47) se presentan con más detalle mapas de densidad anual de descargas centrados en una o varias comunidades autónomas, que permiten hacer una mejor distinción geográfica de la distribución. No se incluyen los mapas de Canarias al haber sido mostrados en el apartado anterior.

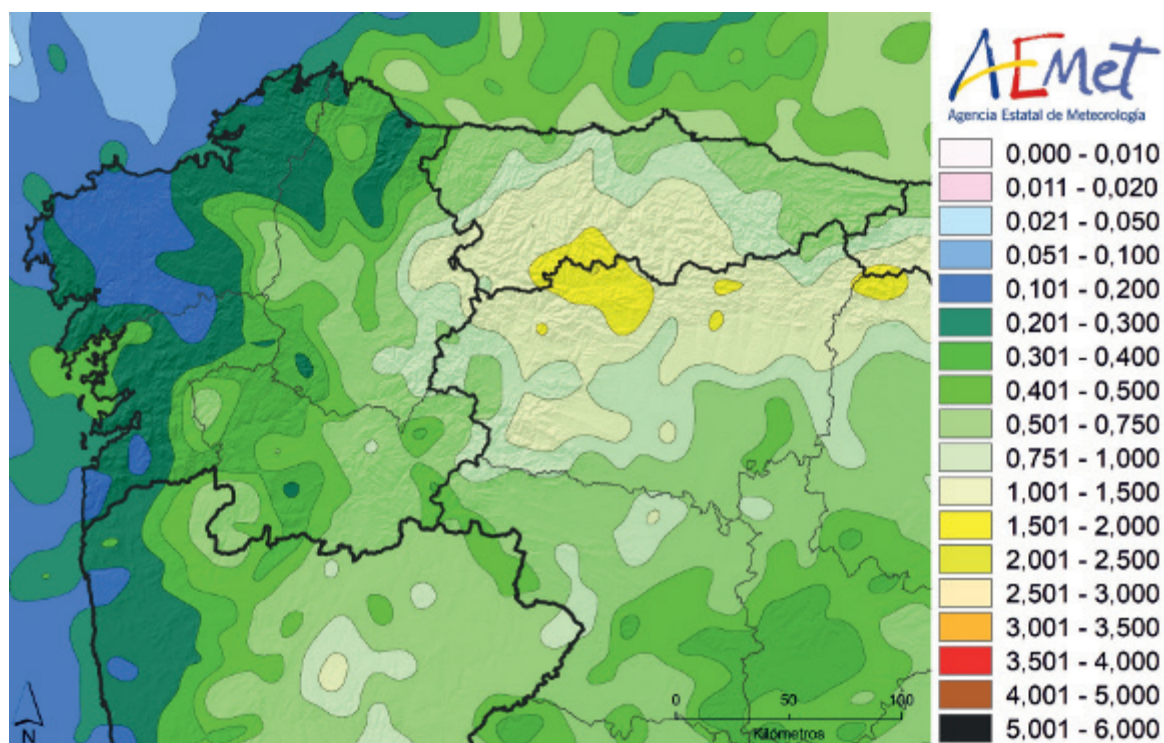


Figura 4.37. Densidad anual de descargas en Galicia y Principado de Asturias.

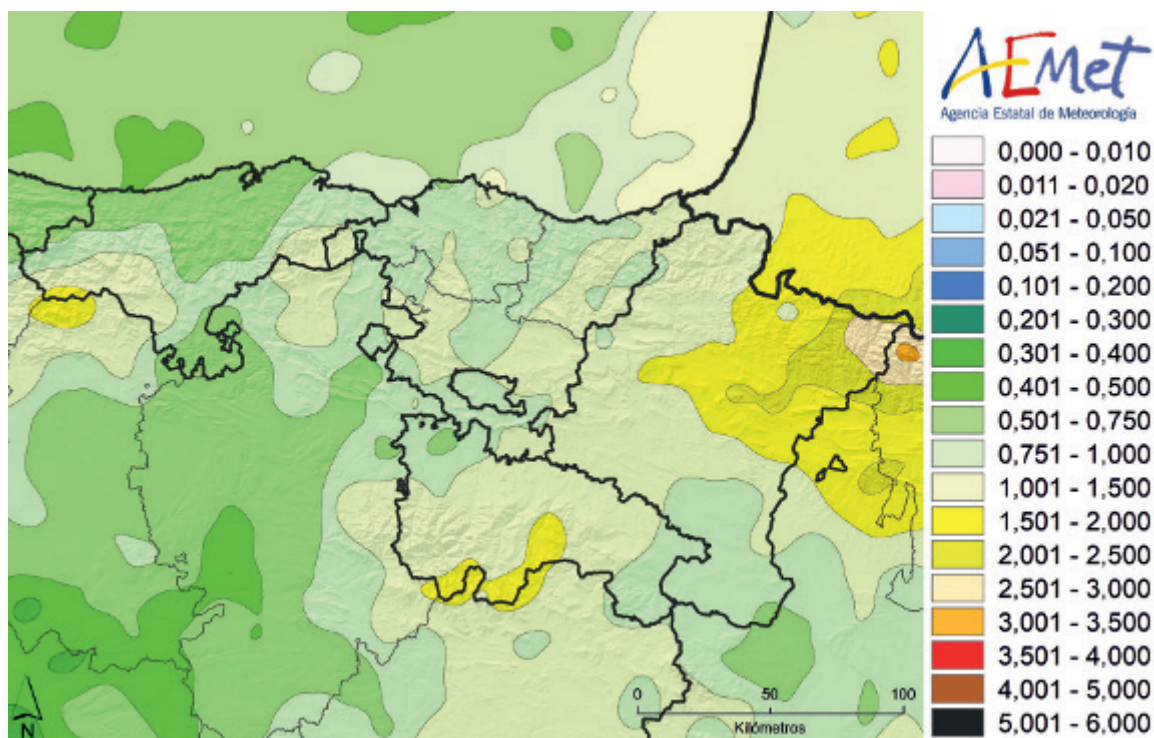


Figura 4.38. Densidad anual de descargas en Cantabria, País Vasco, Comunidad Foral de Navarra y La Rioja.

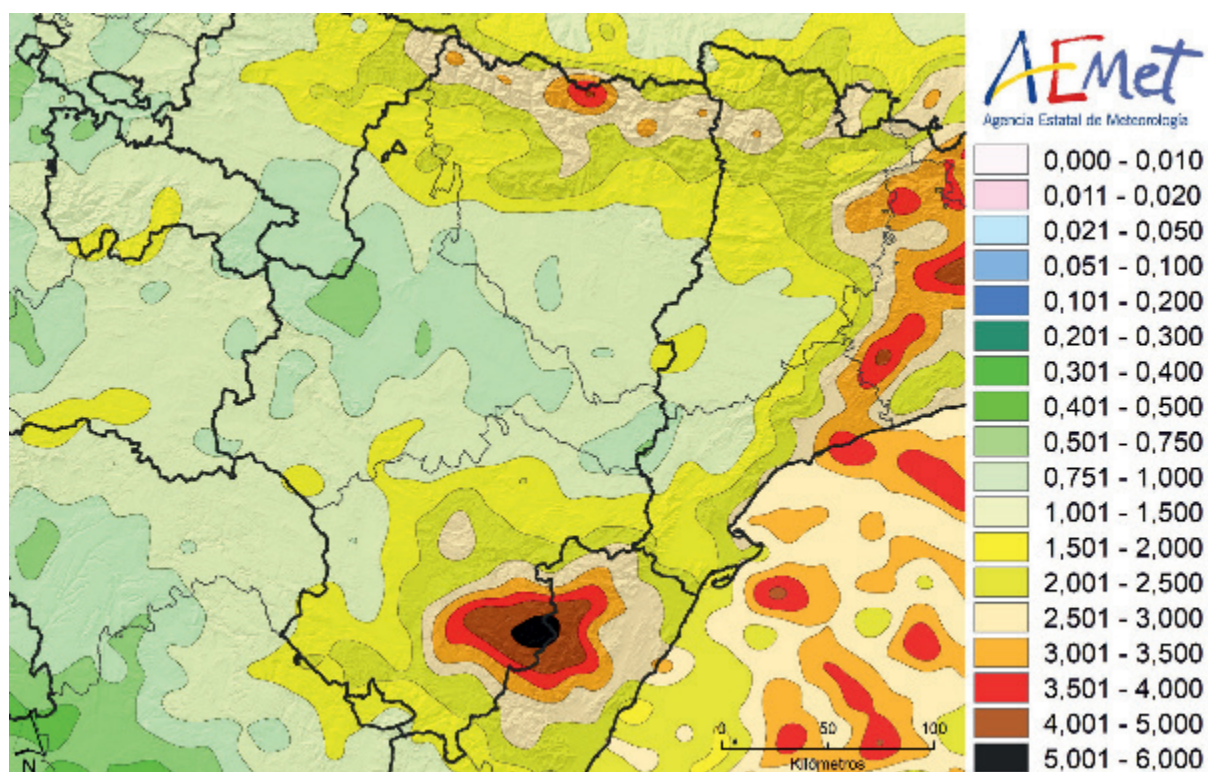


Figura 4.39. Densidad anual de descargas en Aragón.

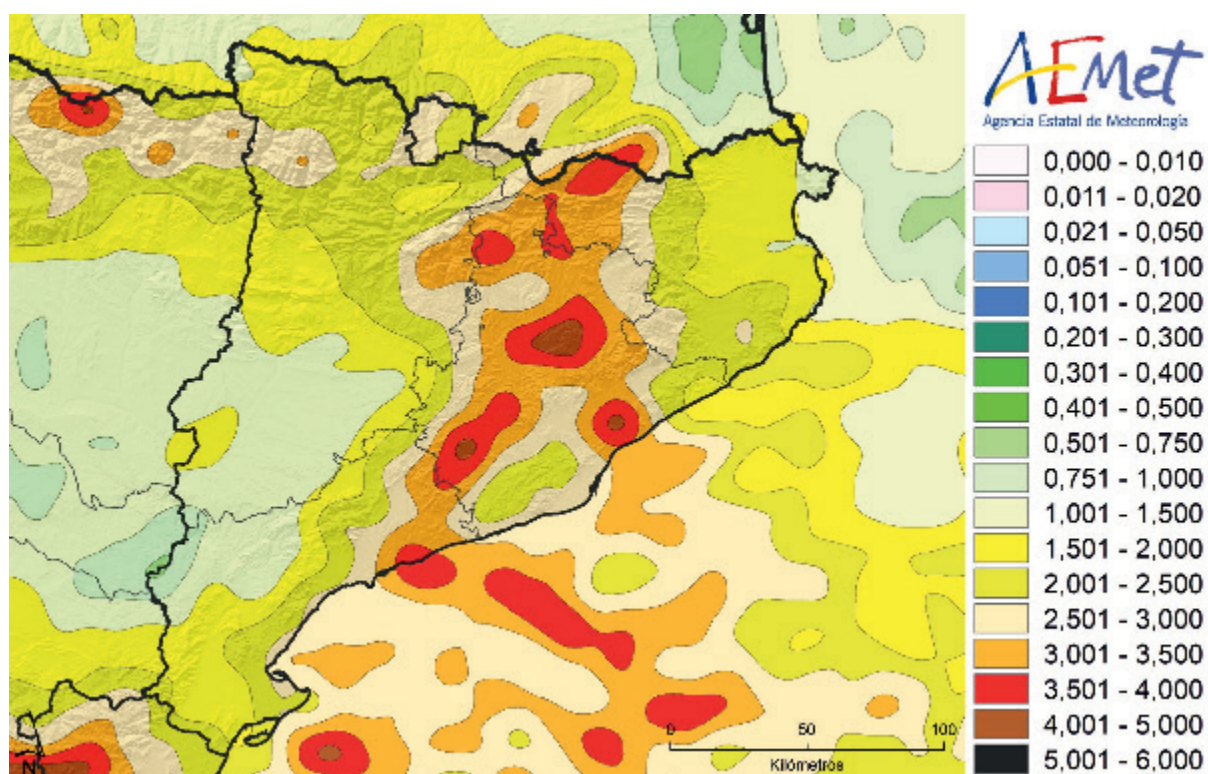


Figura 4.40. Densidad anual de descargas en Cataluña.

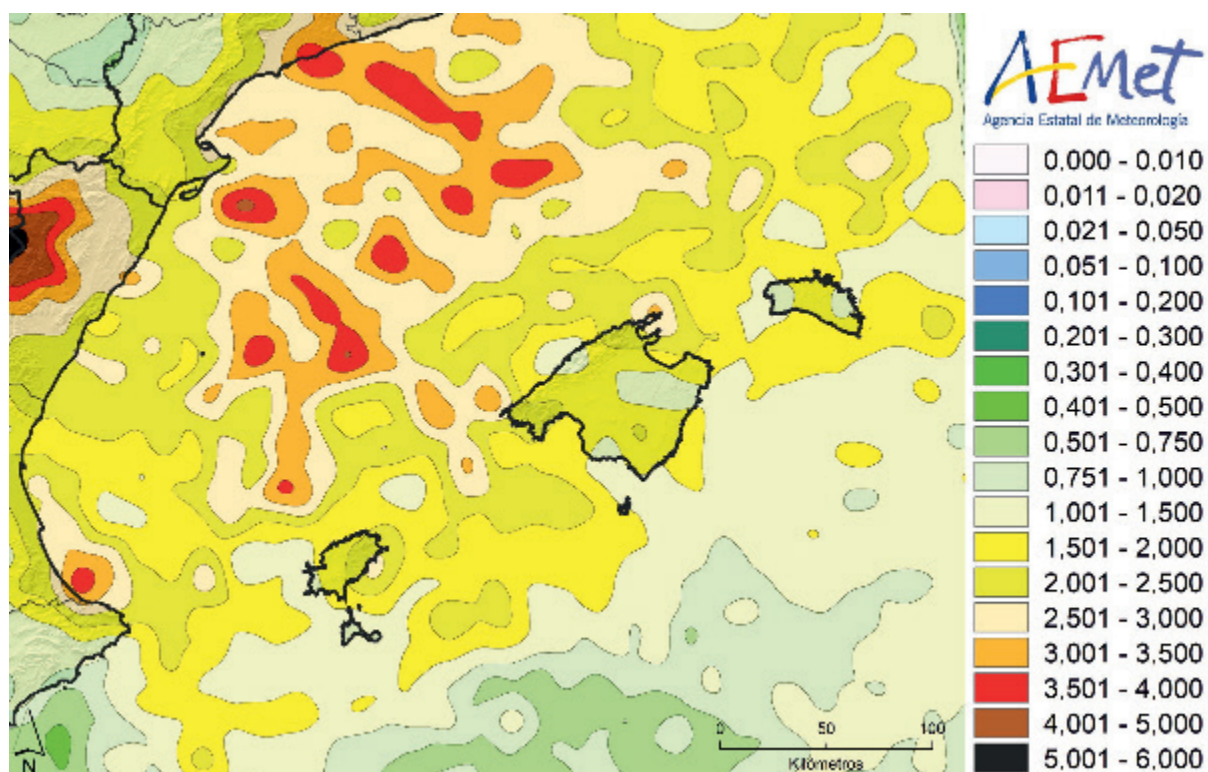


Figura 4.41. Densidad anual de descargas en las Illes Balears.

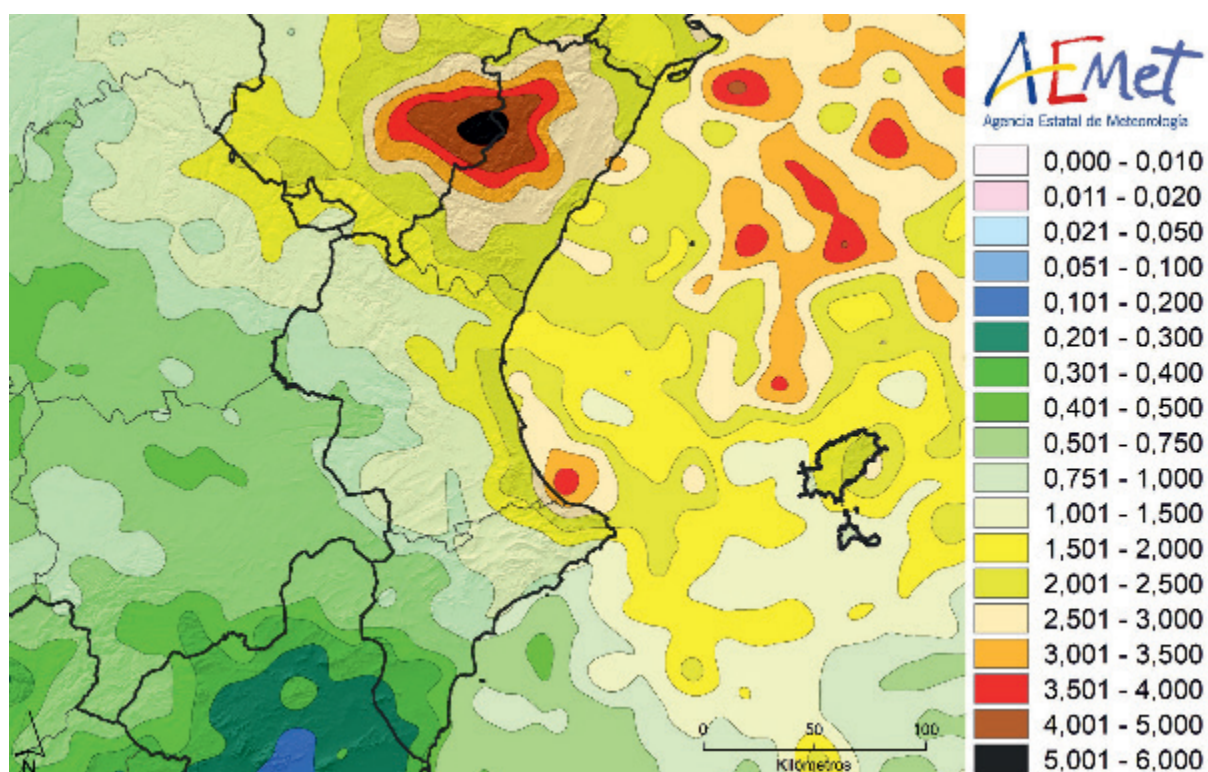


Figura 4.42. Densidad anual de descargas en la Comunitat Valenciana.

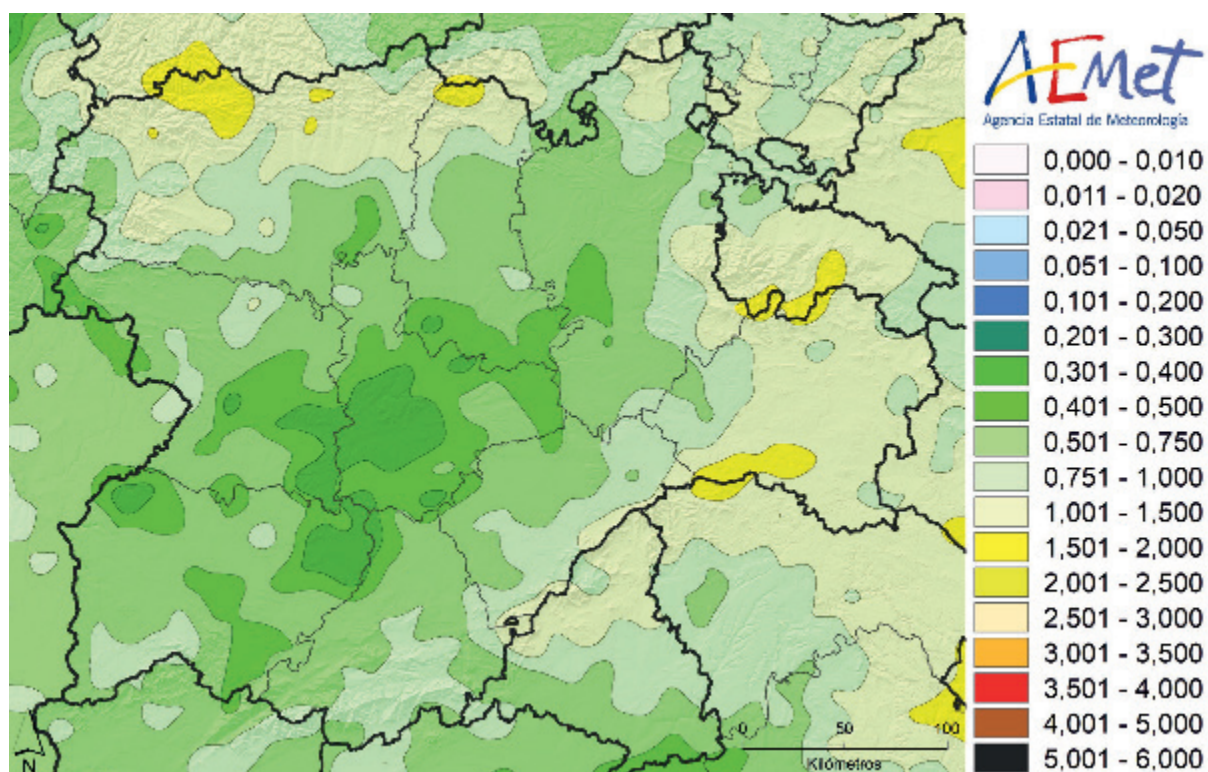


Figura 4.43. Densidad anual de descargas en Castilla y León.

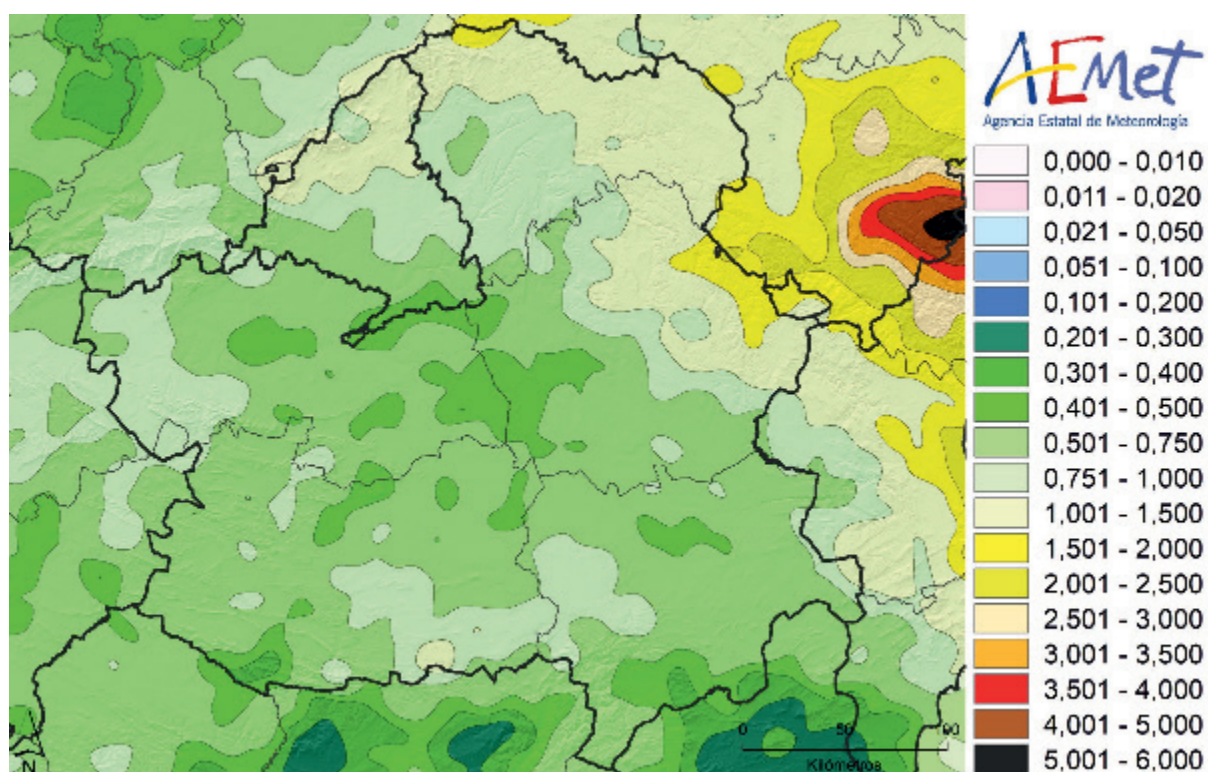


Figura 4.44. Densidad anual de descargas en Castilla-La Mancha y Comunidad de Madrid.

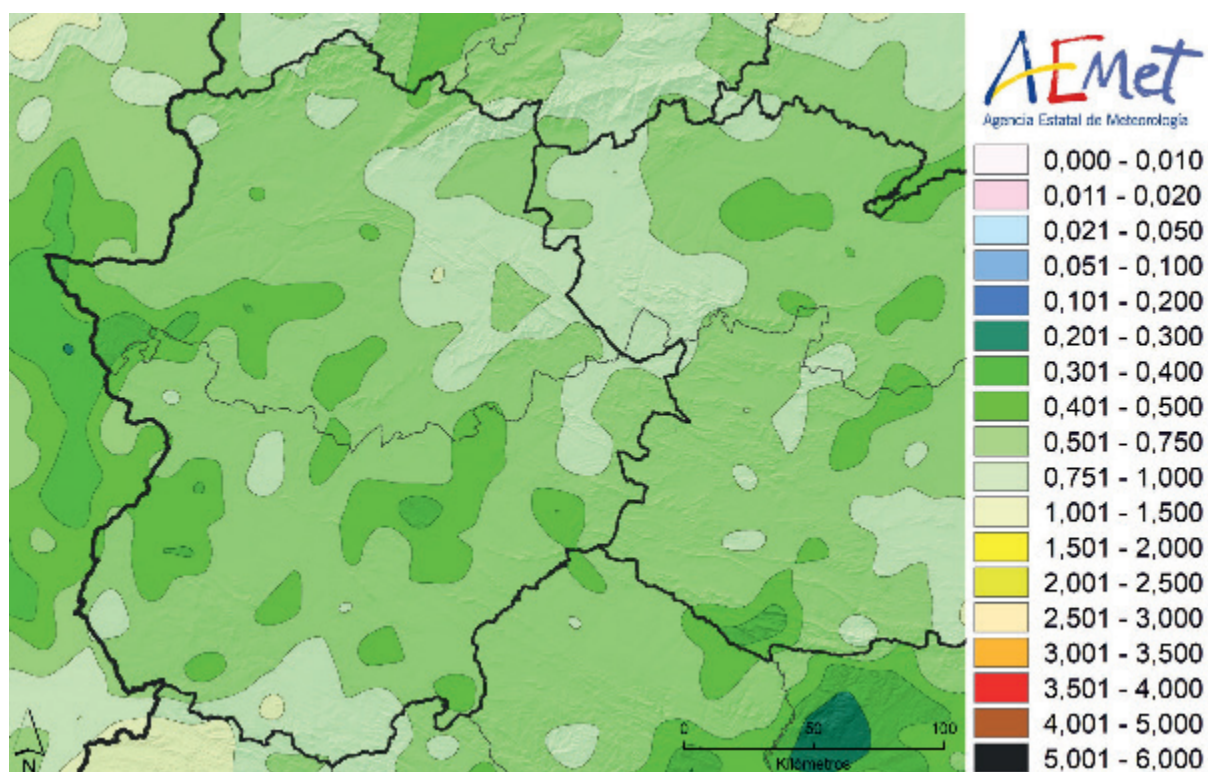


Figura 4.45. Densidad anual de descargas en Extremadura.

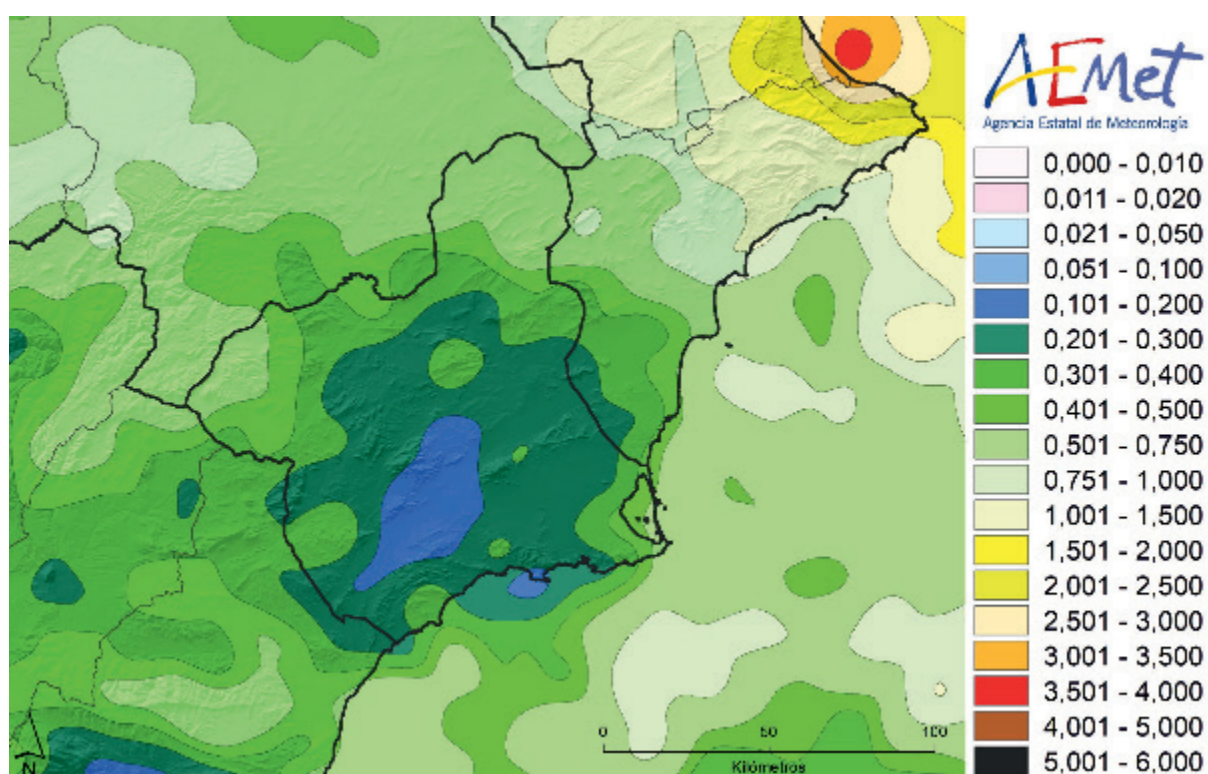


Figura 4.46. Densidad anual de descargas en la Región de Murcia.

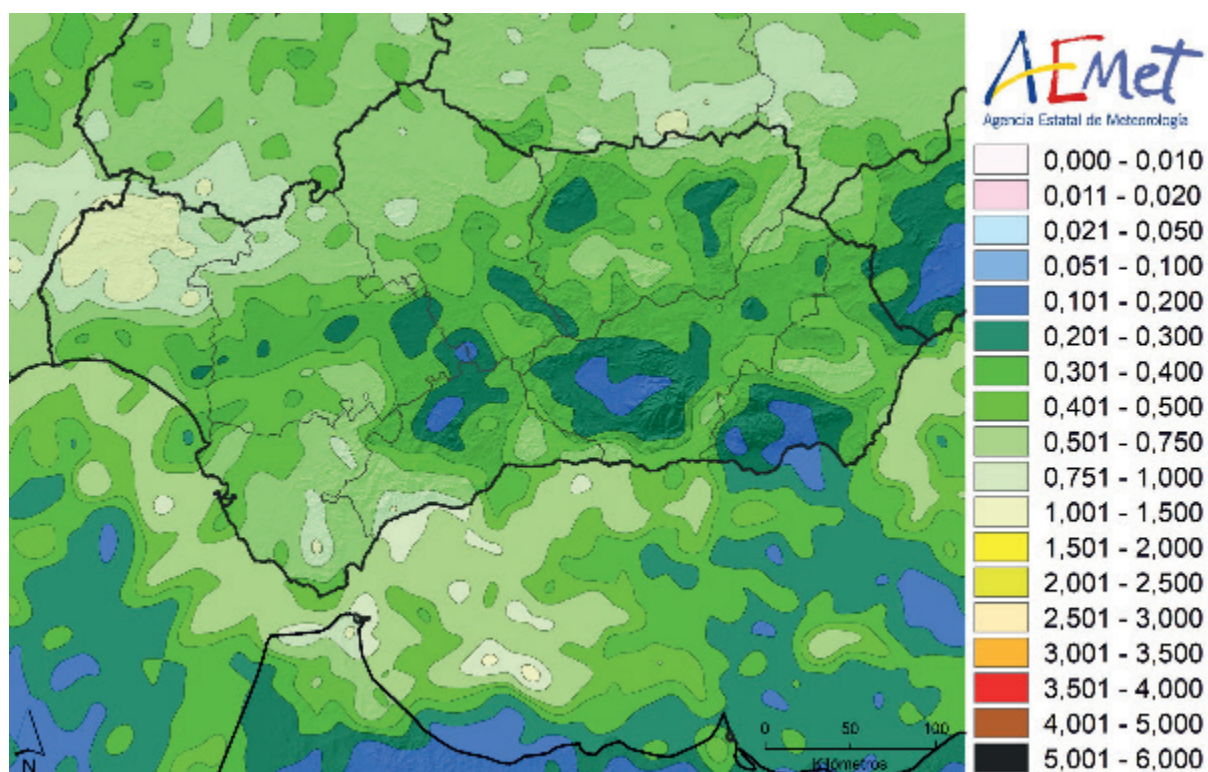


Figura 4.47. Densidad anual de descargas en Andalucía y las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla.

Considerando el área completa del estudio de la zona de la Península y Baleares, que incluye zonas terrestres y marítimas, y analizando la distribución de las descargas en las distintas estaciones del año (figura 4.48), la mayor actividad se presenta en el otoño en el 55 % de la superficie, que se corresponde con casi toda el área mediterránea, incluyendo las islas Baleares y prácticamente toda la franja costera

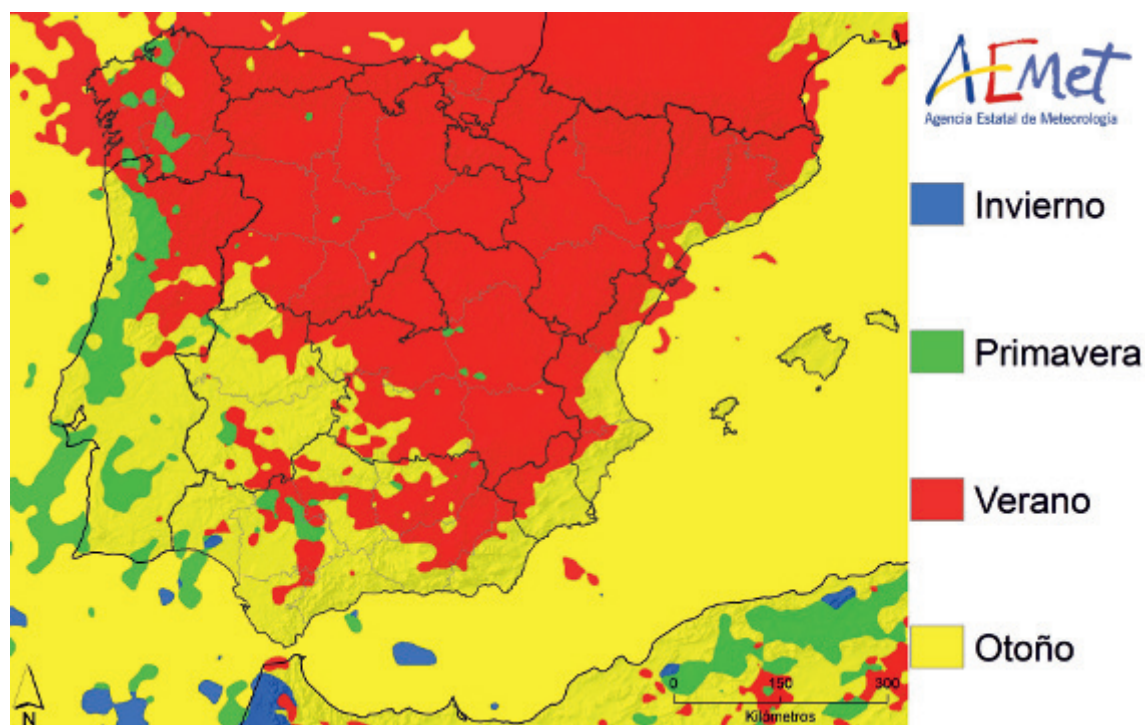


Figura 4.48. Distribución espacial de la estación con mayor frecuencia de descargas en la Península y Baleares.

de las comunidades mediterráneas, además de en amplias zonas de Extremadura y Andalucía. En el 39 % del territorio, la mayor densidad de descargas se observa en verano, que se corresponde con casi toda la mitad norte peninsular, Madrid, gran parte de Castilla-La Mancha, el interior de la Comunidad Valenciana y Región de Murcia, y la zona marítima cantábrica y de la costa atlántica gallega. Solo en el 5 % de la zona de estudio, la mayor densidad de descargas se observa en la primavera y en menos del 1 % de la zona de estudio en invierno.

Al tener en cuenta solo las zonas terrestres de la España peninsular y Baleares (sin incluir, por tanto, zonas marítimas y la parte terrestre de Francia, Portugal y el norte de África), la estación con mayor densidad de descargas ya no es el otoño sino el verano, confirmando el modelo conceptual que indica que el calentamiento diferencial que sufre la tierra respecto al mar, las bajas presiones semipermanentes veraniegas de origen térmico en superficie que se sitúan en el interior de la Península y la convergencia del viento que actúa como mecanismo de disparo, componen el proceso más habitual de formación de tormentas de verano en el interior peninsular. En el 73 % de la superficie terrestre de la España peninsular y Baleares, la mayor actividad se presenta en el verano, en el 25 % en el otoño. Solo en el 1,8 % la mayor actividad se registra en la primavera y hay una pequeña zona de 300 km², próxima a la ciudad de Huelva, en la que la mayor frecuencia de descargas se registra en invierno.

Como conclusión, las estaciones con más frecuencia de descargas son el verano y el otoño. El verano es la estación eléctricamente más activa en gran parte de la Península —especialmente en su mitad norte— con el predominio de situaciones tormentosas cuyo mecanismo de disparo es el calentamiento térmico y la existencia de otros ingredientes importantes como la presencia de aire frío en altura y forzamientos orográficos y dinámicos en capas bajas. Por el contrario, el otoño es la estación en la que se producen más descargas en toda la costa mediterránea peninsular, Baleares y extensas áreas de Andalucía y Extremadura. Este período coincide con la llegada de danas y una inestabilidad presente especialmente sobre el mar Mediterráneo. Residualmente en alguna zona de la mitad oeste peninsular el máximo de descargas se registra en primavera.

Considerando el área completa del estudio de la zona de Canarias, en el 57 % de la superficie la mayor actividad se presenta en el otoño, incluyendo gran parte de las islas orientales; en el 35 % del territorio, la mayor densidad de descargas se observa en invierno, abarcando gran parte de la isla de Tenerife. Solo en el 7 % de la zona de estudio la mayor densidad de descargas se observa en la primavera, abarcando toda la isla de La Palma y en menos del 1 % del territorio, la estación del año con más descargas es el verano (figura 4.49).

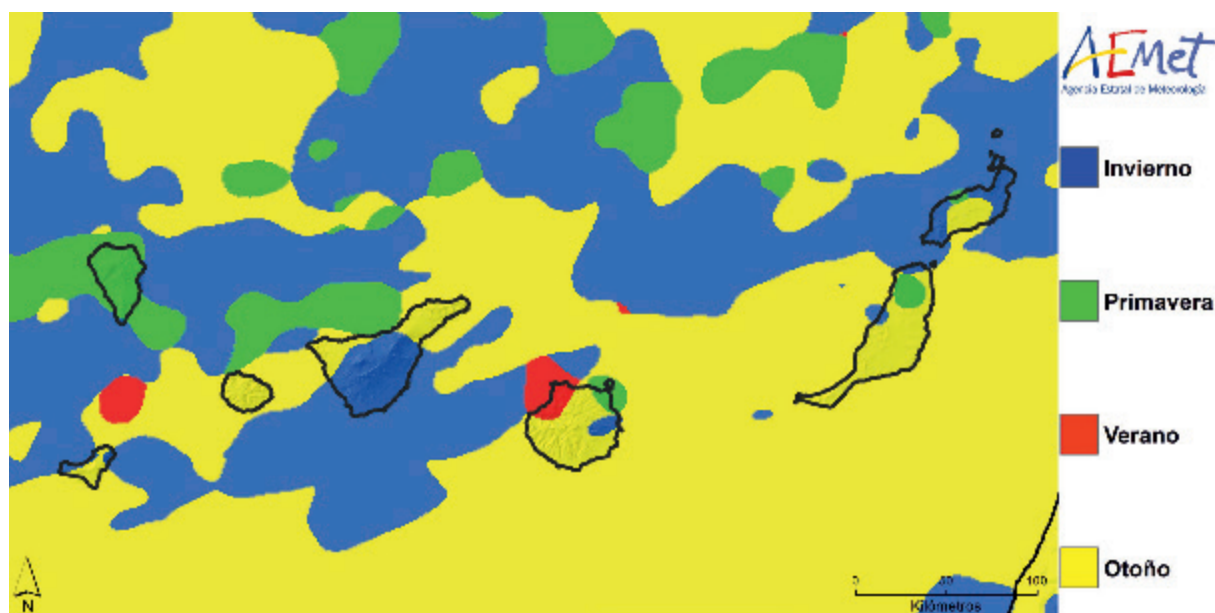


Figura 4.49. Distribución espacial de la estación con mayor frecuencia de descargas en las islas Canarias.

Distribuyendo los datos por provincias, y ordenándolos de mayor a menor densidad anual de descargas, se obtiene la tabla siguiente.

Estadística provincial de descargas eléctricas (periodo 2007-2016)						
Provincia	Descargas totales	Densidad media provincial (descargas/km ²)	Densidad mínima provincial (descargas/km ²)	Densidad máxima provincial (descargas/km ²)	Amplitud (descargas/km ²)	Desviación típica
Barcelona	236 845	3,05	1,59	4,28	2,70	0,53
Castellón/Castelló	188 395	2,84	1,59	5,39	3,80	0,69
Girona	133 768	2,27	1,04	3,76	2,72	0,62
Teruel	312 499	2,11	0,88	5,52	4,64	0,88
Tarragona	126 899	2,03	0,74	3,78	3,05	0,66
Lleida	231 038	1,91	0,89	3,70	2,81	0,54
Huesca	287 000	1,82	0,87	4,05	3,17	0,67
Illes Balears	86 000	1,71	1,10	3,09	1,98	0,29
Navarra	144 751	1,40	0,64	2,90	2,26	0,44
Valencia/València	143 275	1,33	0,62	3,33	2,71	0,44
Rioja, La	59 927	1,19	0,70	1,67	0,97	0,23
Soria	121 651	1,18	0,68	1,91	1,23	0,23
Zaragoza	187 051	1,09	0,57	2,44	1,87	0,28
Guadalajara	129 609	1,06	0,53	1,91	1,37	0,22
León	157 665	1,01	0,44	2,02	1,58	0,31
Araba/Álava	30 725	1,01	0,74	1,36	0,61	0,11
Gipuzkoa	19 359	1,00	0,77	1,33	0,56	0,09
Ceuta	191	0,95	0,89	0,97	0,08	0,02
Bizkaia	20 867	0,94	0,71	1,21	0,50	0,08
Asturias	98 977	0,94	0,36	2,01	1,65	0,31
Alicante/Alacant	51 679	0,89	0,23	3,27	3,03	0,52
Cuenca	147 171	0,86	0,43	2,04	1,61	0,34
Madrid	69 531	0,86	0,40	1,47	1,07	0,23
Cantabria	43 569	0,83	0,48	1,82	1,34	0,23
Huelva	81 495	0,80	0,28	1,45	1,17	0,31
Segovia	51 899	0,77	0,42	1,60	1,18	0,18
Burgos	108 446	0,76	0,40	1,57	1,17	0,21
Palencia	59 377	0,73	0,38	1,87	1,49	0,29
Ávila	55 319	0,69	0,35	1,30	0,95	0,14
Ciudad Real	130 200	0,66	0,36	1,15	0,80	0,13
Cáceres	127 485	0,64	0,32	1,01	0,69	0,13
Albacete	95 648	0,64	0,32	1,27	0,95	0,13
Toledo	95 719	0,62	0,40	0,96	0,57	0,13
Badajoz	131 070	0,60	0,34	1,05	0,70	0,13
Cádiz	43 429	0,58	0,33	1,04	0,72	0,13
Zamora	61 356	0,58	0,34	1,02	0,69	0,14
Salamanca	69 199	0,56	0,32	0,94	0,62	0,13
Lugo	51 722	0,53	0,22	1,20	0,98	0,23
Ourense	36 351	0,50	0,29	0,94	0,66	0,12
Córdoba	67 796	0,49	0,17	0,90	0,73	0,13
Sevilla	66 230	0,47	0,17	0,91	0,74	0,15
Valladolid	37 442	0,47	0,32	0,82	0,50	0,10
Málaga	33 408	0,45	0,14	1,01	0,87	0,18
Jaén	58 081	0,43	0,23	1,10	0,86	0,12
Almería	31 150	0,35	0,14	0,67	0,53	0,12
Granada	42 707	0,34	0,15	0,71	0,56	0,10
Murcia	37 049	0,33	0,15	0,73	0,58	0,12
Melilla	38	0,33	0,30	0,35	0,05	0,01
Pontevedra	11 545	0,28	0,14	0,53	0,39	0,07
A Coruña	18 506	0,23	0,11	0,73	0,61	0,09
Santa Cruz de Tenerife	8016	0,22	0,05	0,37	0,32	0,08
Las Palmas	2060	0,05	0,02	0,10	0,08	0,02

Tabla 4.1. Estadística provincial de descargas eléctricas.

En definitiva, se aprecian grandes diferencias entre la actividad eléctrica en Península y Baleares frente a la que se registra en Canarias, siendo esta última muy inferior. En este sentido las provincias con mayor número medio anual de descargas por kilómetro cuadrado son las del cuadrante nordeste peninsular, encabezadas por Barcelona (3,05 descargas/km²). Por el contrario, son las islas Canarias seguidas de algunas provincias gallegas, la ciudad autónoma de Melilla y determinadas provincias del

sureste peninsular, las que menor actividad eléctrica presentan, destacando el valor mínimo de 0,05 de Las Palmas.

Además, las estaciones con la máxima actividad son diferentes, pues en la Península la estación más activa es la del verano, en contraposición al escaso número de descargas registradas en esa época en Canarias. En invierno, por el contrario, la actividad en la Península y Baleares es escasa, al revés de lo que ocurre en el entorno de las islas Canarias. Es en otoño cuando coexisten valores máximos relativos de actividad eléctrica en ambas zonas.

5. DÍAS DE TORMENTA



Fotografía propiedad de AEMET® realizada por José Antonio Quirantes Calvo.

Al igual que en el capítulo 3 relativo a las descargas eléctricas, se realizará un estudio estadístico del número de días de tormenta en las dos zonas geográficas consideradas, según la metodología que se explica en el anexo IV. Se analizará su distribución anual, estacional y mensual, incluyendo unas tablas con el número de días de tormenta para las capitales de provincia y ciudades autónomas. Así mismo se muestra la distribución espacial del número de días de tormenta mediante mapas (anuales, mensuales y estacionales) para la península ibérica y Baleares, así como para el archipiélago canario. Finalmente se incluye información sobre los días de gran actividad eléctrica.

5.1. Estadística descriptiva del número de días de tormenta

En este apartado se realizará un análisis estadístico descriptivo del número de días de tormenta (días en los que se ha registrado al menos una descarga) en la Península e islas Baleares (zonas terrestres y marítimas), así como la distribución por provincias y ciudades autónomas. La metodología empleada se muestra en el anexo IV.

5.1.1. Días de tormenta en la Península y Baleares

En la base de datos depurada de descargas del período 2007-2016, en la ventana geográfica de la Península e islas Baleares, hay un total de 2897 días de tormenta, por tanto, y en promedio anual, se llegan a registrar 289,7 días de tormenta al año. Puede parecer un número excesivo, pero hay que tener en cuenta varios factores que justifican esta cifra:

1. El área de estudio es muy amplia, más de 2 millones de kilómetros cuadrados (figura 3.1). En esta área tan extensa, raro es el día en el que no se registran rayos en algún punto de la zona de estudio. Hay que tener en cuenta que a medida que aumenta el área de estudio, mayor será el número de días de tormenta.
2. Existe una gran tipología de tormentas que afectan a la Península y mares próximos, de forma que en cualquier estación del año se pueden producir situaciones atmosféricas propicias para la generación de tormentas, no solo en los meses cálidos. Desde tormentas invernales típicamente atlánticas y que apenas afectan a zonas terrestres del interior, hasta las primaverales y veraniegas del interior de la Península que se generan en fase con el calentamiento diurno, o las otoñales en el área mediterránea.

Si se consideran solo zonas terrestres, el número de días de tormenta se reduce en un 14 %, hasta 2503 días de tormenta en 10 años, lo que da un promedio de 250,3 días de tormenta al año en zonas terrestres de la Península e islas Baleares.

En los diez años del estudio, el de mayor número de días de tormenta fue 2014, que coincide además con el de mayor número anual de descargas eléctricas (figura 5.1). En total, en 2014 hubo 305 días de tormenta en el área de estudio (zonas marítimas y terrestres) y 273 días de tormenta solo en zonas terrestres. El año de menor número de días de tormenta fue 2015, con 264 días de tormenta en zonas terrestres y marítimas, y 218 en zonas terrestres.

Por meses, tanto en el área de estudio (zonas terrestres y marítimas), como solo en las zonas terrestres (figura 5.2), los meses con mayor número de días de tormenta son agosto y septiembre, y los meses con menor número de días de tormenta son los meses fríos: diciembre y enero.

Considerando solo zonas terrestres de la Península y de Baleares, todos los días del mes de septiembre de 2014 hubo tormenta en algún punto del territorio, y en abril de 2007, septiembre de 2009 y mayo de 2011, todos los días del mes, excepto uno, hubo tormenta. El mes en el que menos días de tormenta hubo fue diciembre de 2015 (6 días).

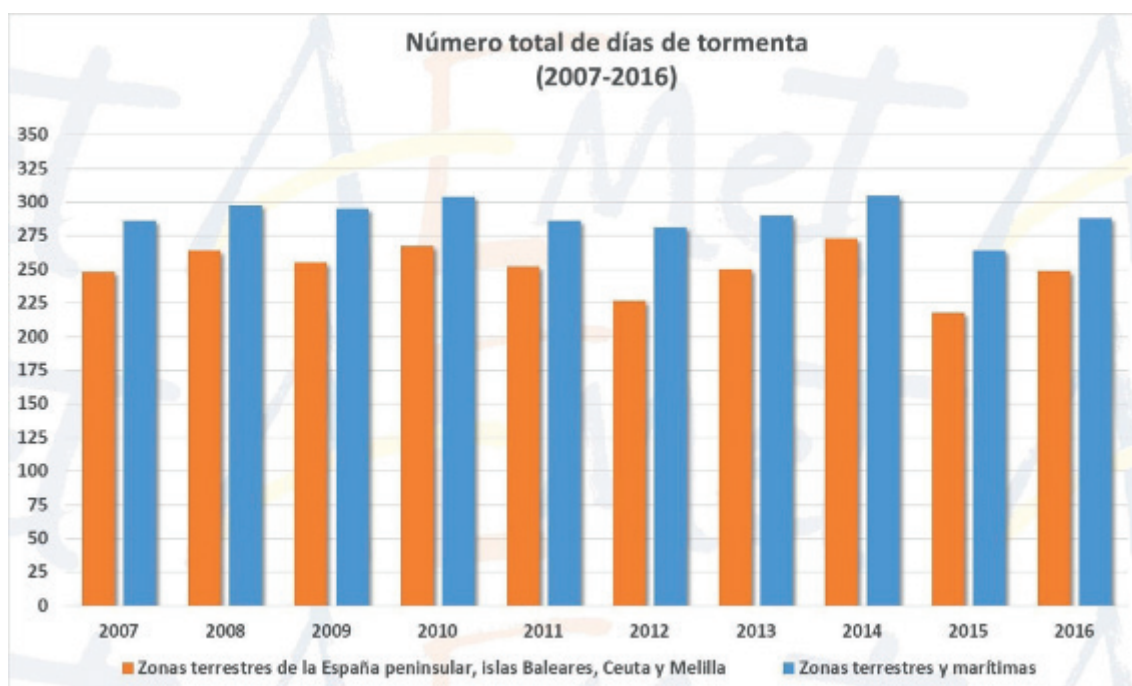


Figura 5.1. Número anual de días de tormenta en las zonas terrestres (columnas naranjas) y en las zonas terrestres y marítimas (columnas azules) de la España peninsular, islas Baleares, Ceuta y Melilla.

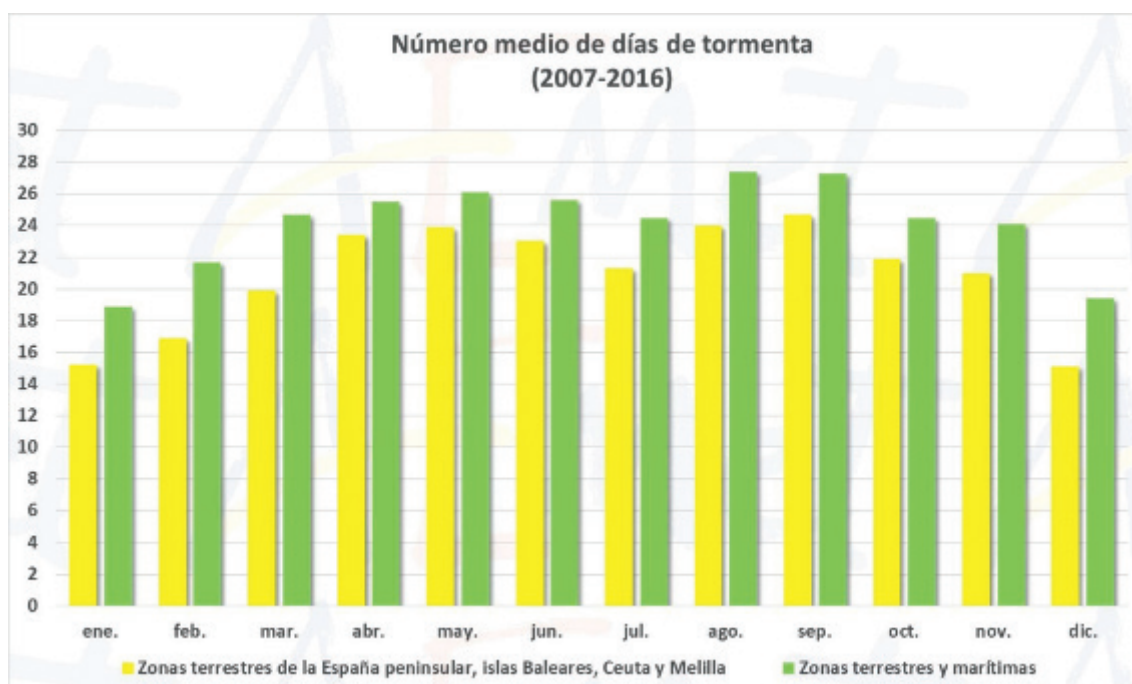


Figura 5.2. Número medio mensual de días de tormenta en las zonas terrestres (columnas amarillas) y en las zonas terrestres y marítimas (columnas verdes) de la España peninsular, islas Baleares, Ceuta y Melilla.

5.1.2. Días de tormenta en Canarias

En las islas Canarias hubo un total de 439 días de tormenta en los 10 años del estudio. Por tanto, y en promedio anual, se llegan a registrar 43,9 días de tormenta al año. Si se consideran solo zonas terrestres, el número de días de tormenta se reduce en casi dos tercios, hasta 163 días de tormenta en 10 años, lo que proporciona un promedio de 16,3 días de tormenta al año en zonas terrestres de las islas Canarias.

En los diez años del estudio, el de mayor número de días de tormenta en Canarias fue 2010, con 80 días, aunque si se consideran solo zonas terrestres, fue 2015, con 22 días (figura 5.3).

Por meses, tanto en toda el área de estudio (zonas terrestres y marítimas), como solo en las zonas terrestres, los meses con mayor número de días de tormenta en las islas Canarias son octubre y noviembre, y los meses con menor número de días de tormenta son los meses cálidos: junio y julio (figura 5.4).

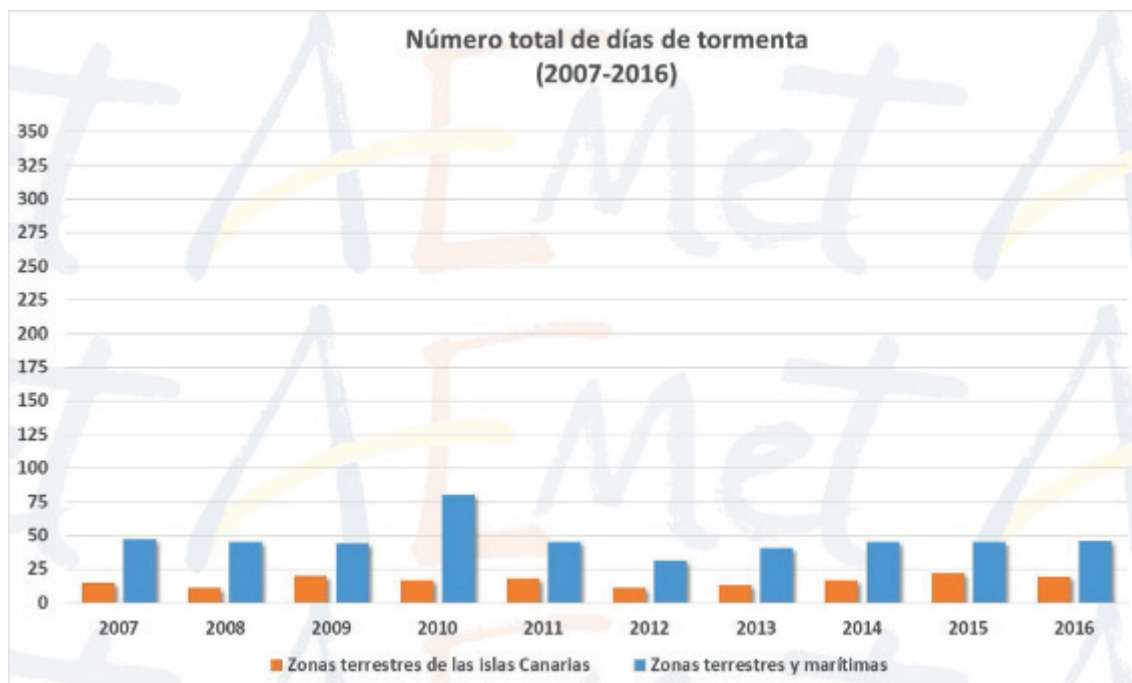


Figura 5.3. Número anual de días de tormenta en las zonas terrestres (columnas naranjas) y en las zonas terrestres y marítimas (columnas azules) de las islas Canarias.

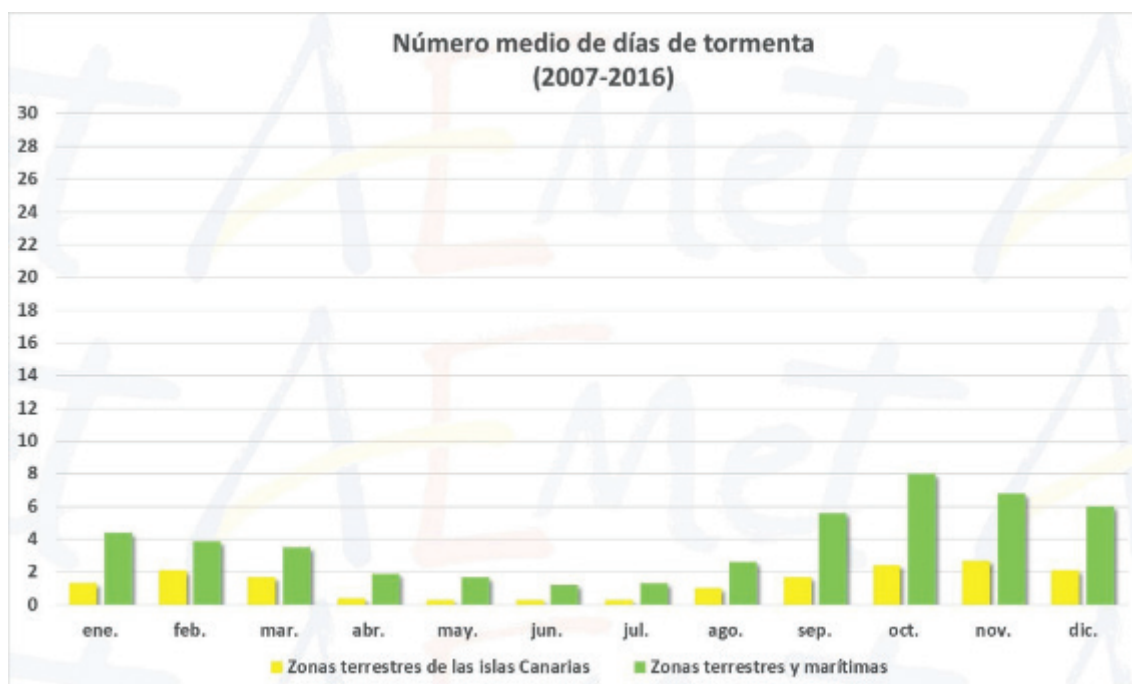


Figura 5.4. Número medio mensual de días de tormenta en las zonas terrestres (columnas amarillas) y en las zonas terrestres y marítimas (columnas verdes) de las islas Canarias.

5.1.3. Días de tormenta en capitales de provincia y ciudades autónomas

Por último es interesante disponer de una referencia, en el sentido comentado, de número medio de días de tormenta al año y por meses en las capitales de provincia y las ciudades autónomas. Esta referencia puede ser importante para diversos fines, climatológicos y en la predicción del tiempo.

Se muestra una tabla ordenada por orden alfabético según el nombre de la ciudad (tabla 5.1). El código de colores empleado es el siguiente: en color azul se sombrea el mes con menor número de días de tormenta y en color rojo se sombrea el mes con mayor número de días de tormenta en cada capital. Respecto al valor anual, se somborean en colores cálidos las capitales con mayor número de días de tormenta y en colores fríos las capitales de provincia con menor número de días de tormenta.

Estadística de días de tormenta en capitales de provincia (periodo 2007-2016)													
Capital	ene.	feb.	mar.	abr.	may.	jun.	jul.	ago.	sep.	oct.	nov.	dic.	anual
A Coruña	1,4	1,4	0,6	0,8	0,8	0,4	0,2	0,6	0,4	0,4	1,8	0,7	9,5
Albacete	0,1	0,1	0,3	1,6	2,4	2,6	1,1	1,7	2,2	1,1	0,6	0,1	13,9
Alicante/Alacant	0,2	0,2	0,1	1,4	1,4	1,0	0,3	1,0	2,6	1,6	0,9	0,4	11,1
Almería	0,1	0,1	0,6	0,4	0,5	0,7	0,1	0,4	1,2	0,9	0,7	0,6	6,3
Ávila	0,0	0,1	0,4	1,5	2,6	2,0	2,1	2,0	2,3	0,7	0,1	0,0	13,8
Badajoz	0,1	0,5	0,5	1,9	1,2	0,8	0,3	0,5	1,6	0,8	0,3	0,3	8,8
Barcelona	0,4	0,3	0,8	2,1	2,3	2,3	2,9	3,0	2,9	2,8	1,4	0,4	21,6
Bilbao	1,4	1,3	1,1	2,1	2,1	2,9	2,0	1,6	1,6	1,0	1,1	0,8	19,0
Burgos	0,1	0,4	0,3	1,6	2,4	3,0	1,9	1,7	1,4	0,6	0,2	0,0	13,6
Cáceres	0,0	0,3	0,7	2,1	1,1	1,1	0,6	1,1	2,1	0,5	0,2	0,4	10,2
Cádiz	1,0	1,2	1,1	1,4	0,5	0,2	0,0	0,6	1,4	1,2	2,3	1,5	12,4
Castellón de la Plana/Castelló de la Plana	0,2	0,1	0,3	1,5	2,4	2,9	1,6	2,7	3,1	1,5	0,9	0,5	17,7
Ceuta	1,0	1,3	1,5	1,1	0,3	0,5	0,2	0,4	1,1	1,6	1,5	2,0	12,5
Ciudad Real	0,0	0,2	0,3	1,9	2,1	2,1	1,5	1,4	2,6	0,9	0,4	0,4	13,8
Córdoba	0,2	0,6	0,6	1,6	1,6	0,8	0,3	0,5	1,2	0,9	0,5	0,7	9,5
Cuenca	0,1	0,0	0,2	2,5	2,6	3,0	2,1	2,1	2,6	0,7	0,1	0,1	16,1
Donostia/San Sebastián	1,2	1,3	2,0	1,4	2,9	3,5	2,9	2,3	1,7	1,4	1,7	1,8	24,1
Girona	0,6	0,8	1,2	2,2	3,4	3,4	3,5	3,9	3,4	2,2	1,5	0,2	26,3
Granada	0,1	0,2	0,4	0,6	1,4	0,9	0,4	0,6	1,6	1,2	0,8	0,5	8,7
Guadalajara	0,2	0,5	0,5	2,4	3,9	2,9	2,0	2,1	1,3	1,5	0,1	0,1	17,5
Huelva	0,8	0,7	1,2	1,3	1,4	0,0	0,2	0,5	0,7	1,0	1,4	1,7	10,9
Huesca	0,1	0,1	0,8	2,9	3,8	3,0	3,9	3,9	3,3	1,9	0,5	0,1	26,3
Jaén	0,3	0,4	0,6	1,7	1,1	1,4	0,4	0,6	1,8	0,7	0,4	0,5	9,9
Las Palmas de Gran Canaria	0,1	0,3	0,5	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,5	0,3	2,5
León	0,1	0,1	0,1	1,8	2,7	2,4	1,9	1,8	1,4	0,5	0,2	0,1	13,1
Lleida	0,2	0,3	0,3	1,8	2,0	3,5	3,3	3,0	3,0	1,9	0,6	0,0	19,9
Logroño	0,1	0,2	0,6	1,9	2,5	3,0	3,6	2,2	1,8	0,4	0,3	0,0	16,6
Lugo	0,4	0,1	0,1	0,9	1,5	1,1	0,7	0,9	0,9	0,3	0,3	0,2	7,4
Madrid	0,0	0,4	0,2	1,6	2,9	2,0	1,6	1,5	1,7	0,9	0,3	0,0	13,1
Málaga	0,6	1,0	0,6	0,9	0,7	0,4	0,3	0,3	1,5	1,5	1,0	0,9	9,7
Melilla	1,6	0,6	0,6	0,4	0,3	0,4	0,4	0,3	1,0	1,2	1,5	0,9	9,2
Murcia	0,1	0,1	0,7	1,2	1,5	1,1	0,2	0,6	1,4	1,2	0,5	0,2	8,8
Ourense	0,4	0,4	0,2	2,2	1,4	1,1	1,0	0,7	1,0	0,4	0,4	0,2	9,4
Oviedo	0,8	0,9	1,0	2,0	2,3	2,3	1,0	2,1	1,3	0,3	1,2	0,5	15,9
Palencia	0,1	0,4	0,3	1,6	2,6	2,9	2,0	1,1	1,4	0,6	0,1	0,0	13,1
Palma	0,9	1,1	0,8	0,6	1,9	1,0	0,2	1,7	3,9	2,5	2,9	1,0	18,5
Pamplona/Iruña	0,4	0,5	1,3	2,5	3,1	3,6	3,7	3,3	2,6	1,6	0,3	0,1	23,0
Pontevedra	1,8	1,0	0,7	1,1	0,9	0,8	0,5	0,5	1,0	1,7	0,7	0,7	11,2
Salamanca	0,0	0,1	0,4	1,6	2,5	1,6	1,8	1,2	1,9	0,5	0,2	0,4	12,2
Santa Cruz de Tenerife	0,3	0,8	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0	0,2	0,4	0,4	3,1
Santander	1,8	1,7	0,9	0,6	2,0	2,0	1,3	2,1	0,8	0,5	2,0	1,2	16,9
Segovia	0,0	0,0	0,3	1,7	3,0	2,8	2,9	2,1	2,1	0,8	0,1	0,1	15,9
Sevilla	0,3	0,6	0,9	1,6	1,0	0,2	0,3	0,5	1,5	1,4	1,2	1,6	11,1
Soria	0,0	0,4	0,4	1,8	3,8	3,7	3,6	3,0	2,3	1,2	0,1	0,0	20,3
Tarragona	0,4	0,3	0,5	1,5	1,9	2,6	2,6	2,9	3,3	2,6	1,4	0,5	20,5
Teruel	0,0	0,0	0,4	1,6	3,0	4,3	3,9	3,8	2,9	0,8	0,0	0,1	20,8
Toledo	0,0	0,2	0,5	1,8	2,4	2,6	1,3	1,4	1,8	1,2	0,2	0,2	13,6
Valencia	0,3	0,1	0,6	1,6	2,4	1,8	1,8	1,7	2,8	1,9	0,8	0,4	16,2
Valladolid	0,0	0,1	0,5	1,4	2,1	2,5	1,8	1,6	2,0	0,4	0,1	0,0	12,5
Vitoria-Gasteiz	0,2	0,4	1,0	2,5	2,9	3,2	2,6	1,8	1,7	1,0	0,3	0,2	17,8
Zamora	0,1	0,1	0,6	1,2	2,0	1,6	1,2	1,3	1,8	0,5	0,3	0,0	10,7
Zaragoza	0,2	0,1	0,3	2,0	2,8	3,6	3,1	3,6	2,1	1,4	0,3	0,0	19,5

Tabla 5.1. Estadística de días de tormenta en las capitales de provincia y ciudades autónomas (ordenación alfabética).

Los valores medios anuales de días de tormenta se representan con el mismo código de colores en un mapa provincial (figura 5.5), apareciendo plotado el valor de la capital de provincia.

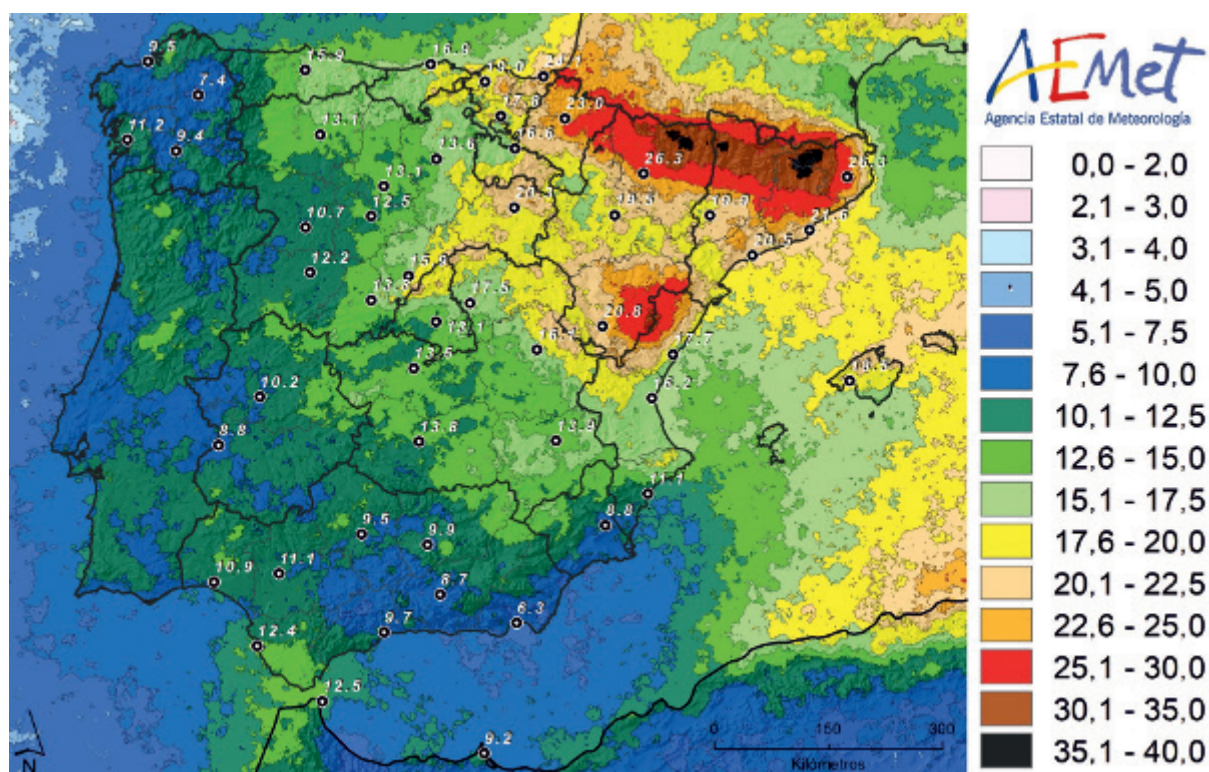


Figura 5.5. Número medio anual de días de tormenta en la Península y Baleares.

5.2. Mapas de días de tormenta

En este apartado, y de acuerdo a la metodología descrita en el anexo IV, se presentan los mapas medios de distribución espacial de días de tormenta (anuales, estacionales y mensuales) en las dos áreas geográficas mencionadas (Península-Baleares y Canarias). También en la parte final se mostrarán y comentarán las conclusiones básicas sobre las zonas más significativas en cuanto a distribución espacial de días de tormenta, mediante la presentación de mapas locales que no son sino ampliaciones de los mapas generales previamente presentados.

Para que los mapas de días de tormenta sean más explicativos y claros, se van a emplear dos escalas gráficas diferentes, una para el mapa anual, y otra común para los mapas mensuales y estacionales. Esto se hace por varios motivos: por la sensiblemente inferior cantidad de días de tormenta en Canarias respecto a la de Península-Baleares, por el elevado valor relativo del máximo en Pirineos (figura 5.6), por el destacable número de intervalos que aparecen, por el valor del máximo estacional de días de tormenta que es del orden de la mitad del máximo anual, etc.

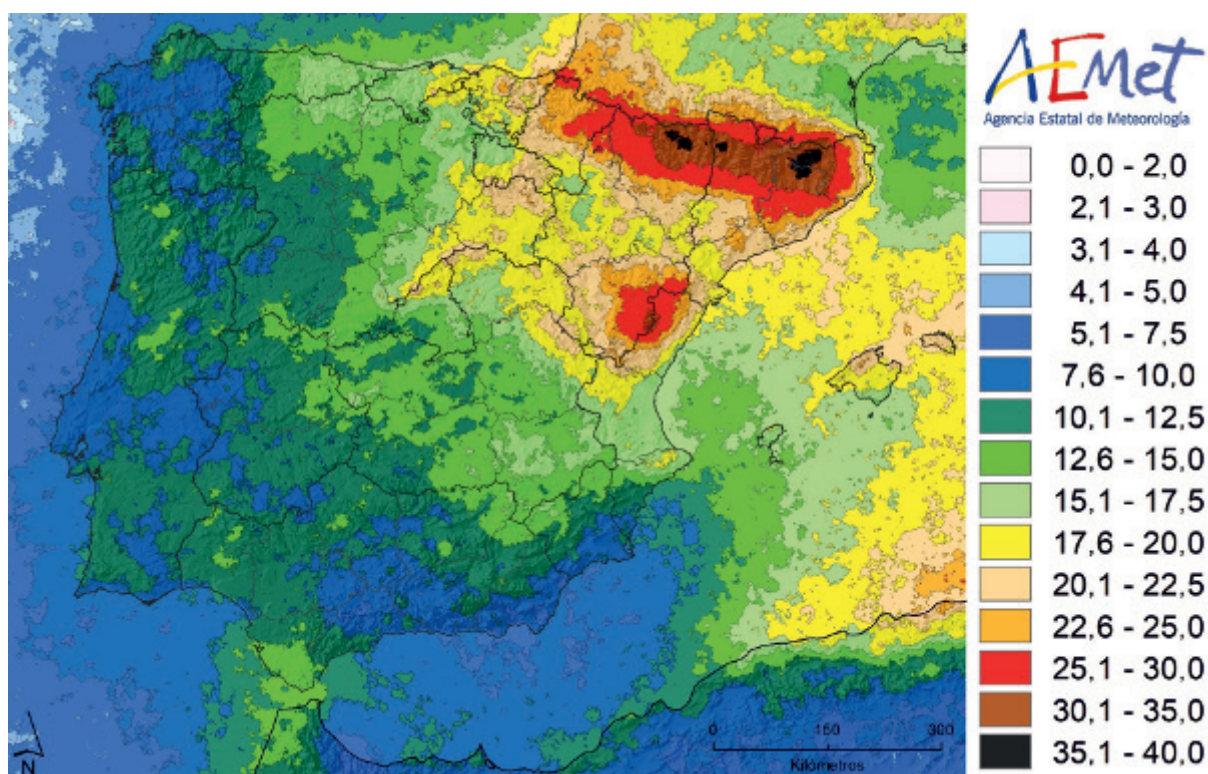


Figura 5.6. Número medio anual de días de tormenta en la Península e islas Baleares.

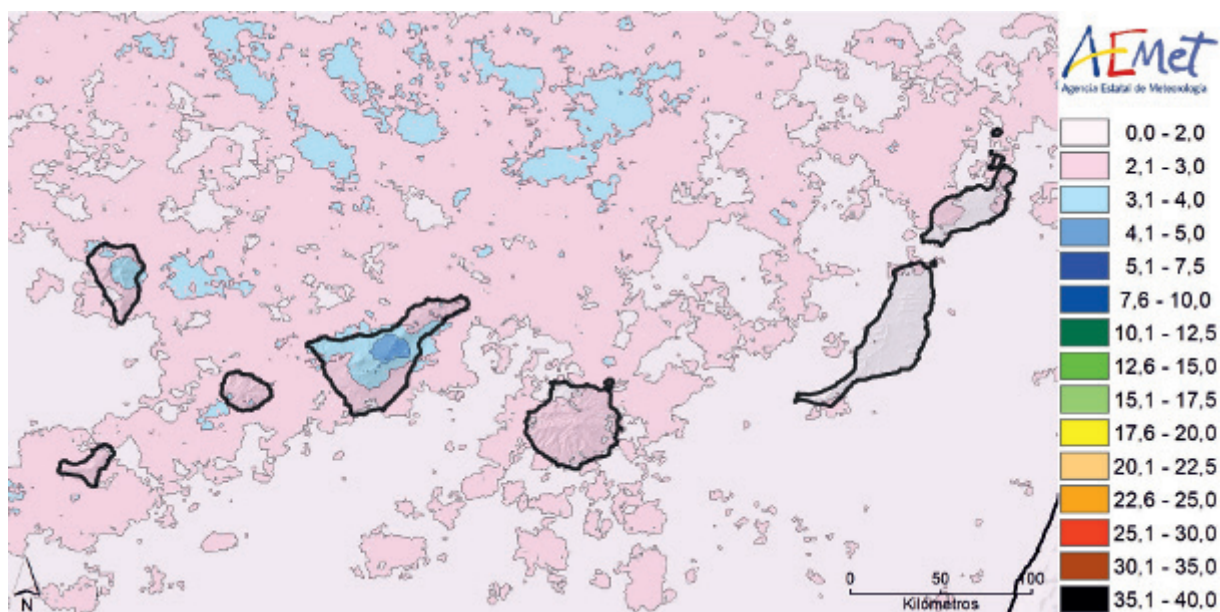


Figura 5.7. Número medio anual de días de tormenta en las islas Canarias.

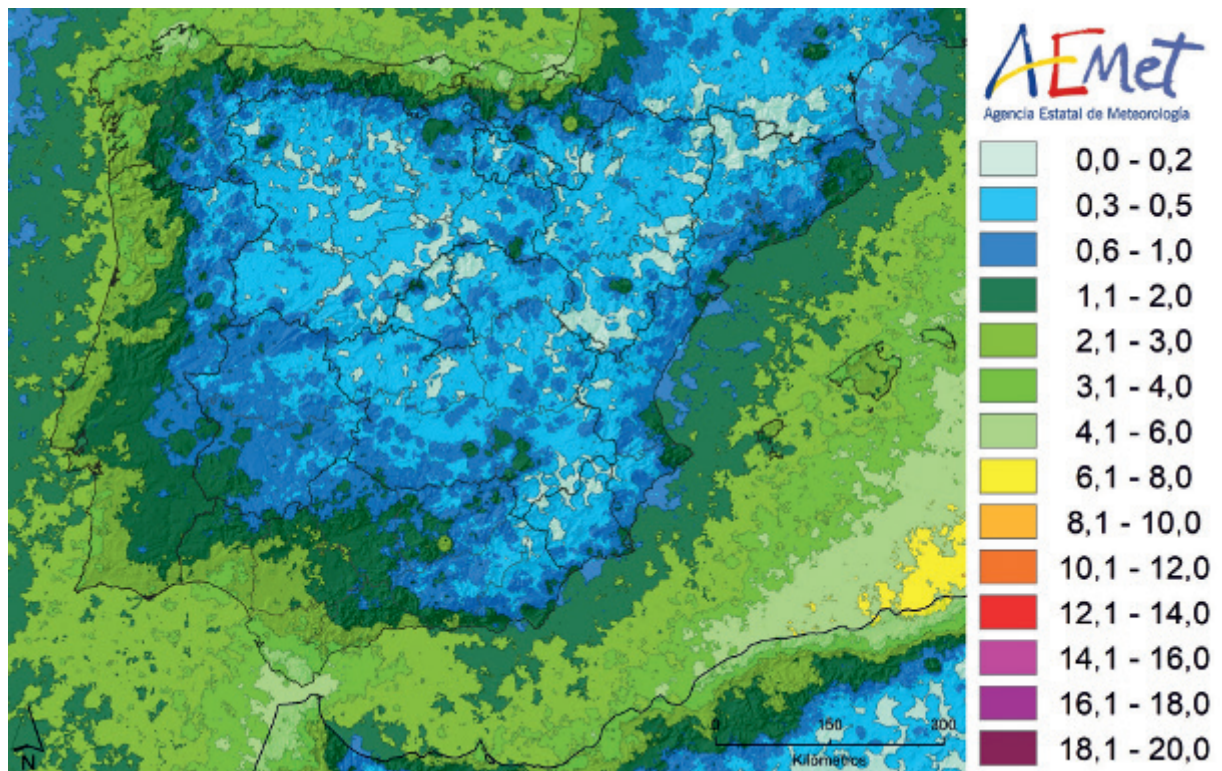


Figura 5.8. Número medio estacional de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Invierno.

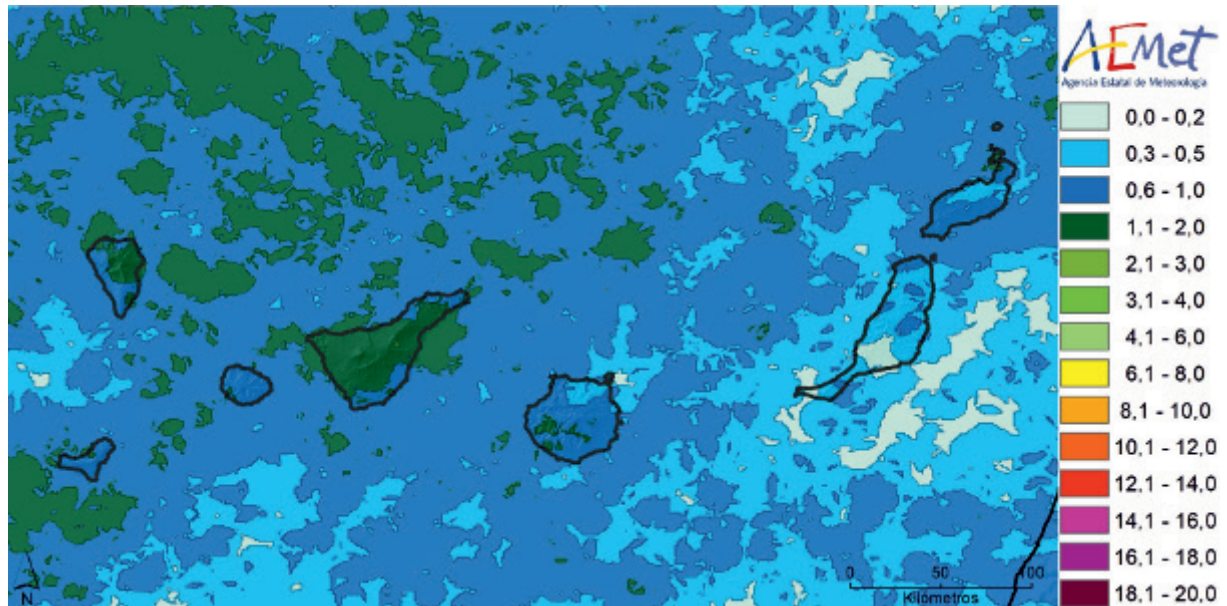


Figura 5.9. Número medio estacional de días de tormenta en las islas Canarias. Invierno.

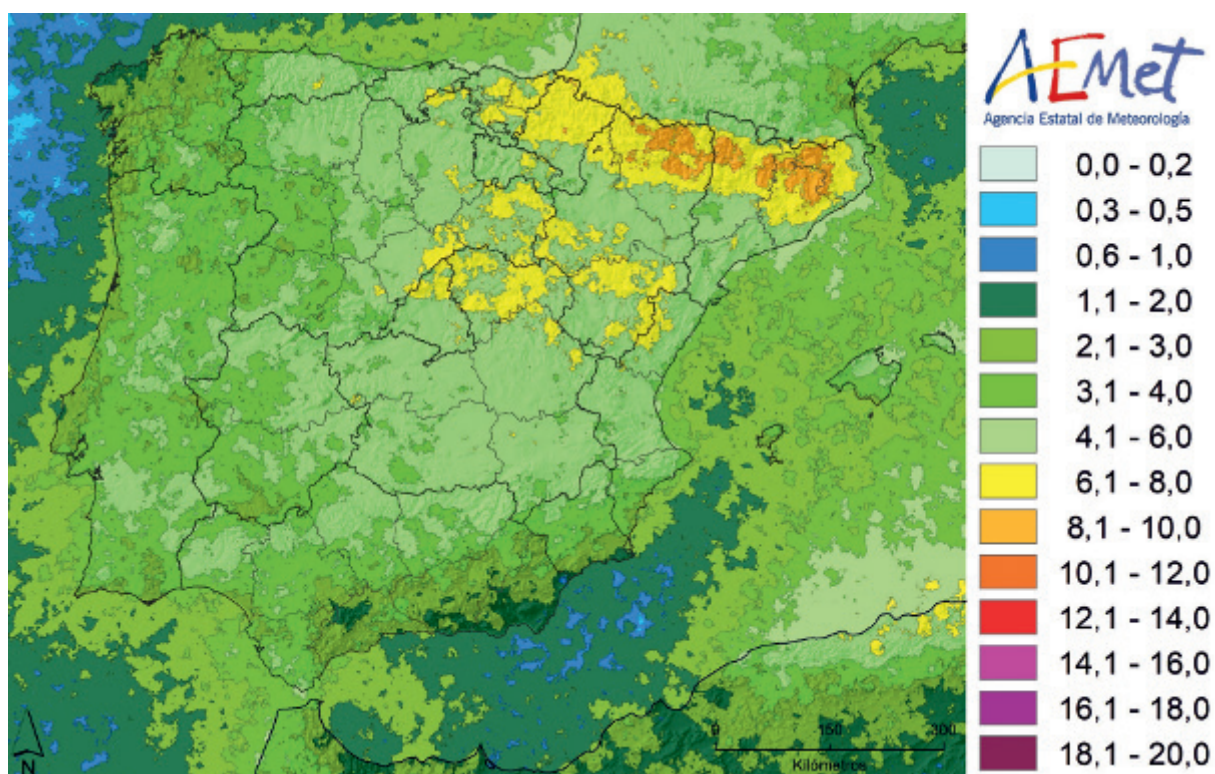


Figura 5.10. Número medio estacional de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Primavera.

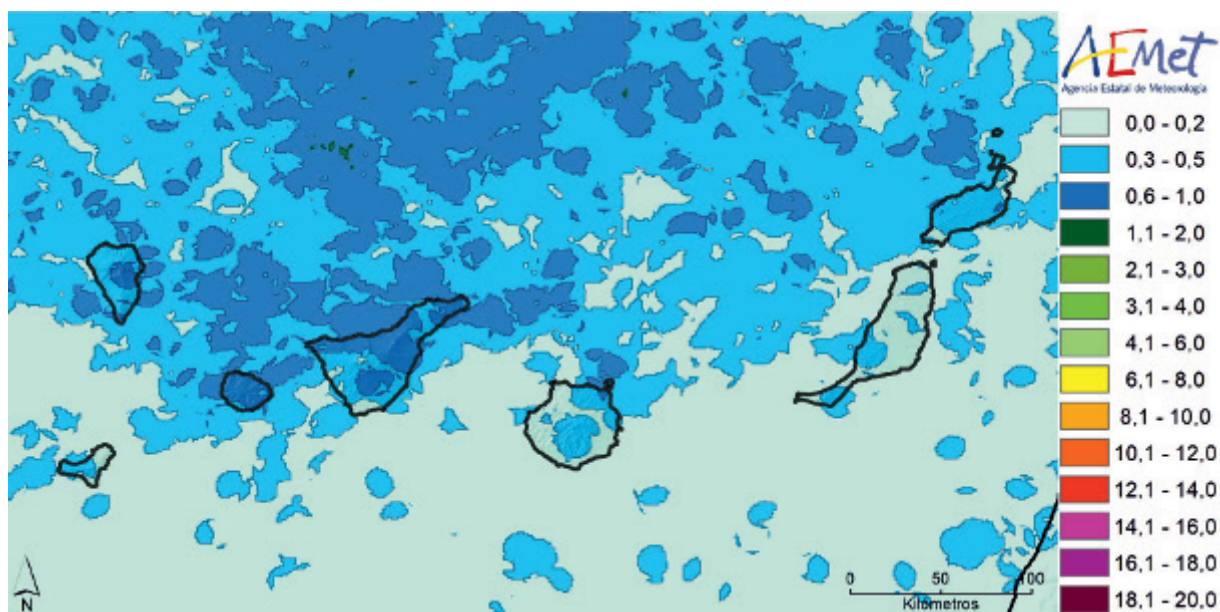


Figura 5.11. Número medio estacional de días de tormenta en las islas Canarias. Primavera.

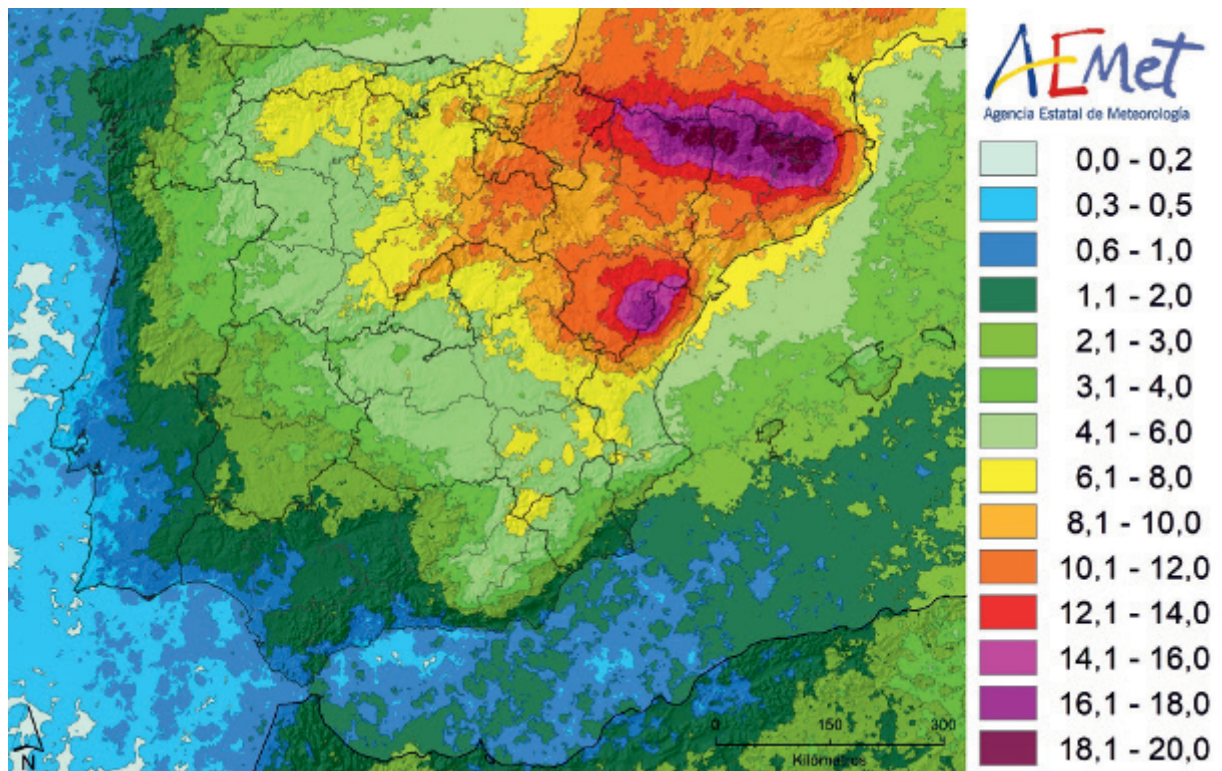


Figura 5.12. Número medio estacional de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Verano.

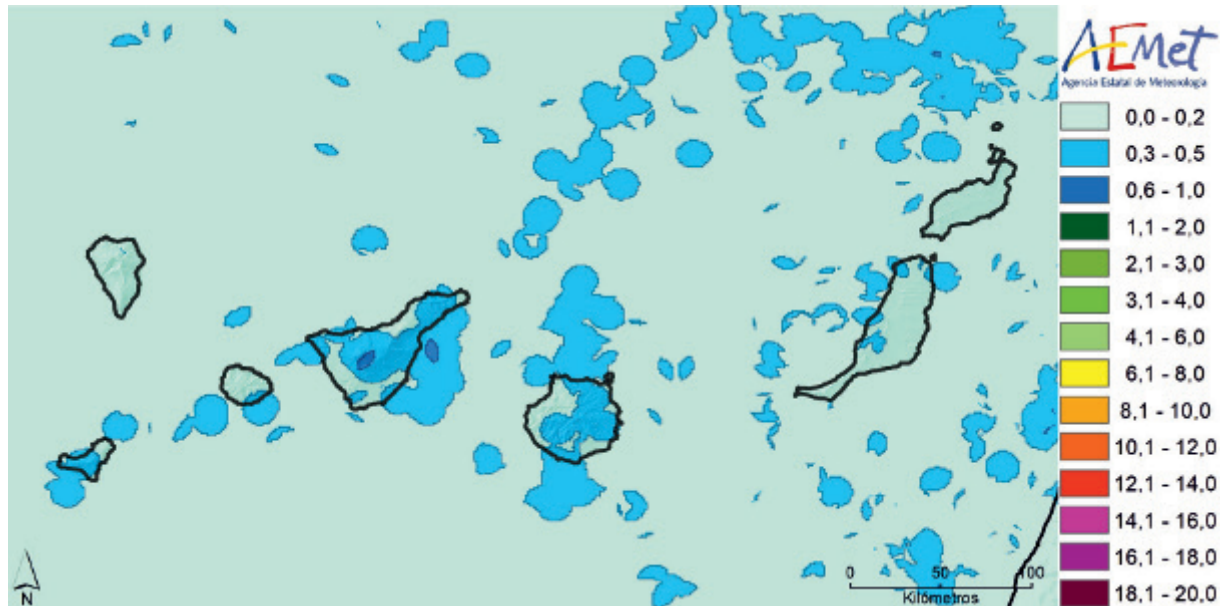


Figura 5.13. Número medio estacional de días de tormenta en las islas Canarias. Verano.

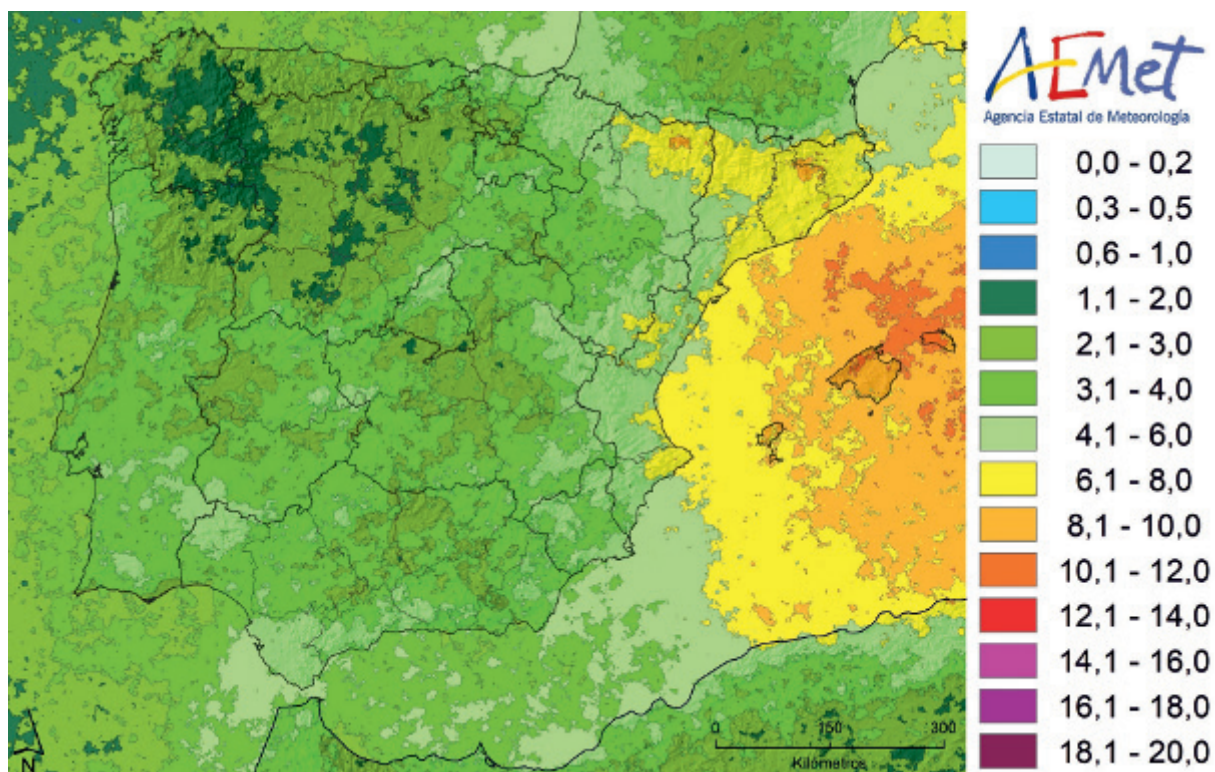


Figura 5.14. Número medio estacional de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Otoño.

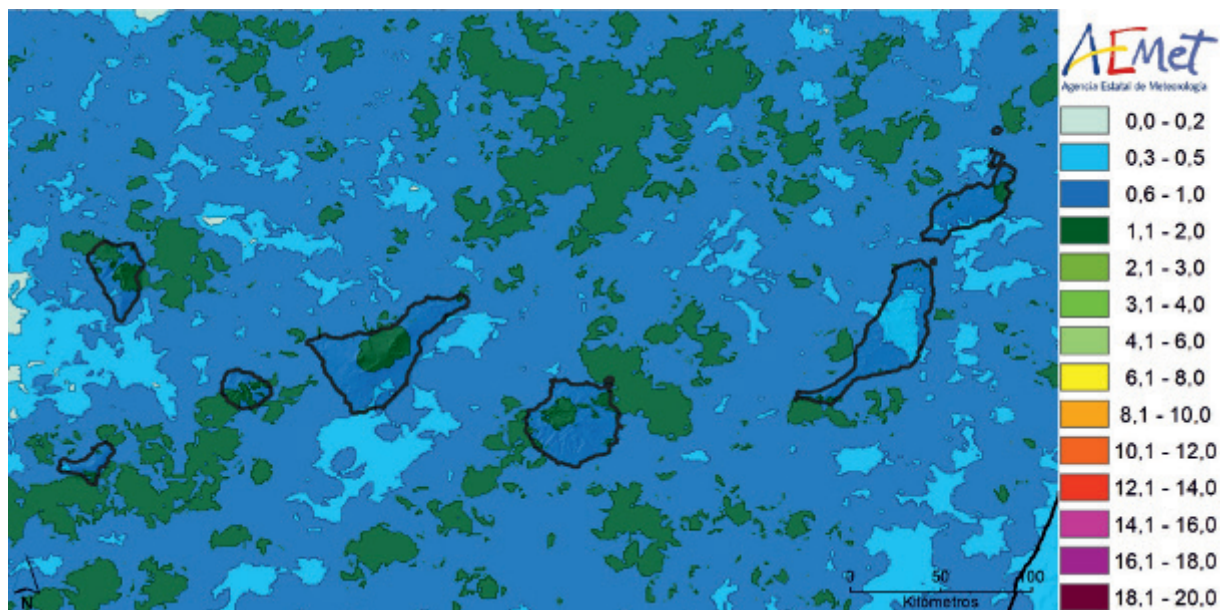


Figura 5.15. Número medio estacional de días de tormenta en las islas Canarias. Otoño.

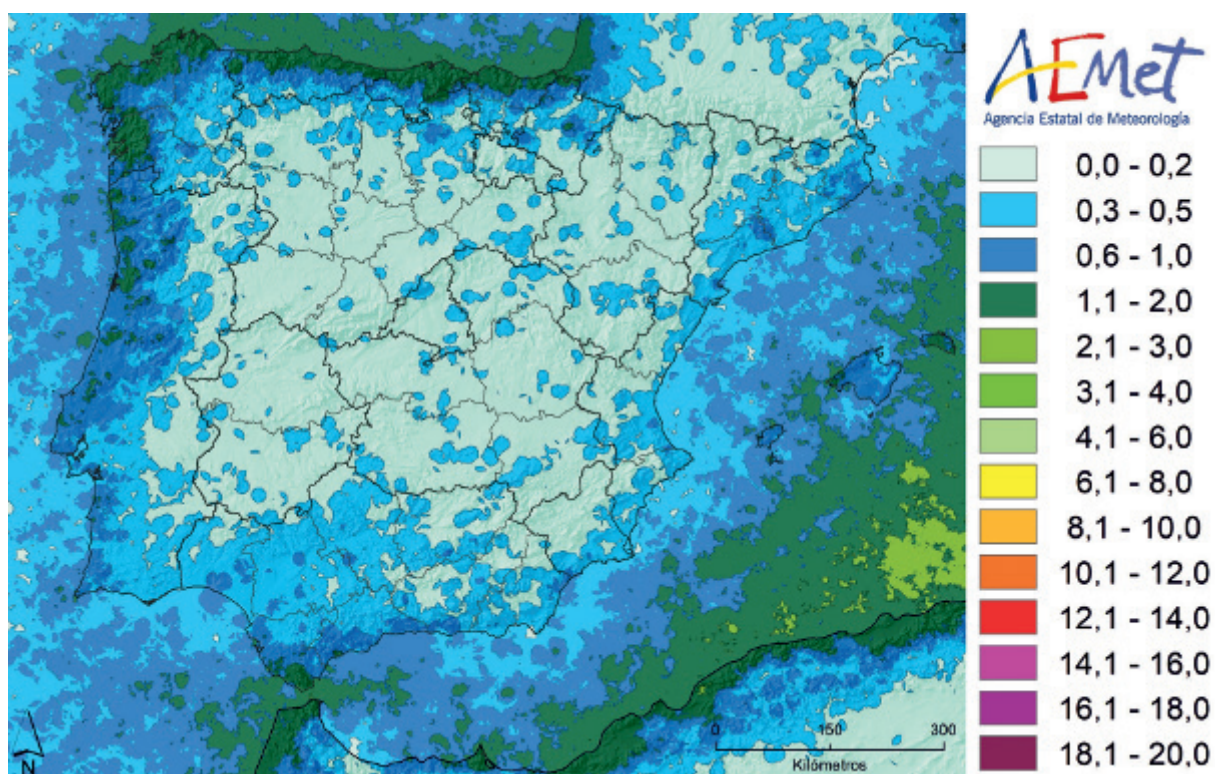


Figura 5.16. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Enero.

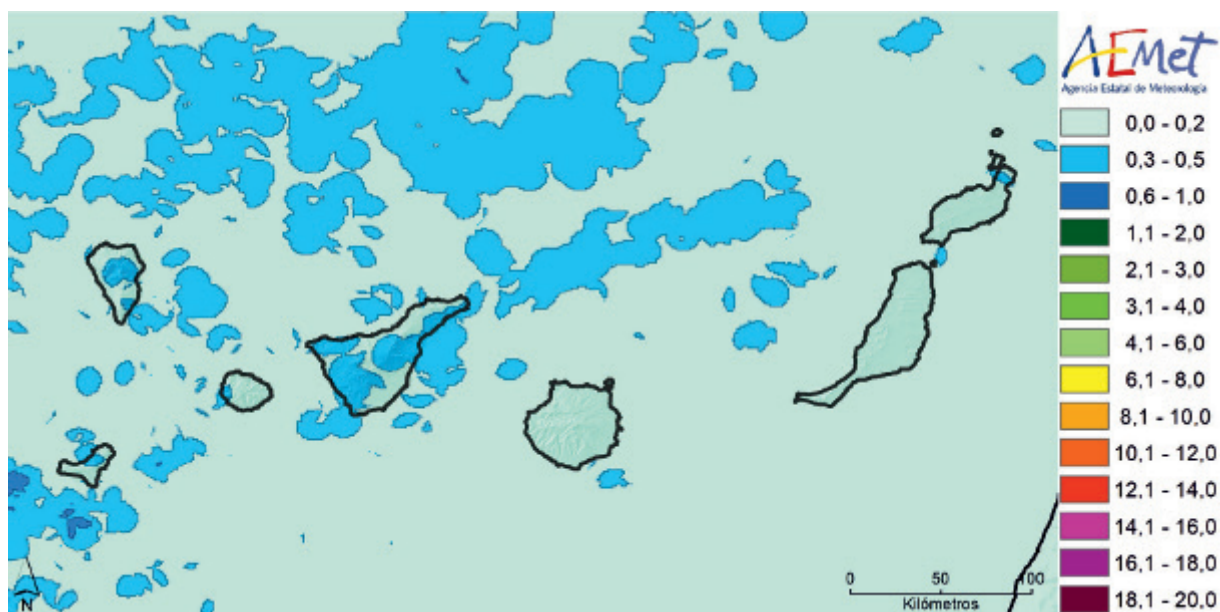


Figura 5.17. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Enero.

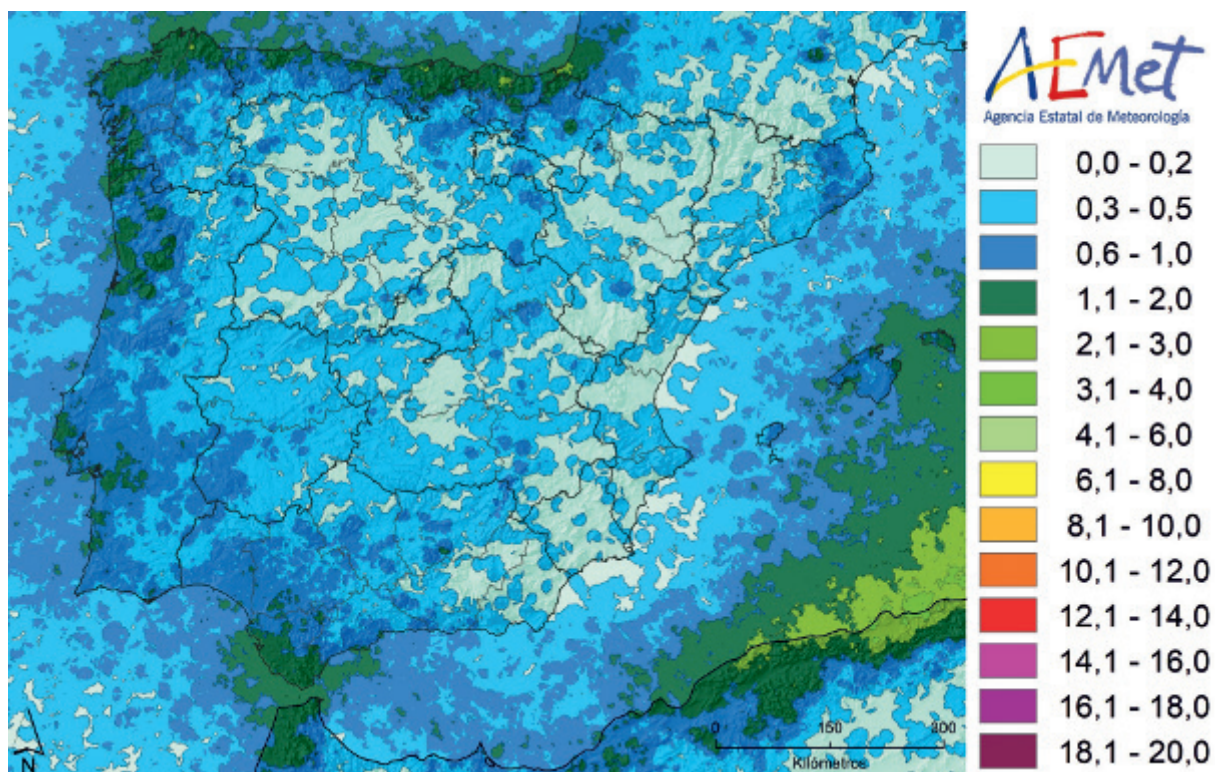


Figura 5.18. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Febrero.

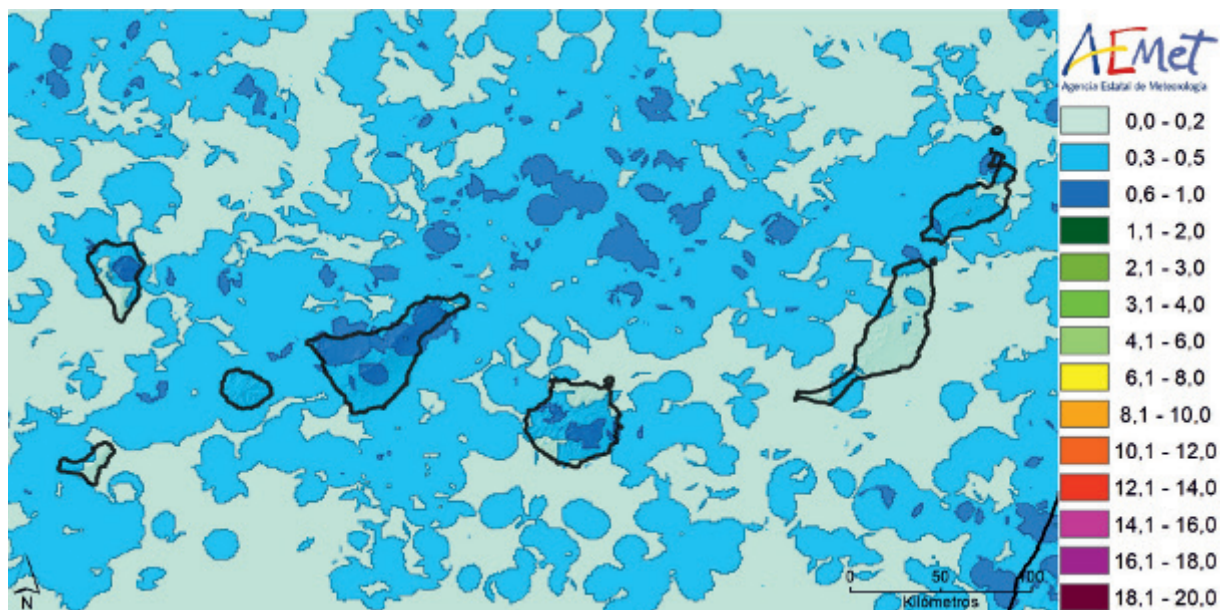


Figura 5.19. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Febrero.

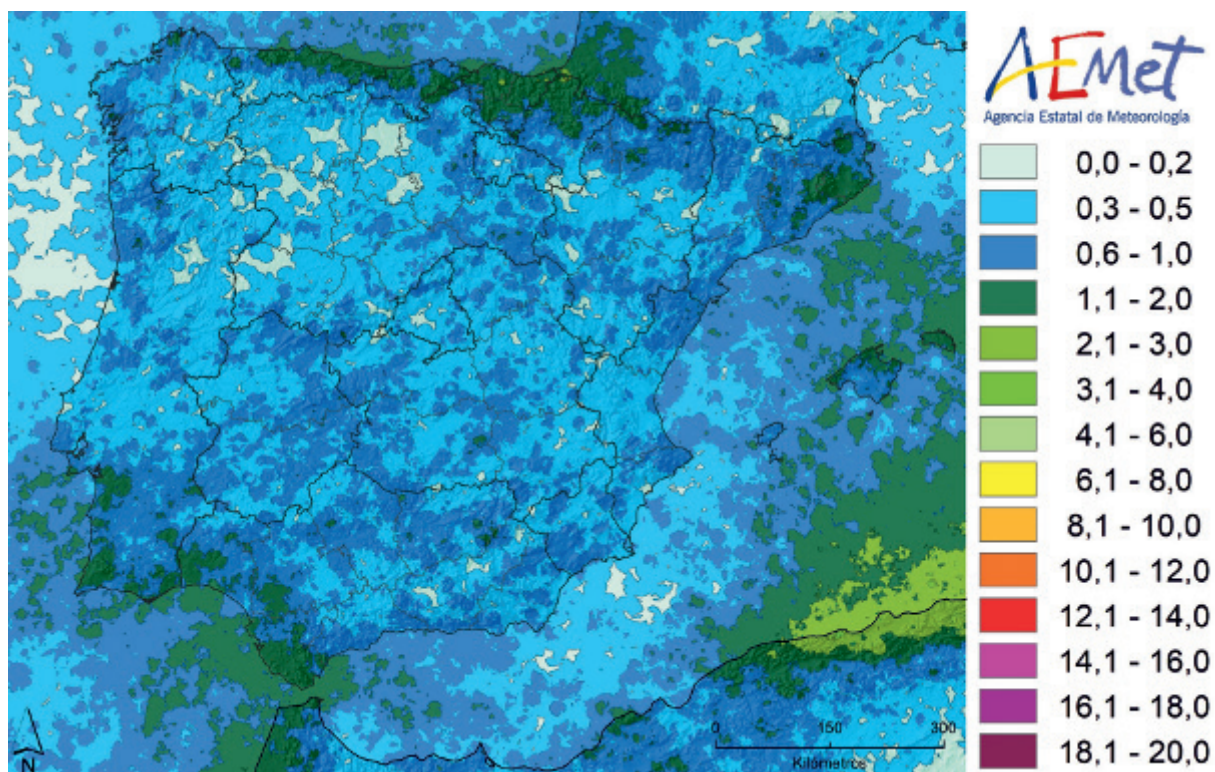


Figura 5.20. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Marzo.

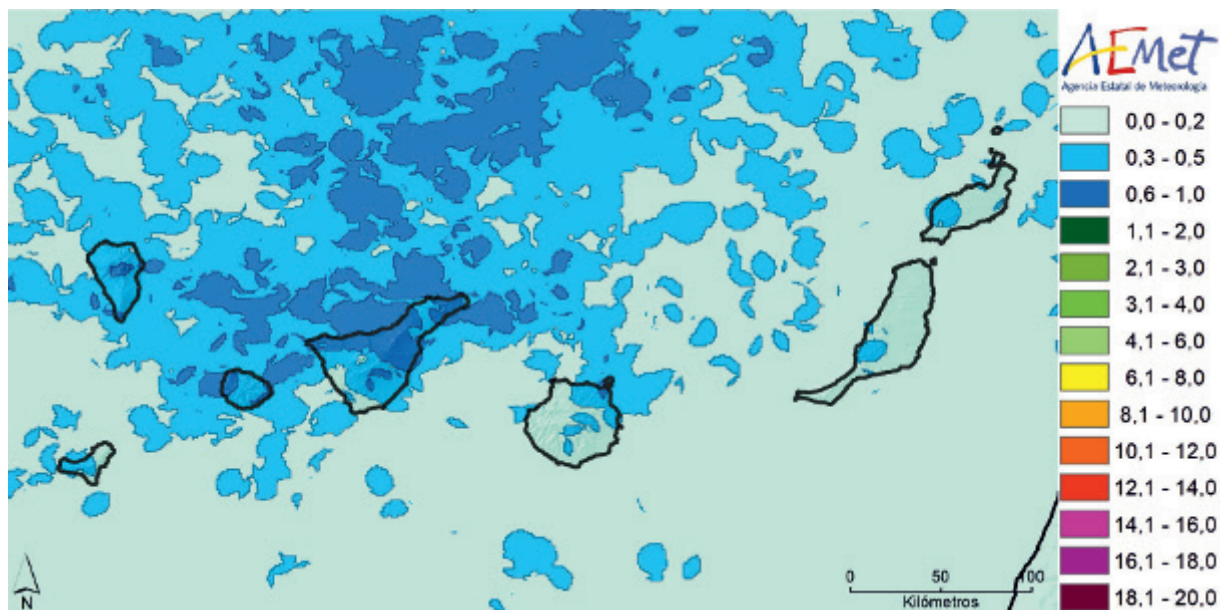


Figura 5.21. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Marzo.

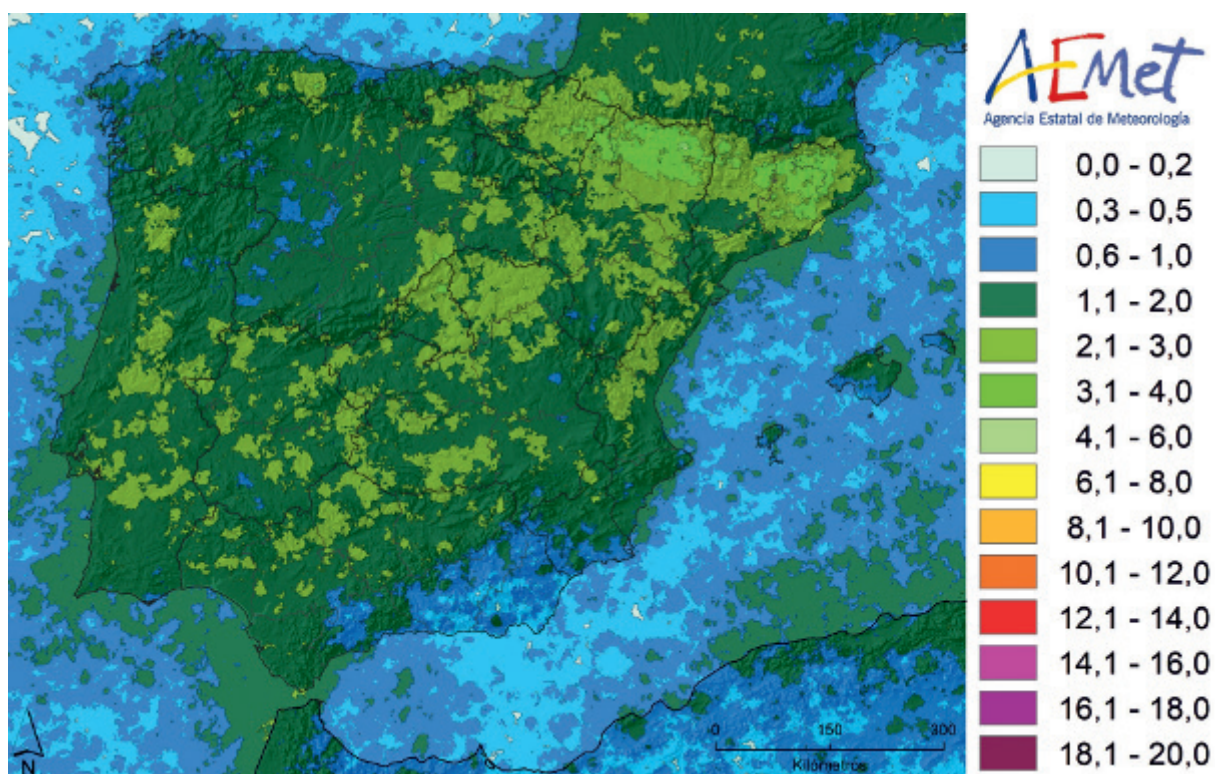


Figura 5.22. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Abril.

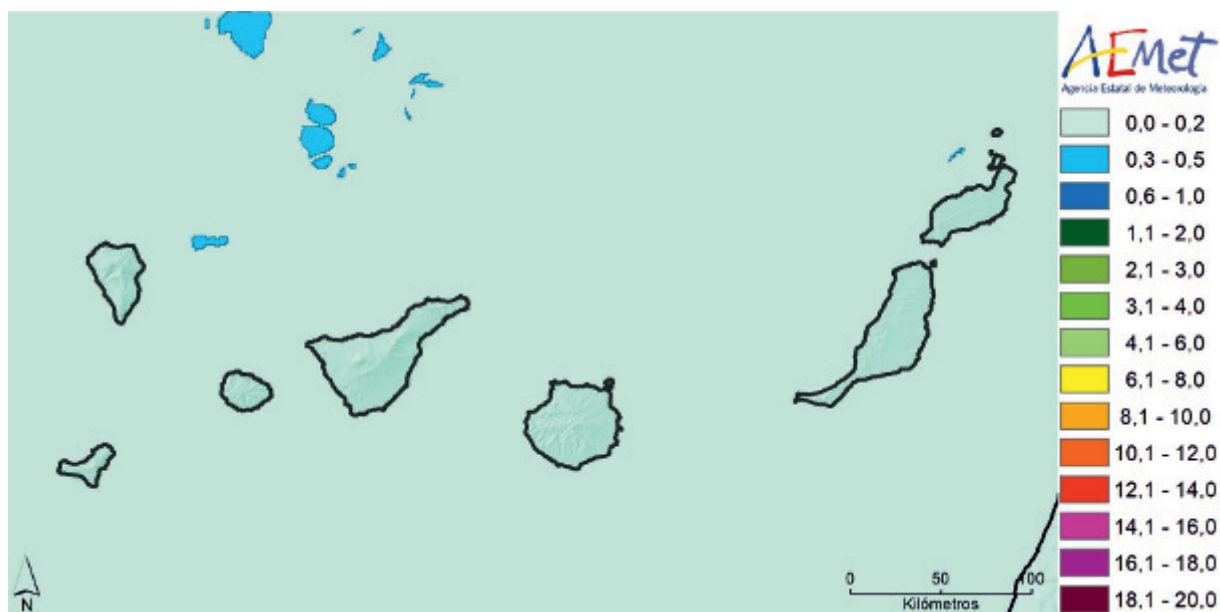


Figura 5.23. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Abril.

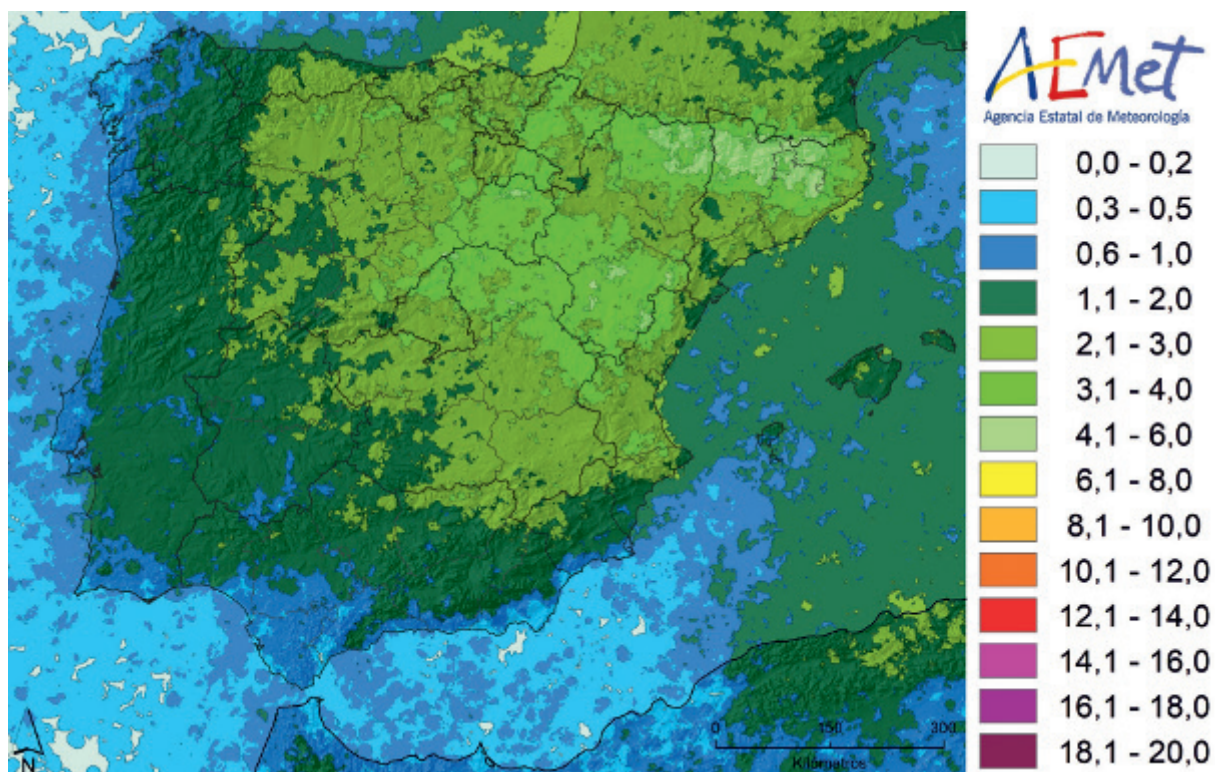


Figura 5.24. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Mayo.

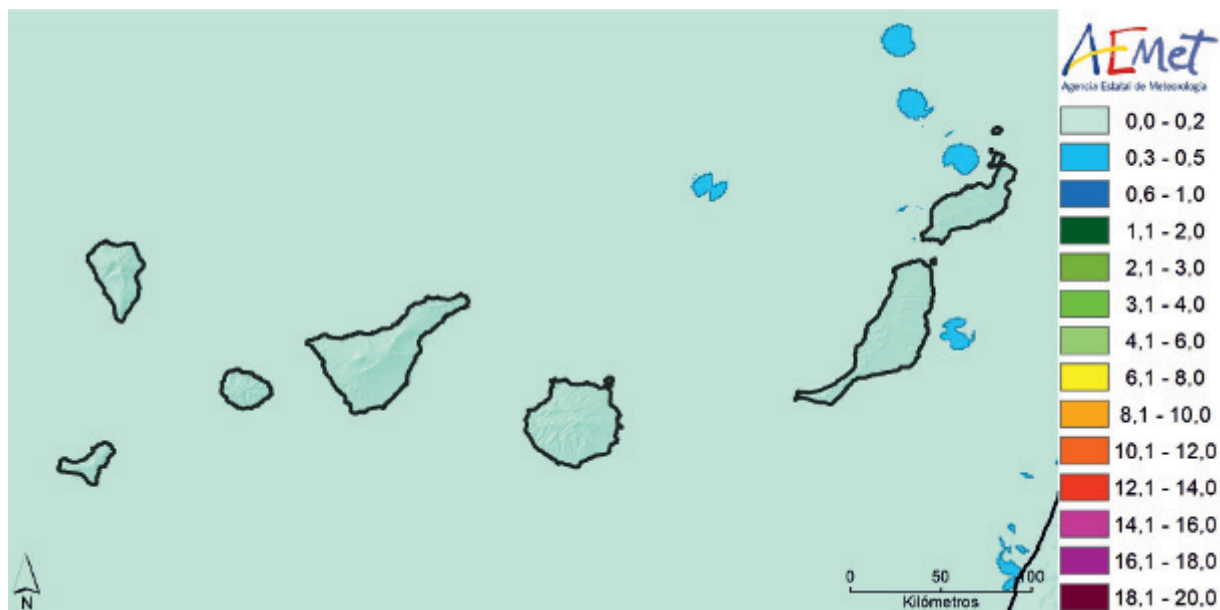


Figura 5.25. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Mayo.

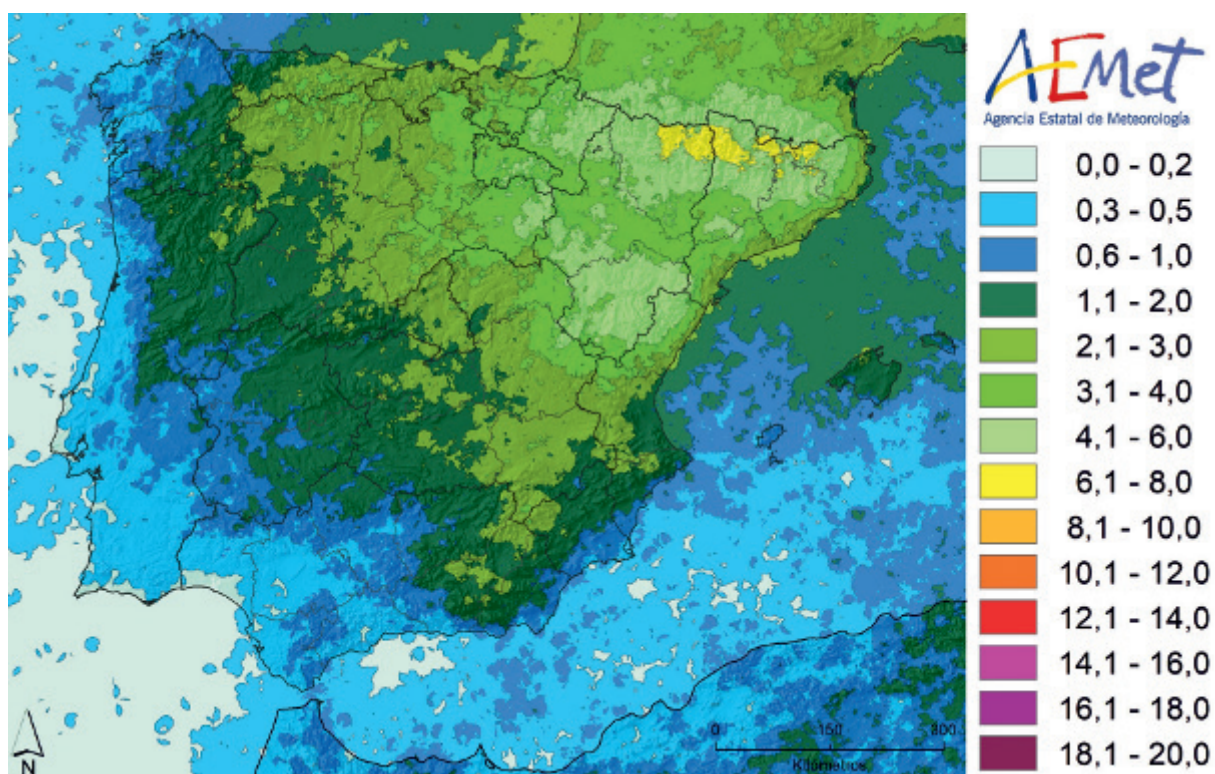


Figura 5.26. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Junio.

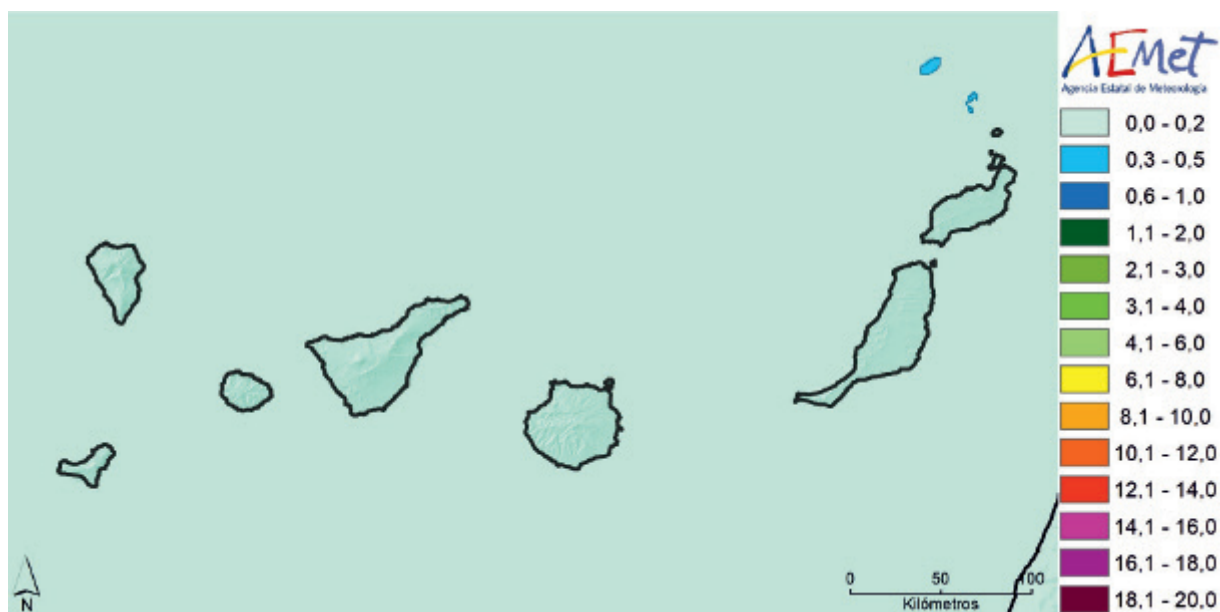


Figura 5.27. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Junio.

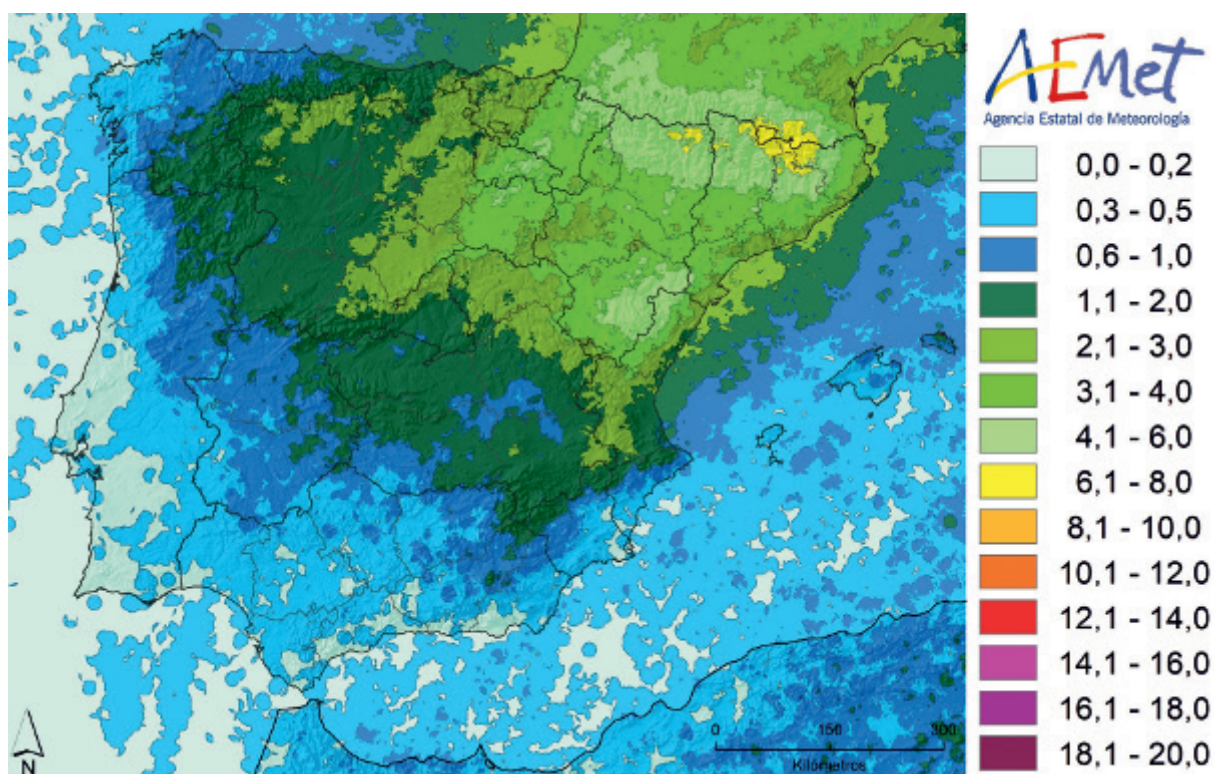


Figura 5.28. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Julio.

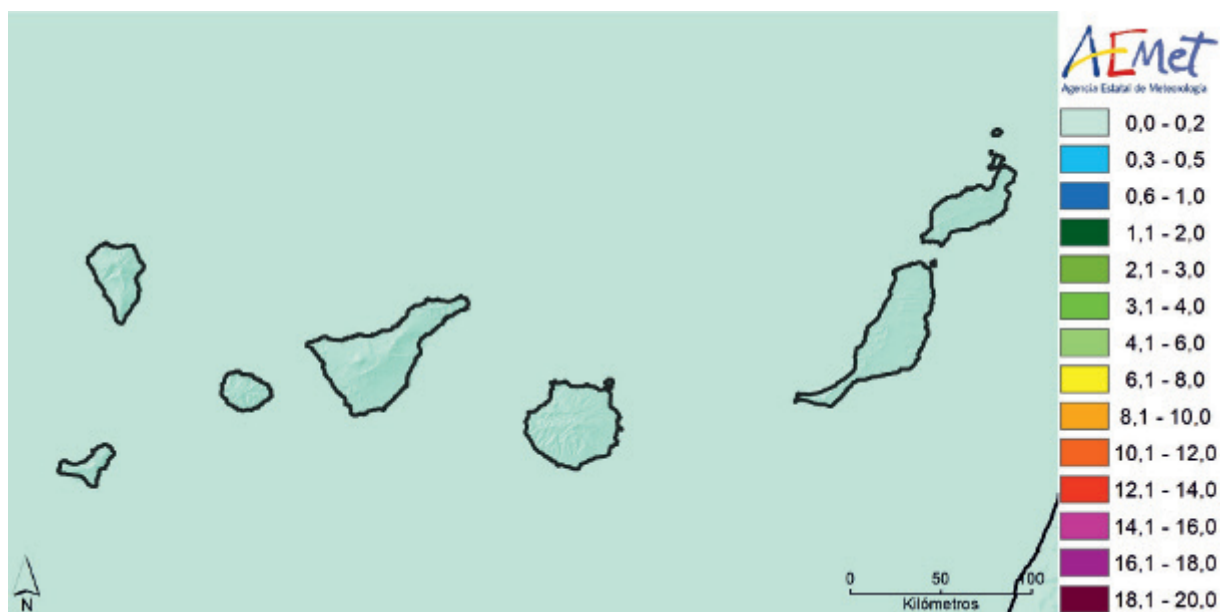


Figura 5.29. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Julio.

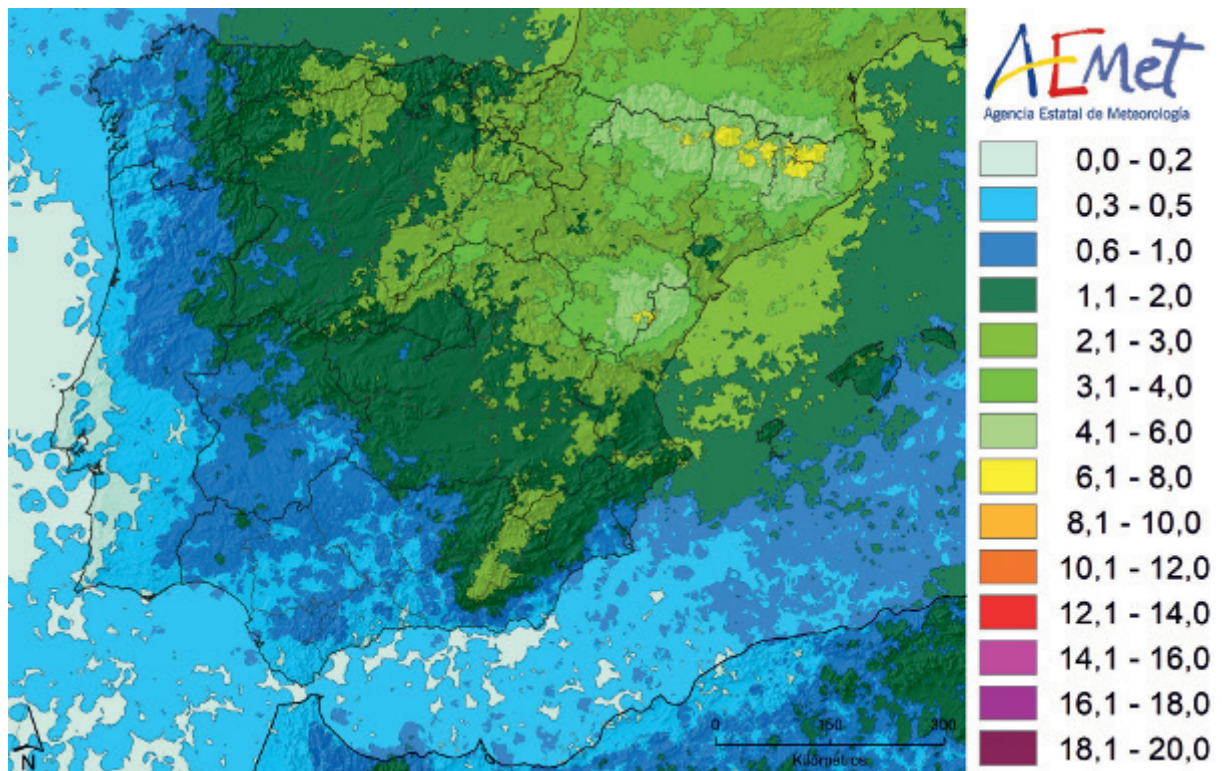


Figura 5.30. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Agosto.

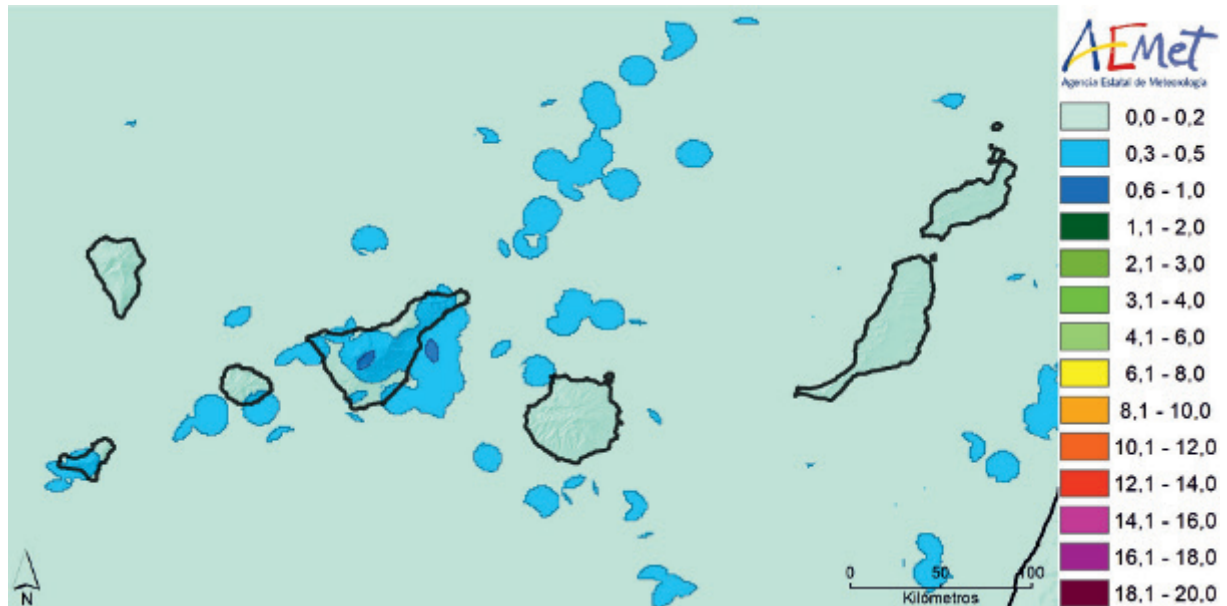


Figura 5.31. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Agosto.

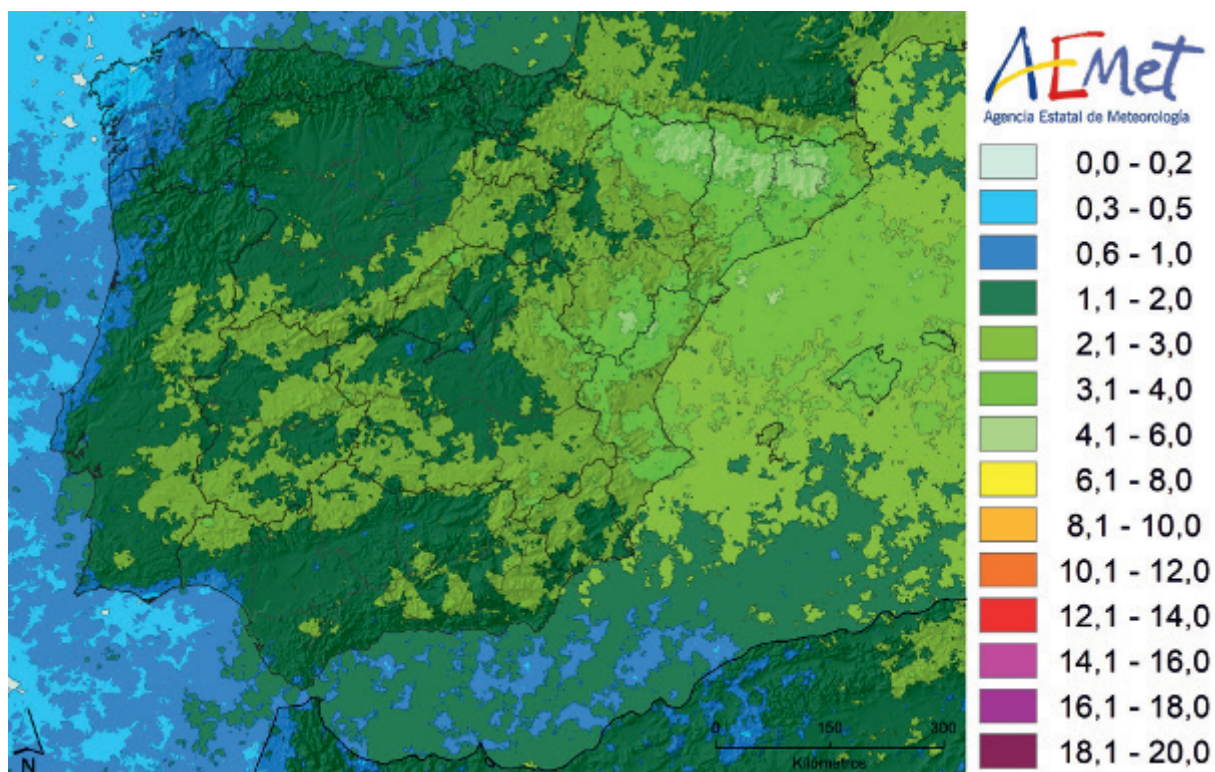


Figura 5.32. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Septiembre.

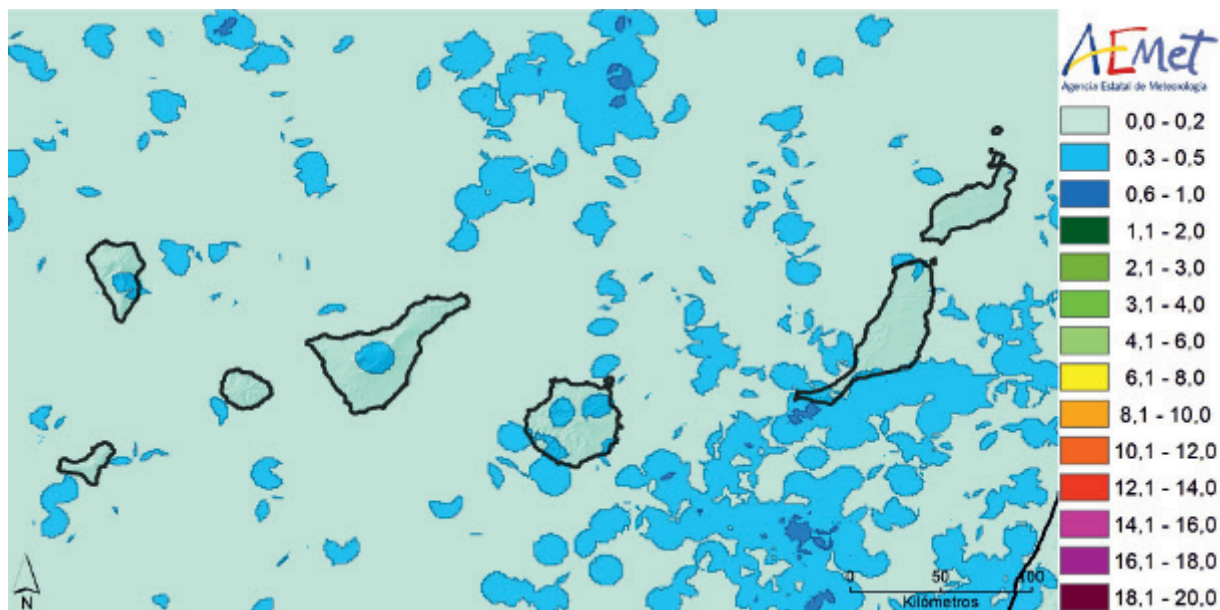


Figura 5.33. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Septiembre.

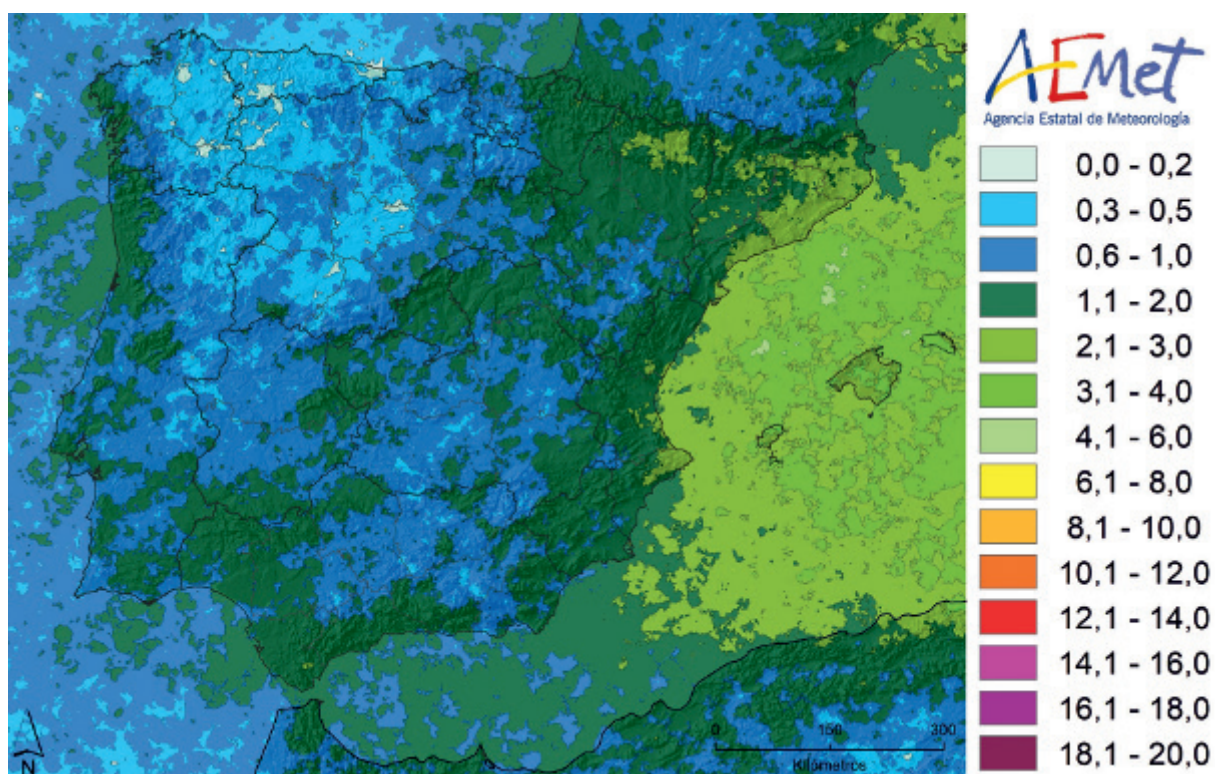


Figura 5.34. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Octubre.

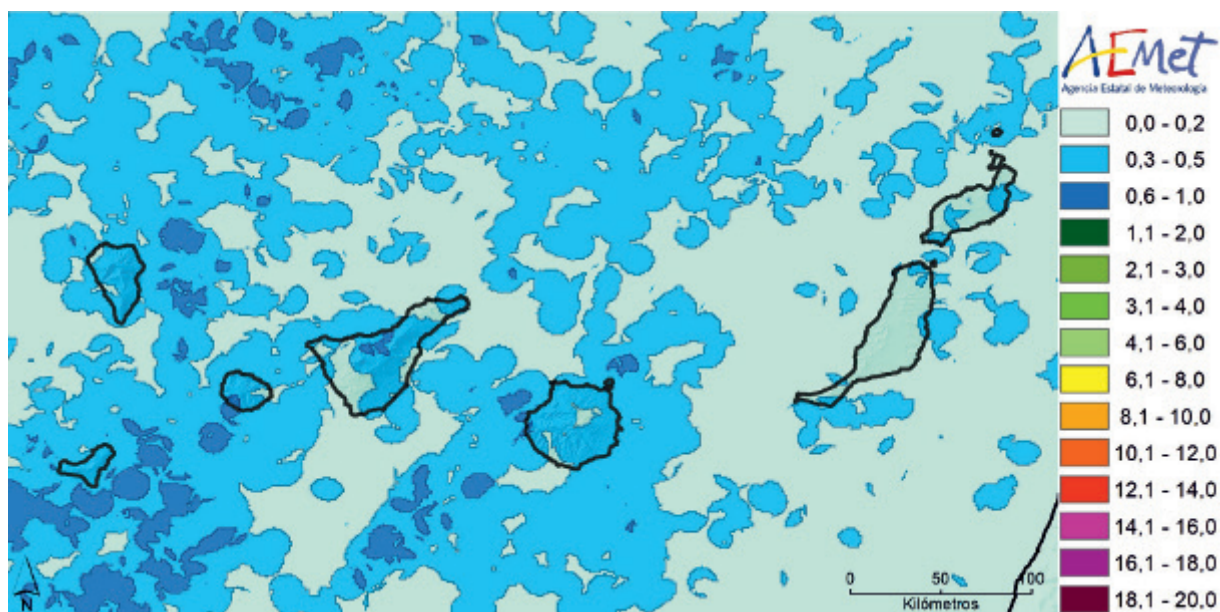


Figura 5.35. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Octubre.

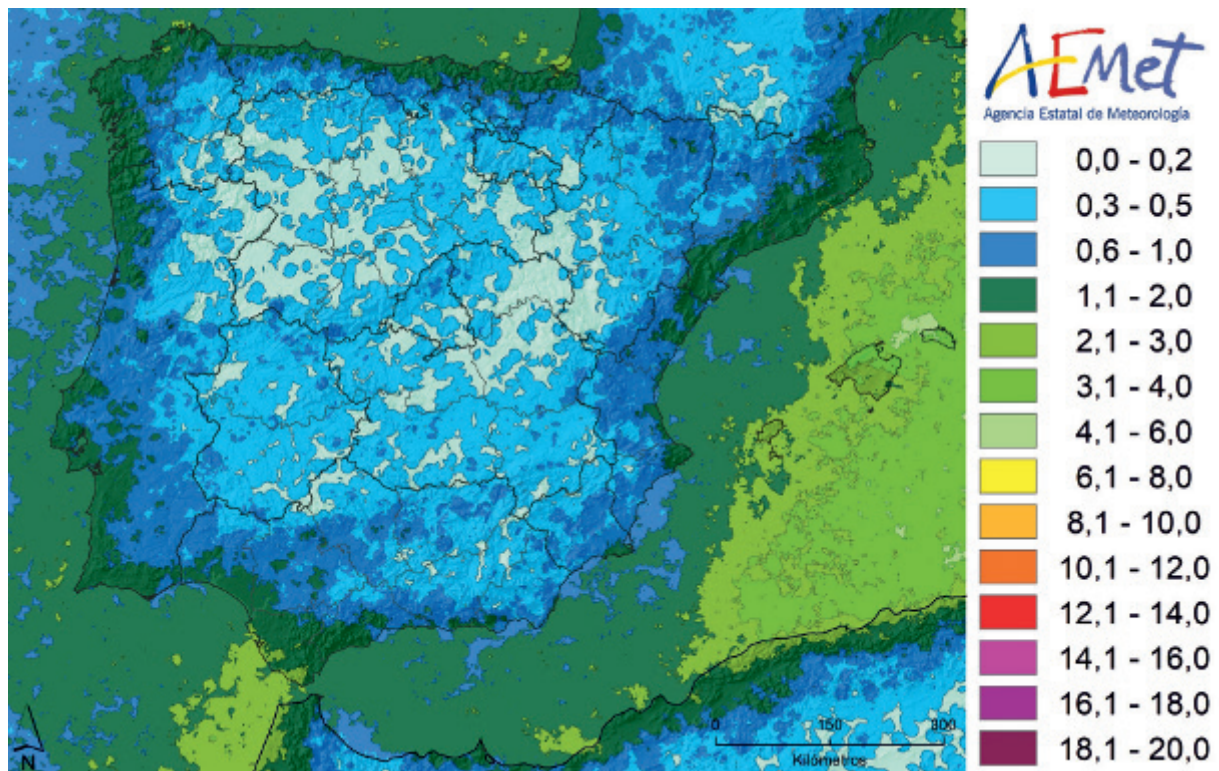


Figura 5.36. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Noviembre.

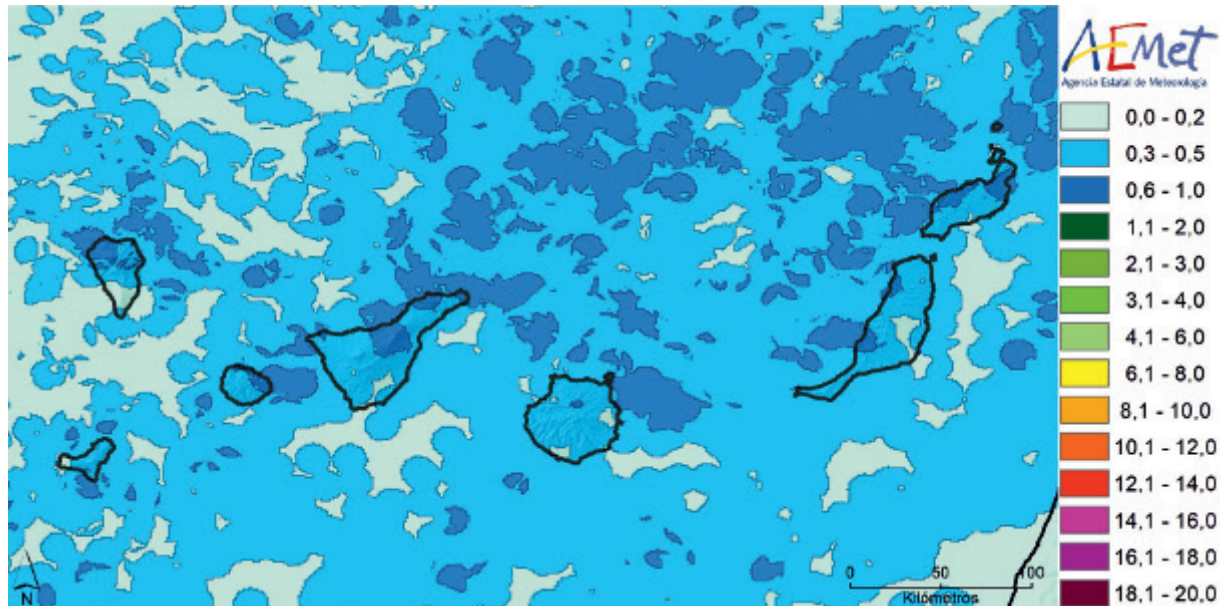


Figura 5.37. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Noviembre.

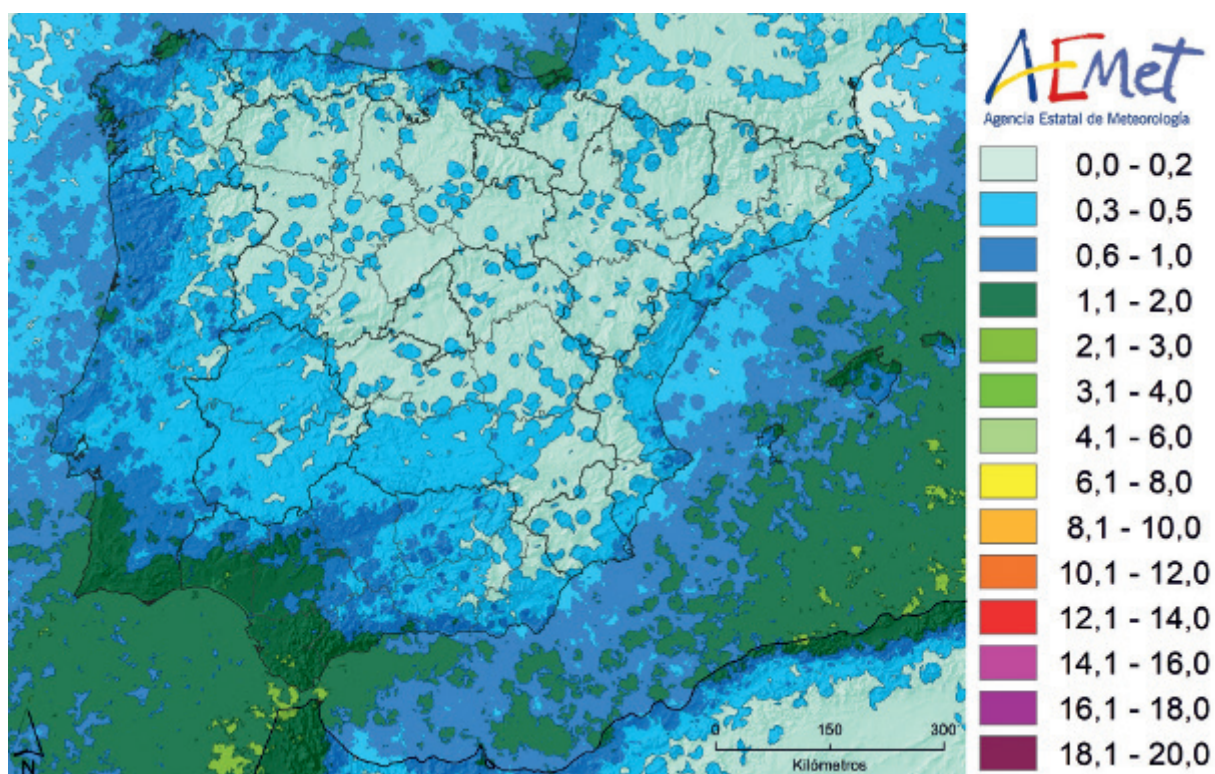


Figura 5.38. Número medio mensual de días de tormenta en la Península e islas Baleares. Diciembre.

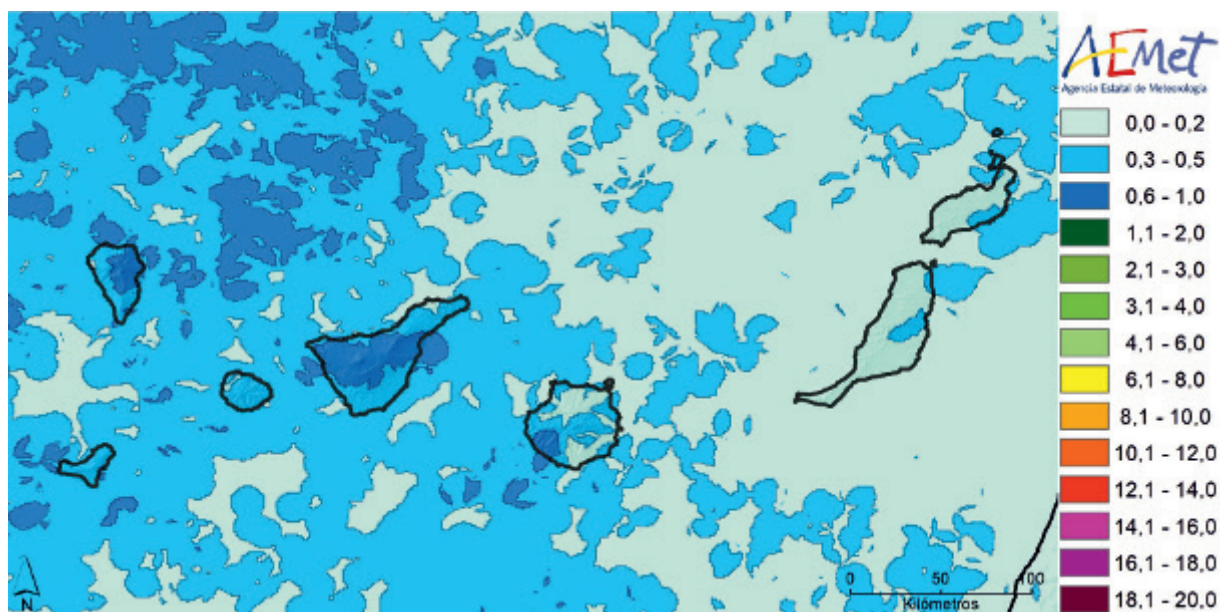


Figura 5.39. Número medio mensual de días de tormenta en las islas Canarias. Diciembre.

5.2.1. Conclusiones sobre el número de días de tormenta

A continuación se resaltan (con referenciación gráfica y numérica) las zonas que presentan los valores máximos y mínimos en la Península y Baleares.

En el período 2007-2016, la zona con más días de tormenta en la Península e islas Baleares (máximo) se encuentra al sur del macizo de Cotiella, entre las comarcas del Sobrarbe y la Ribagorza, en la provincia de Huesca (figura 5.40). En esos 10 años, en una zona del valle de la Fueva se registraron 379 días de tormenta, con un promedio por tanto de 37,9 días de tormenta al año. Asimismo, en el área entre los municipios de Campo y Fanlo, pertenecientes a las citadas comarcas oscenses, el promedio anual supera los 35 días de tormenta.

En otras zonas del norte de Cataluña también existen áreas con un promedio anual superior a 35 días de tormenta al año. Se trata de las comarcas del Pallars Sobirà y de la Alta Ribagorça en la provincia de Lleida, de la comarca del Ripollès en el noroeste de la provincia de Girona y de las comarcas de Osona y el Alt Berguedà al norte de la provincia de Barcelona.

También es reseñable el hecho de que se registran muchos más días de tormenta en la vertiente española de los Pirineos, al sur de la cordillera, que, en la parte francesa, probablemente por encontrarse en la zona de barlovento asociado a los flujos de las situaciones tormentosas.

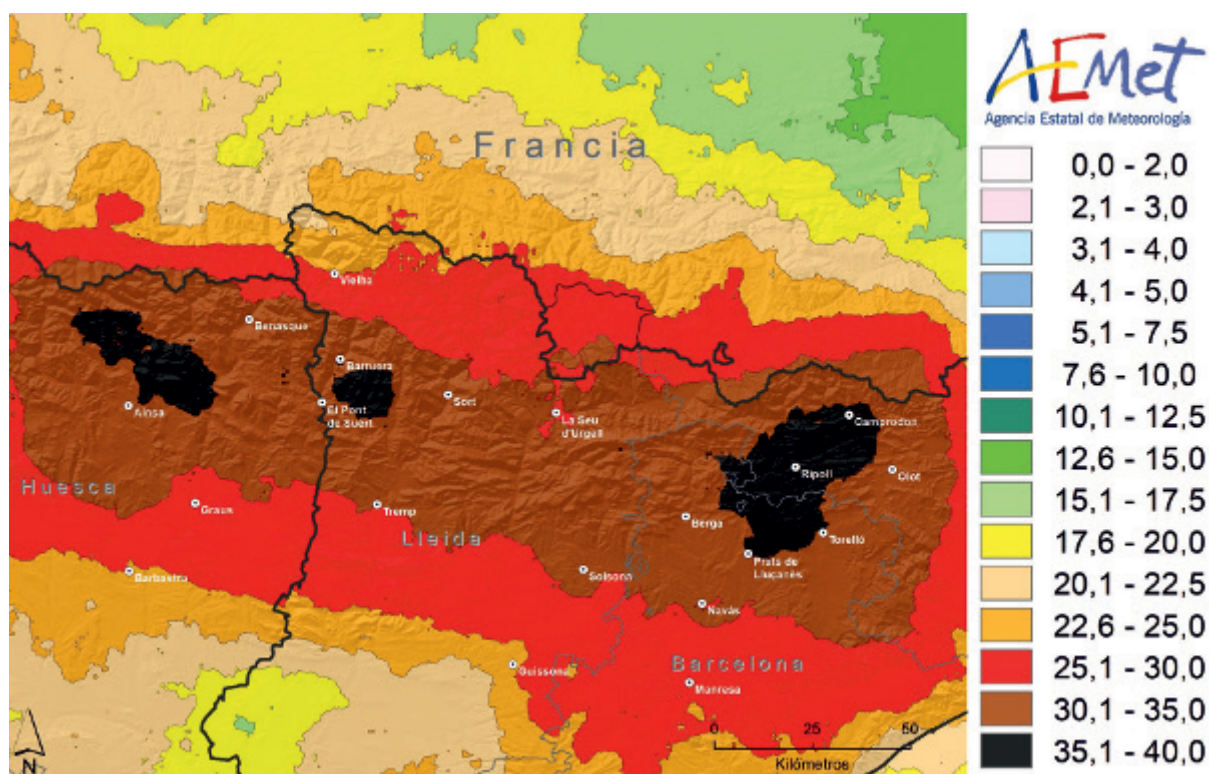


Figura 5.40. Zona con el máximo número medio anual de días de tormenta en España.

Fuera de esta zona al sur de los Pirineos orientales, solo en el Maestrazgo turolense y el Maestrat castellonense, entre Cantavieja, Mosqueruela, Vilafranca y Vistabella del Maestrat, se superan los 30 días de tormenta al año en el promedio 2007-2016 (figura 5.41). Esta zona coincide además con la de mayor densidad de descargas en España (figura 4.1), es decir, hay más tormentas al sur de los Pirineos orientales, pero las tormentas del Maestrazgo registran mayor cantidad de rayos.

El mínimo anual de días de tormenta en la Península y Baleares se registra en la costa mediterránea de Andalucía oriental, entre Motril, en Granada, y Vera, en Almería, donde hay entre 6 y 7 días de tormenta al año.

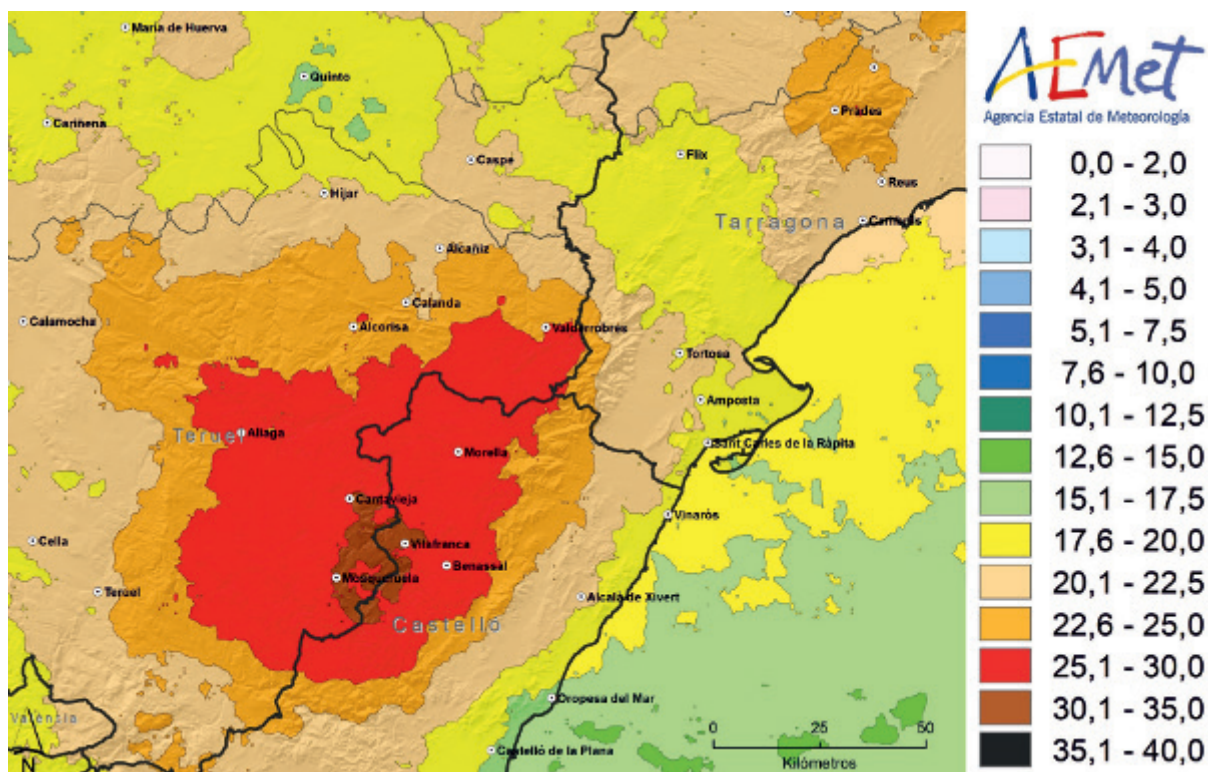


Figura 5.41. Zona con el máximo secundario de número medio anual de días de tormenta en España.

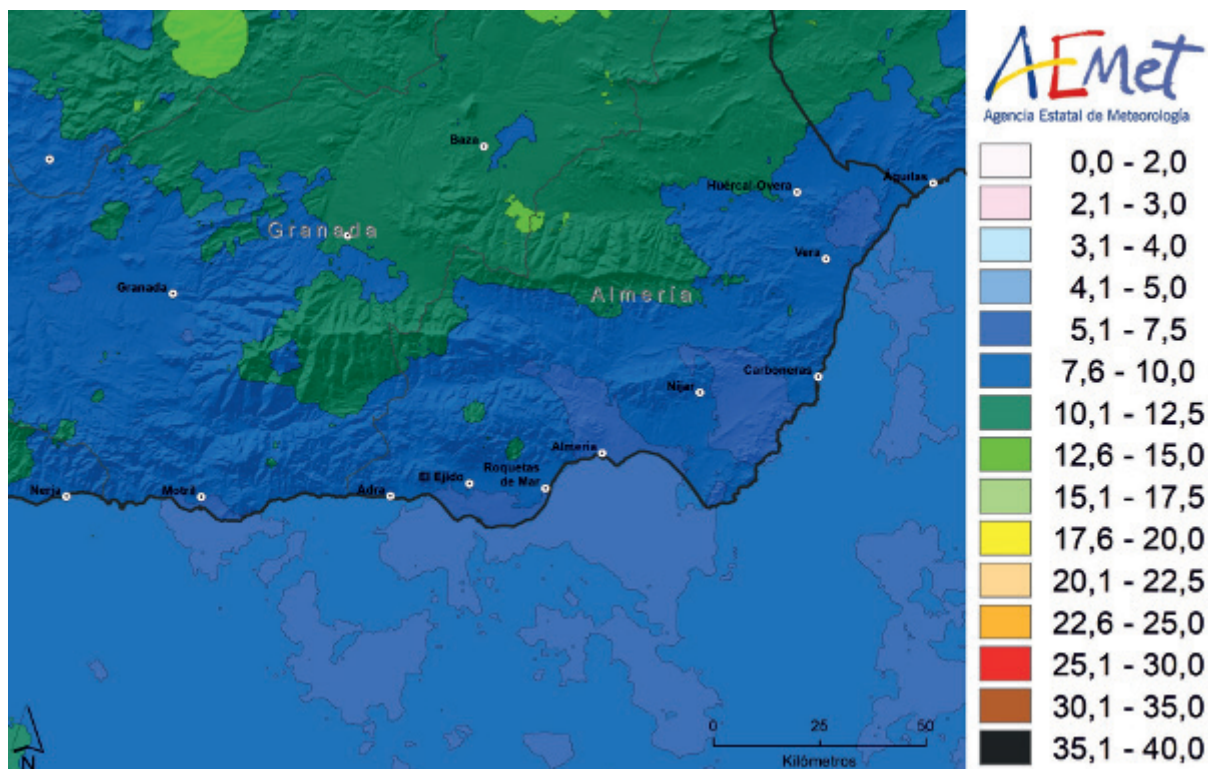


Figura 5.42. Zona con el mínimo número medio anual de días de tormenta en España.

A continuación se incluyen mapas detallados del número anual de días de tormenta centrados en una o varias comunidades autónomas. No se incluyen ya los mapas de Canarias al haber sido mostrados en el apartado anterior.

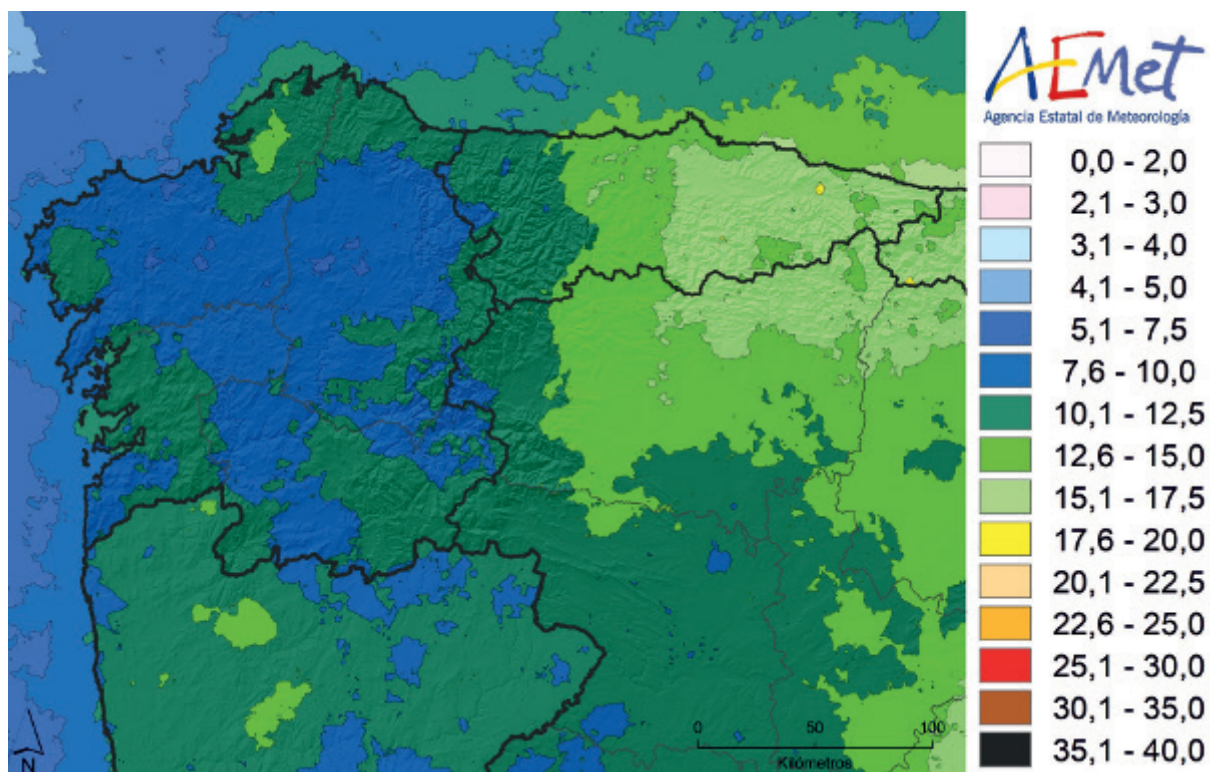


Figura 5.43. Número medio anual de días de tormenta en Galicia y Principado de Asturias.

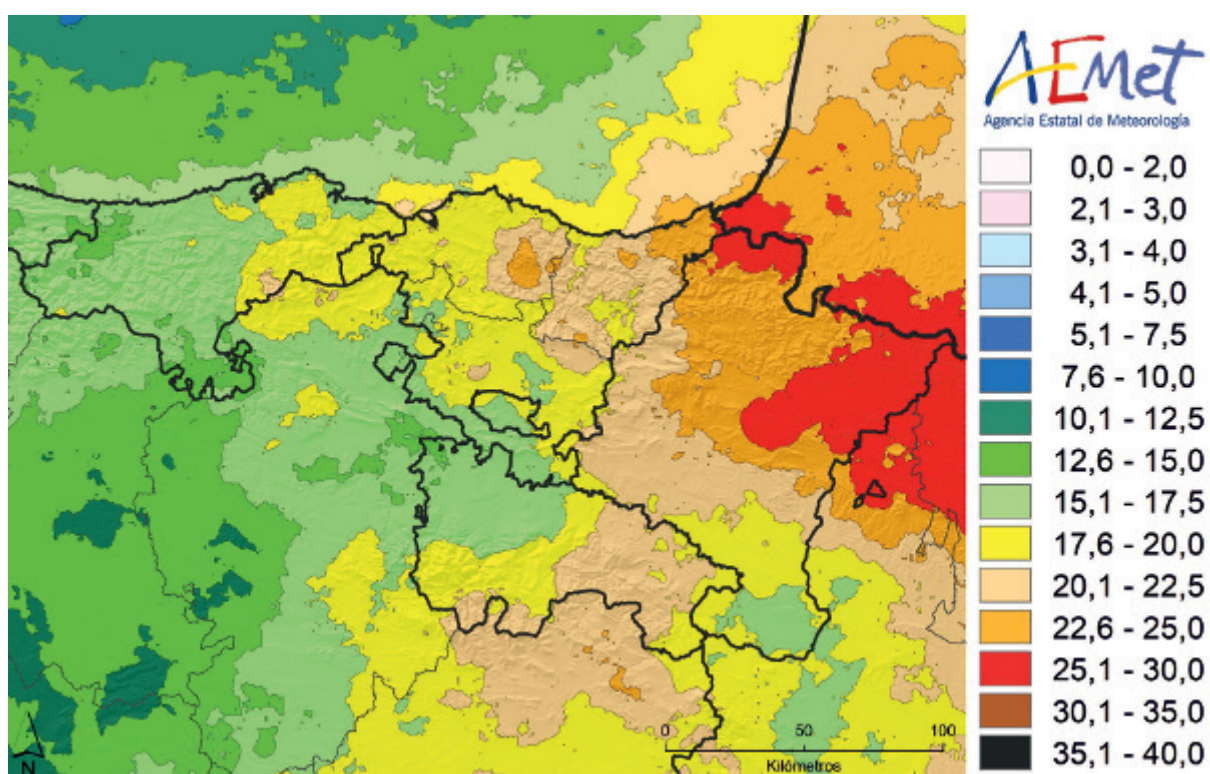


Figura 5.44. Número medio anual de días de tormenta en Cantabria, País Vasco, Comunidad Foral de Navarra y La Rioja.

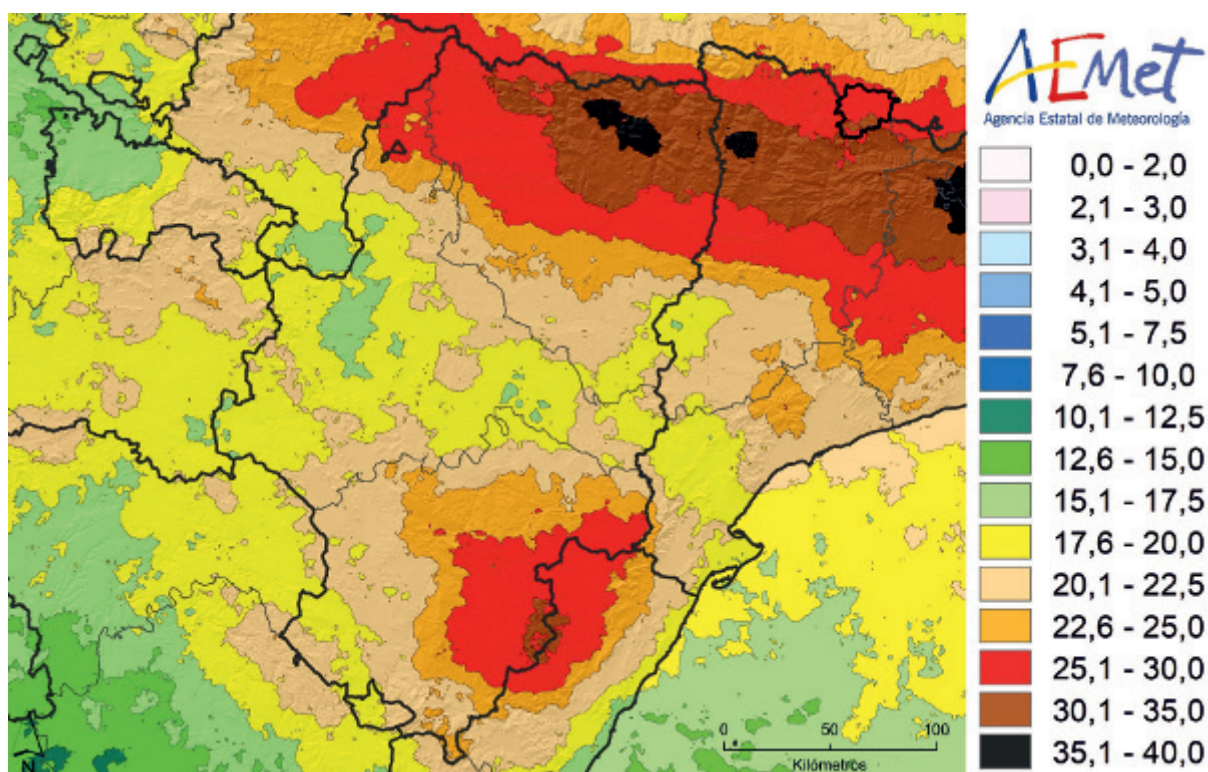


Figura 5.45. Número medio anual de días de tormenta en Aragón.

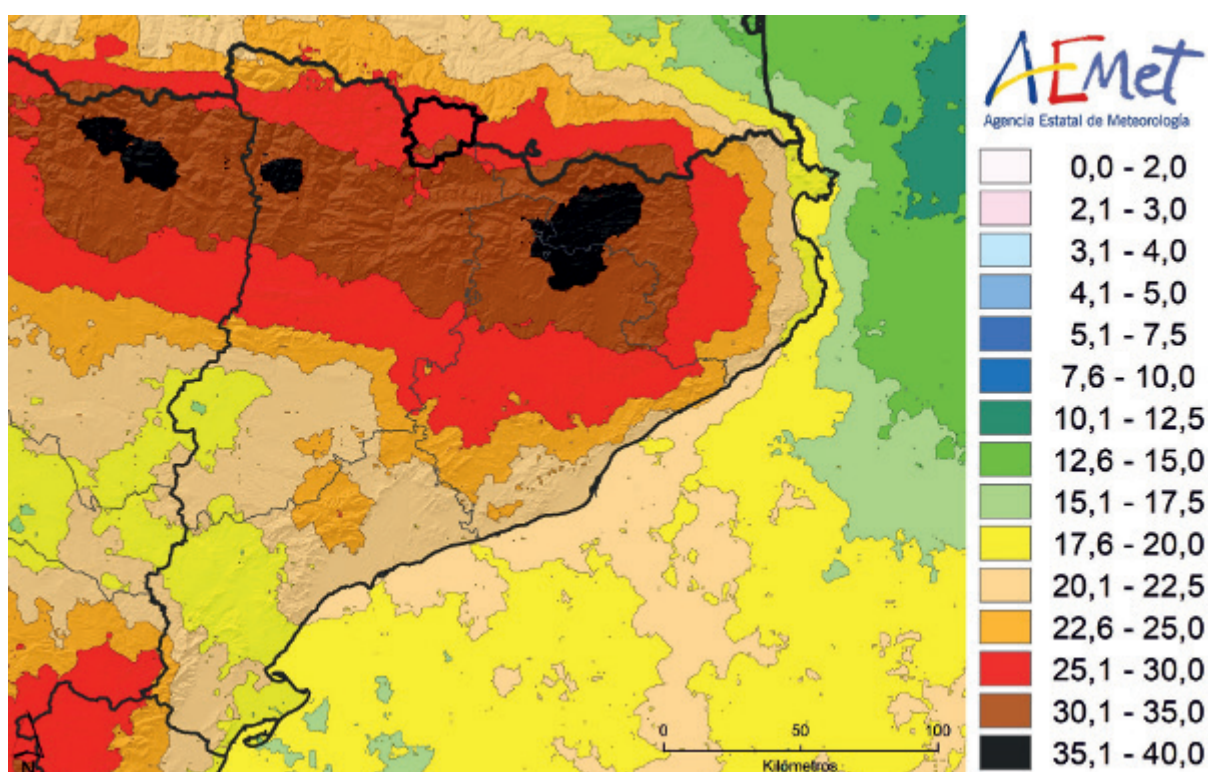


Figura 5.46. Número medio anual de días de tormenta en Cataluña.

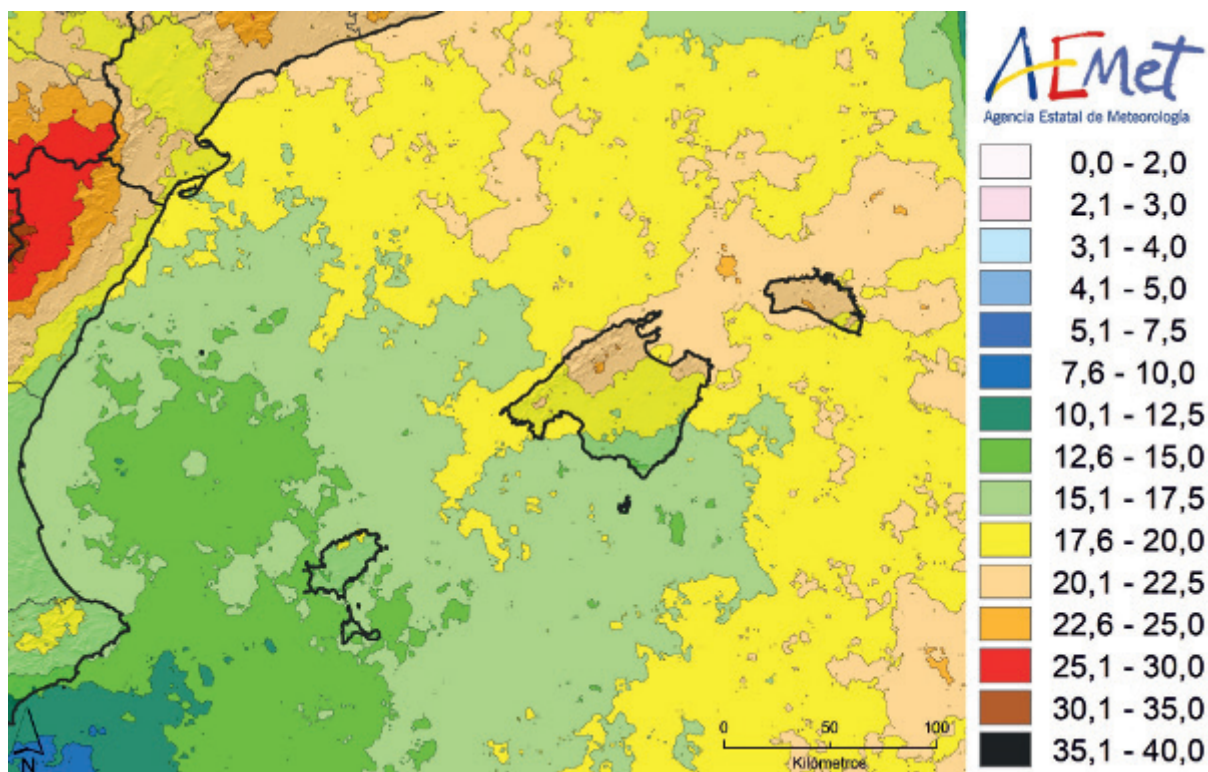


Figura 5.47. Número medio anual de días de tormenta en las Illes Balears.

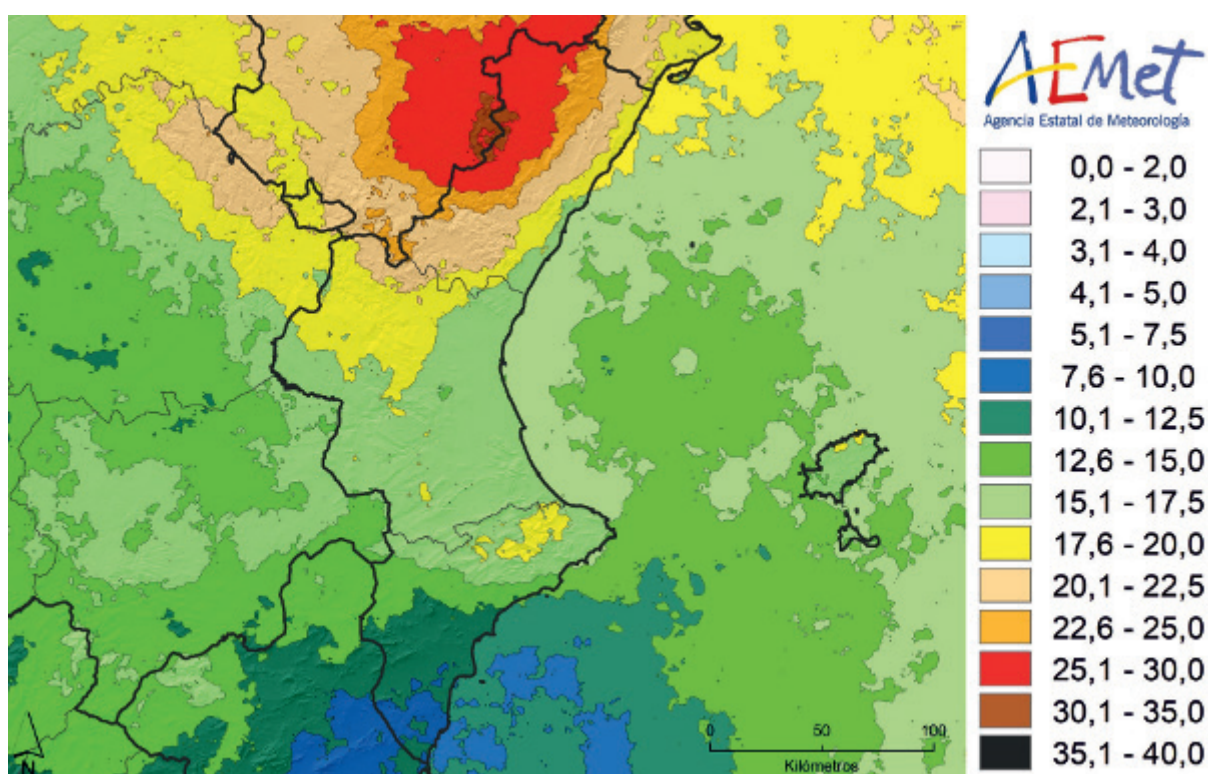


Figura 5.48. Número medio anual de días de tormenta en la Comunitat Valenciana.

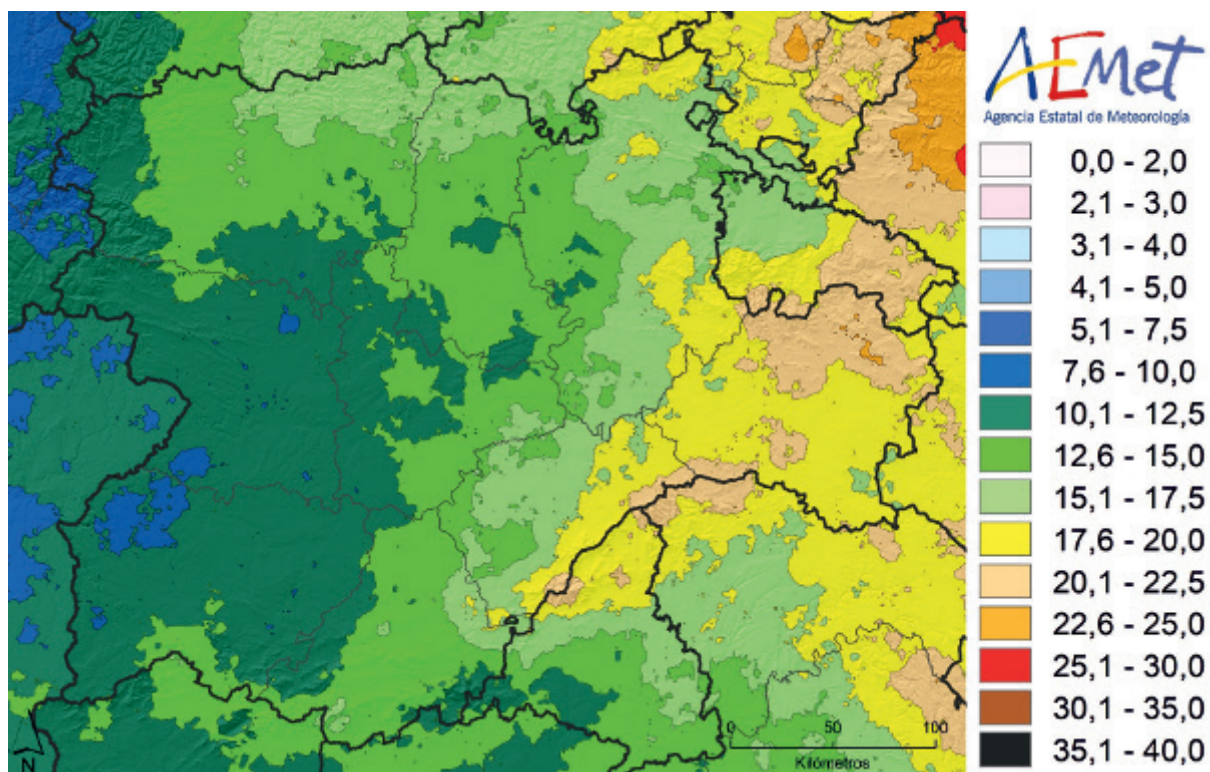


Figura 5.49. Número medio anual de días de tormenta en Castilla y León.

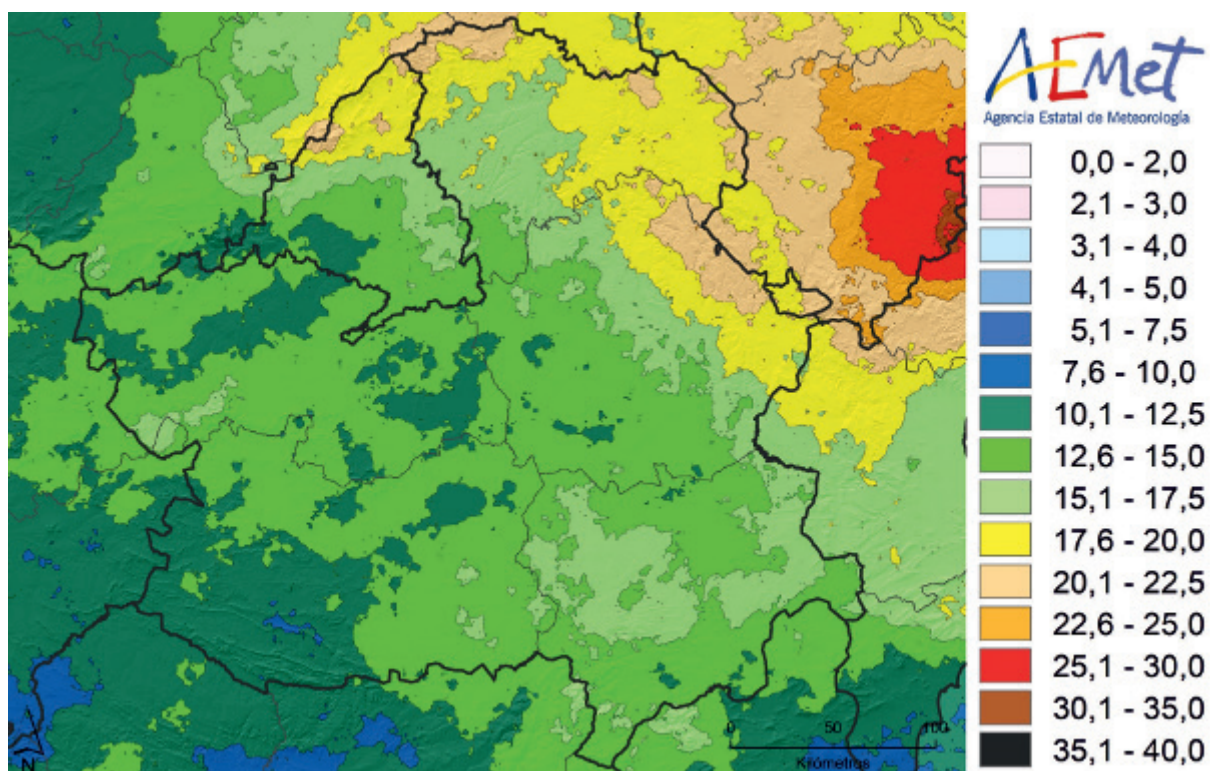


Figura 5.50. Número medio anual de días de tormenta en Castilla-La Mancha y la Comunidad de Madrid.

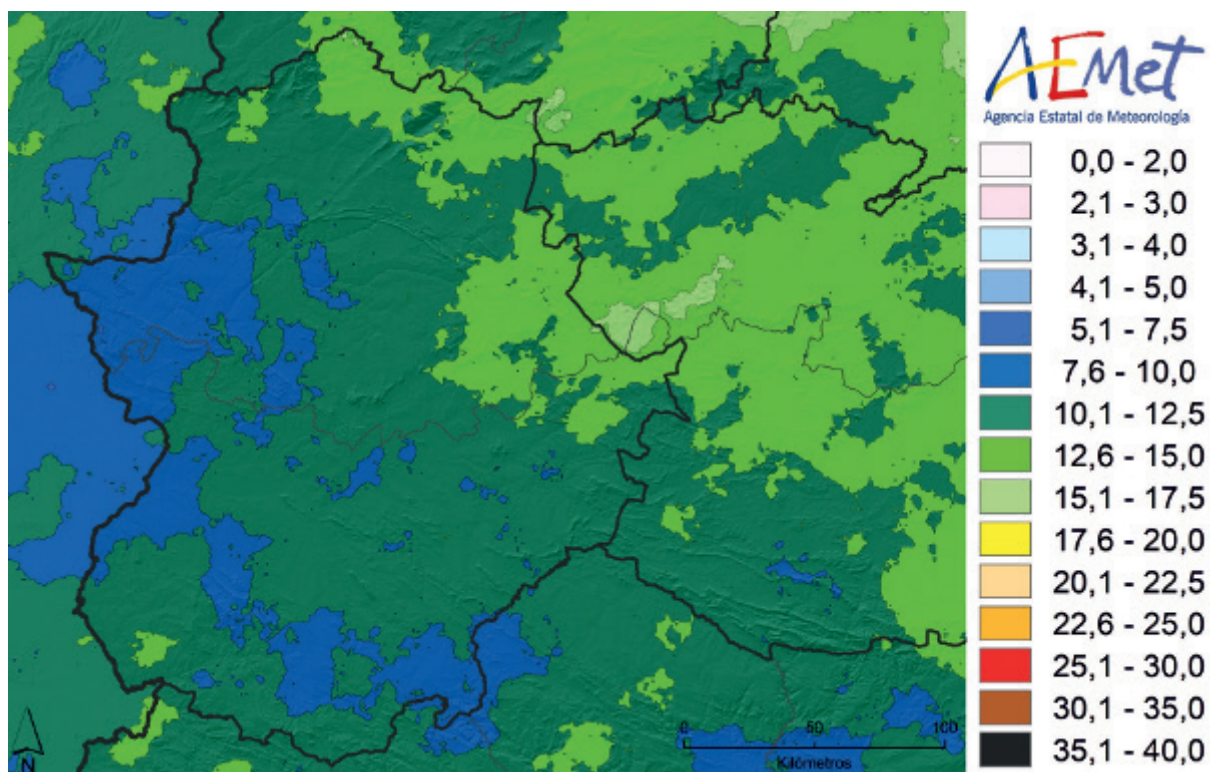


Figura 5.51. Número medio anual de días de tormenta en Extremadura.

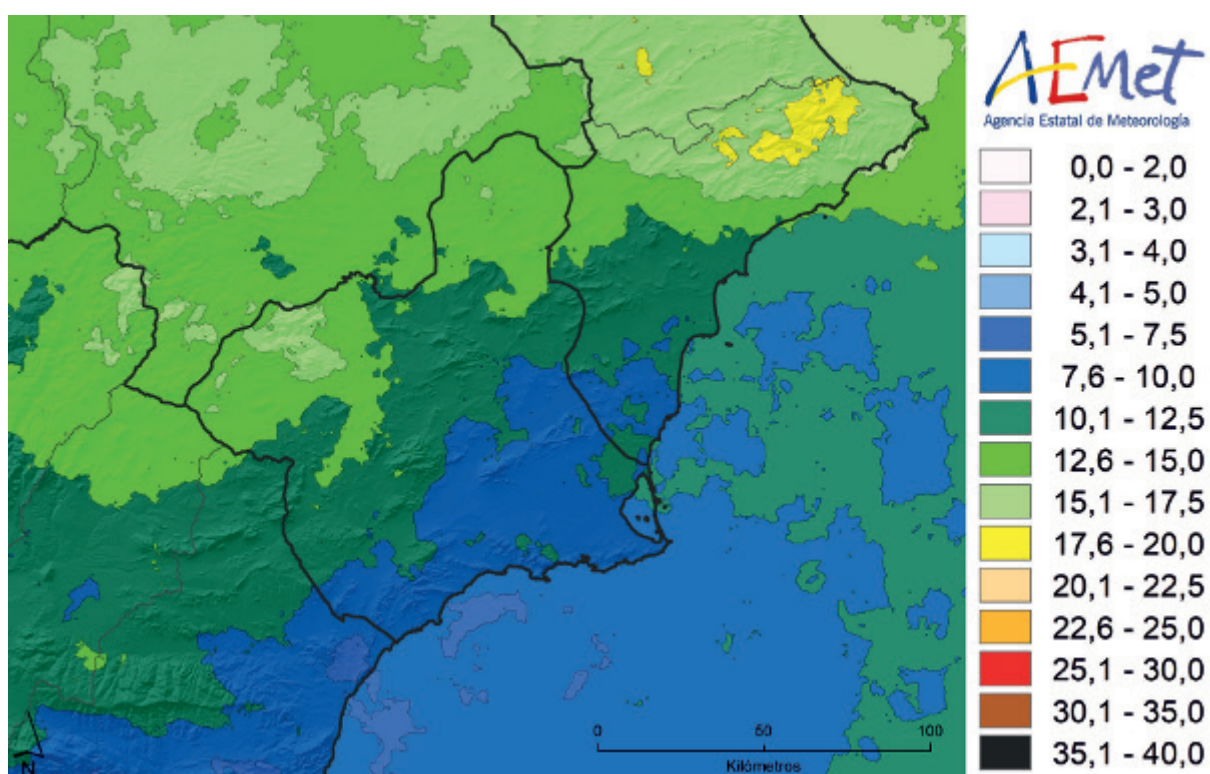


Figura 5.52. Número medio anual de días de tormenta en la Región de Murcia.

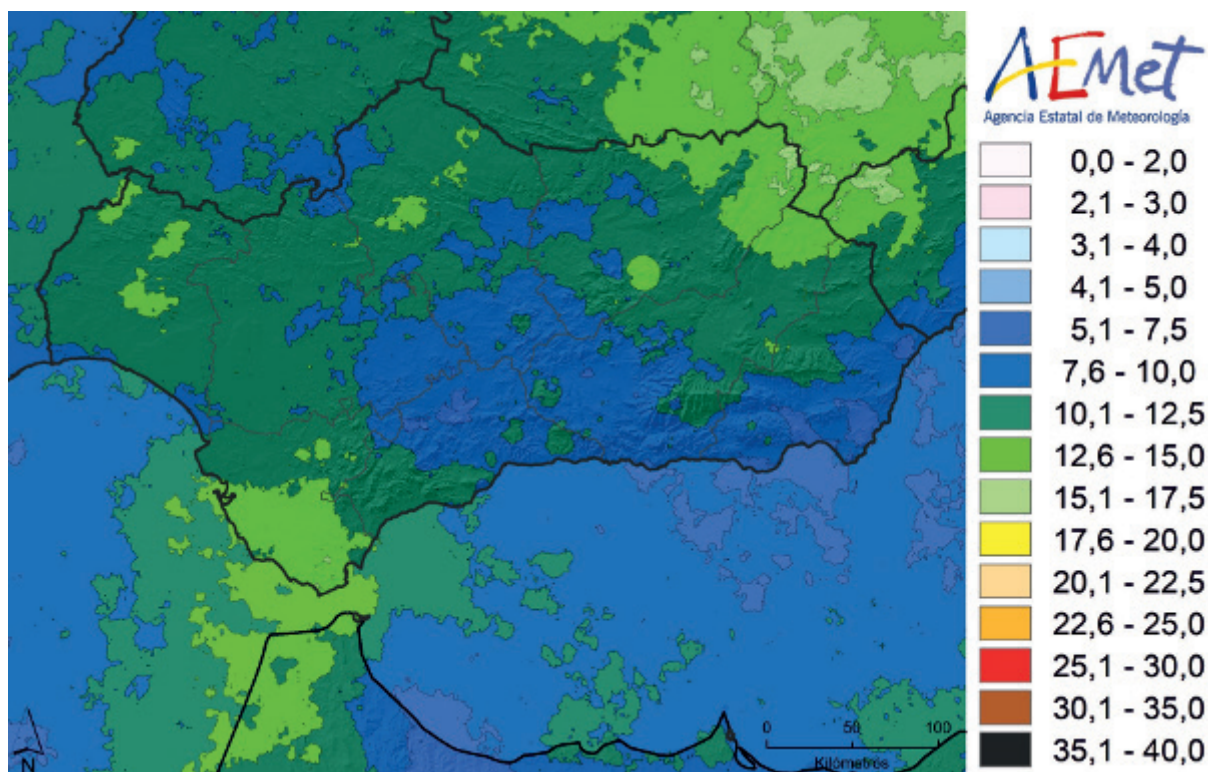


Figura 5.53. Número medio anual de días de tormenta en Andalucía, Ceuta y Melilla.

Analizando los mapas estacionales (figuras 5.8, 5.10, 5.12 y 5.14), aunque en número escaso (3-4 días anuales), se observa una mayor frecuencia de tormentas invernales (figura 5.8) en el área cantábrica (advecciones frías del norte) y litoral atlántico (frentes atlánticos), así como en el área mediterránea (vaguadas en niveles medios), en general por el contraste térmico entre el aire frío invernal y el mar relativamente cálido, con acusado efecto de la continentalidad (prácticamente no se producen tormentas en el interior peninsular).

En primavera (figura 5.10) oscila entre 6-8 días en el nordeste montañoso y 3-5 días en ambas mesetas y cornisa cantábrica (efecto conjunto del mayor caldeoamiento solar y la orografía como mecanismo de disparo de las tormentas), con mínimos en el extremo NW y en el SE; entre 1 y 2 días.

En verano (figura 5.12) destacan los dos máximos de hasta 20 días en Pirineos y el sistema Ibérico, con valores en el resto del cuadrante NE superiores a 8 días, como consecuencia de las tormentas de masa de aire habituales en el período veraniego en el interior peninsular, debidas al caldeoamiento solar y la orografía como mecanismo de disparo, al margen de los episodios de tormentas originados por el paso de vaguadas atlánticas. También se observa un fuerte gradiente SW-NE, con mínimos (en torno a 1 día de tormenta o menos) en el litoral atlántico y SW.

En otoño (figura 5.14) el máximo se encuentra en el área de las islas Baleares y el Mediterráneo oriental, con valores entre 12 y 14 días, y valores un poco inferiores en las zonas próximas mediterráneas y el área pirenaica. El mínimo se encuentra en el cuadrante noroccidental, con valores entre 1 y 2 días, por lo que se observa un fuerte gradiente entre estas dos zonas. El contraste entre el mar Mediterráneo relativamente cálido y las primeras irrupciones de masas de aire frío, son los ingredientes necesarios para la formación de tormentas en esta área durante esta época.

Mención especial merecen las ciudades autónomas de Ceuta y Melilla. Mientras que Ceuta se ve influenciada directamente por un máximo relativo anual en el área del Estrecho, presentando 12,5 días de tormenta al año, Melilla posee un valor medio inferior, de 9,2 días cada año (figura 5.53). Es un hecho conocido que la actividad tormentosa máxima ocurre en otoño-invierno y la mínima en verano en ambas ciudades. Aunque en verano puedan existir muchas tormentas más hacia el interior de África,

incluso a veces cerca, es raro que lleguen a afectar a Ceuta y a Melilla, y en general, cuando lo hacen, las precipitaciones asociadas a las tormentas veraniegas en las ciudades autónomas no suelen ser intensas. Este comportamiento tanto en verano como en otoño-invierno es debido fundamentalmente al mecanismo estabilizador/inestabilizador del circundante mar de Alborán.

En Canarias, al igual que ocurría con la densidad de descargas, hay muchos menos días de tormenta que en la Península y Baleares. Por ejemplo, las dos capitales canarias tienen menos de la mitad de días de tormenta que la capital de la Península que presenta la cantidad más baja (Almería). La zona de mayor número de días de tormenta en Canarias se sitúa en la isla de Tenerife, en zonas altas y medianías al nordeste del Teide, donde hay entre 4 y 5 días de tormenta en promedio anual (figura 5.7). En otras zonas próximas de la isla de Tenerife y zonas altas de La Palma hay entre 3 y 4 días de tormenta de media al año. Los valores mínimos se registran en las islas orientales.

5.3. Número de descargas en cada día de tormenta en la Península y Baleares

Hasta ahora se ha estudiado por un lado la densidad de descargas eléctricas y por otro el número de días de tormenta. Por tanto, no se ha tenido en cuenta la actividad tormentosa diaria, es decir, el número de descargas de cada día de tormenta, ya que el requisito para considerar un día de tormenta es que se produzca al menos una descarga.

A continuación se va a realizar una estadística del número medio de descargas asociadas a días de tormenta en cada zona. No se pretende caracterizar la adversidad de las tormentas en base a las descargas asociadas, ya que sería necesario disponer de un detallado catálogo de tormentas (aislando cada tormenta de las demás). Además, se deberían analizar también los efectos en superficie, ya que las tormentas severas llevan asociados fenómenos adversos como pueden ser precipitaciones intensas, granizo grande, tornados o vientos convectivos muy fuertes, y en la bibliografía consultada no se suele considerar exclusivamente el número de descargas como elemento para caracterizar la adversidad de una tormenta.

Cuando una tormenta va acompañada de muchas descargas, lo normal es que se produzcan fenómenos severos en superficie, en especial poco después de producirse un incremento brusco del número de descargas (*lightning jump*). Pero hay veces que con una actividad eléctrica escasa o no muy elevada, se producen fenómenos adversos locales, como por ejemplo el caso de las lluvias torrenciales de tipo “cálido”.

Previamente se han contabilizado todos los días de tormenta en el período 2007-2016 alrededor de cada punto del territorio. En ese período se ha descrito en el apartado anterior, por ejemplo, cómo en zonas al sur de los Pirineos orientales había lugares en los que se contabilizaron más de 300 días de tormenta en esos 10 años, aunque no se llegó a definir cuántas descargas se registraron en cada uno de esos días de tormenta. Del análisis directo de los mapas anuales de densidad de descargas y de número de días de tormenta, ya se deduce que, por ejemplo, en el Maestrazgo las tormentas deben generar más descargas que en los Pirineos, ya que el Maestrazgo es la zona de la Península de mayor número anual de descargas, pero no es la zona de mayor número de días de tormenta (menos días de tormenta generan más descargas).

Ahora se van a contabilizar las descargas registradas en cada día de tormenta alrededor de cada punto del territorio, con lo que será posible realizar una estadística del número medio de descargas que se registran en cada día de tormenta en un lugar determinado.

El criterio de día de tormenta será el empleado en el capítulo anterior: cuando se registra al menos una descarga en un radio de 10,1 km alrededor de un observatorio en la zona de la península ibérica, islas Baleares y ciudades autónomas de Ceuta y Melilla y no se va a calcular para la zona de Canarias, donde la menor superficie considerada para el estudio y los escasos días de tormenta que se registran en promedio anual, impiden generar una estadística tan robusta como en el área de la Península.

Al igual que existía una gran variabilidad espacial y temporal en la distribución de la densidad de descargas eléctricas y del número de días de tormenta, también existe una gran variabilidad espacial y temporal en el número de descargas que generan las tormentas.

Si en cada día de tormenta se cuenta el número de descargas en el promedio de la superficie del área de la Península, Baleares, Ceuta y Melilla (solo de aquellos lugares en los que haya habido tormenta), se registra una media de 13,8 descargas en cada día tormenta.

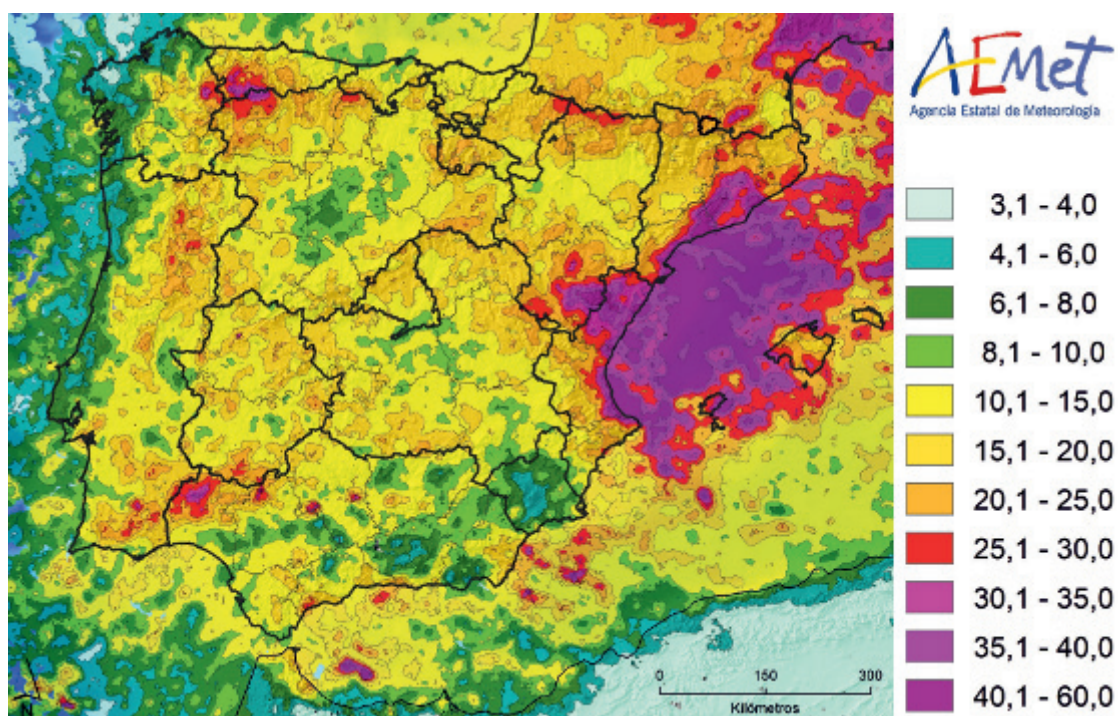


Figura 5.54. Número medio de descargas eléctricas en cada día de tormenta.

Las tormentas que más descargas generan son las que se registran en plena canícula, durante los últimos días de julio y los primeros de agosto, y las tormentas que menos generan son las de mitad del mes de febrero, entre el 14 y el 22 de este mes.

La zona de mayor número de descargas en cada día de tormenta se observa en el mar balear, entre la costa de Valencia, Castellón, Tarragona, Barcelona y las islas Baleares, penetrando la zona de máximos por la costa de estas provincias y extendiéndose hacia el interior por la provincia de Castellón hasta el Maestrazgo turolense.

Resulta obvio que las tormentas muy activas eléctricamente y a la vez estacionarias contribuyen de forma muy notable a los máximos de la figura 5.54. Una de las causas que podría justificar que el máximo de descargas en cada día de tormenta se encuentre en zonas marítimas mediterráneas, es el tipo de convección característica de esta zona. Resulta frecuente que la convección que se desarrolla en el Mediterráneo, sobre todo en otoño, lo haga en un ambiente de moderada o débil cizalladura, condiciones en las que el fuerte empuje hidrostático es el mecanismo predominante. Esto hecho favorece que las células convectivas generadas, en muchas ocasiones tengan un movimiento lento o incluso permanezcan estacionarias durante horas en una zona, generando por tanto muchas descargas en zonas determinadas por persistencia. En contraste, las tormentas de rápido movimiento, aunque globalmente generan muchas descargas en el ciclo de vida de las mismas, particularmente no dejan muchas descargas alrededor de un observatorio por su rápido paso sobre el mismo.

Si se representan solo las zonas terrestres de la España peninsular, islas Baleares y ciudades autónomas del mapa anterior, se comprueba cómo surgen zonas de máximos secundarios que no destacaban especialmente por tener una alta densidad de descargas o un elevado número de días de tormenta, pero que sí que destacan del entorno circundante por presentar muchas descargas en cada día de tormenta.

Simplificando, se podría decir que hay zonas donde no hay muchos días de tormentas, ni un elevado número de descargas en el promedio anual, pero que cuando ha habido tormentas, estas han generado

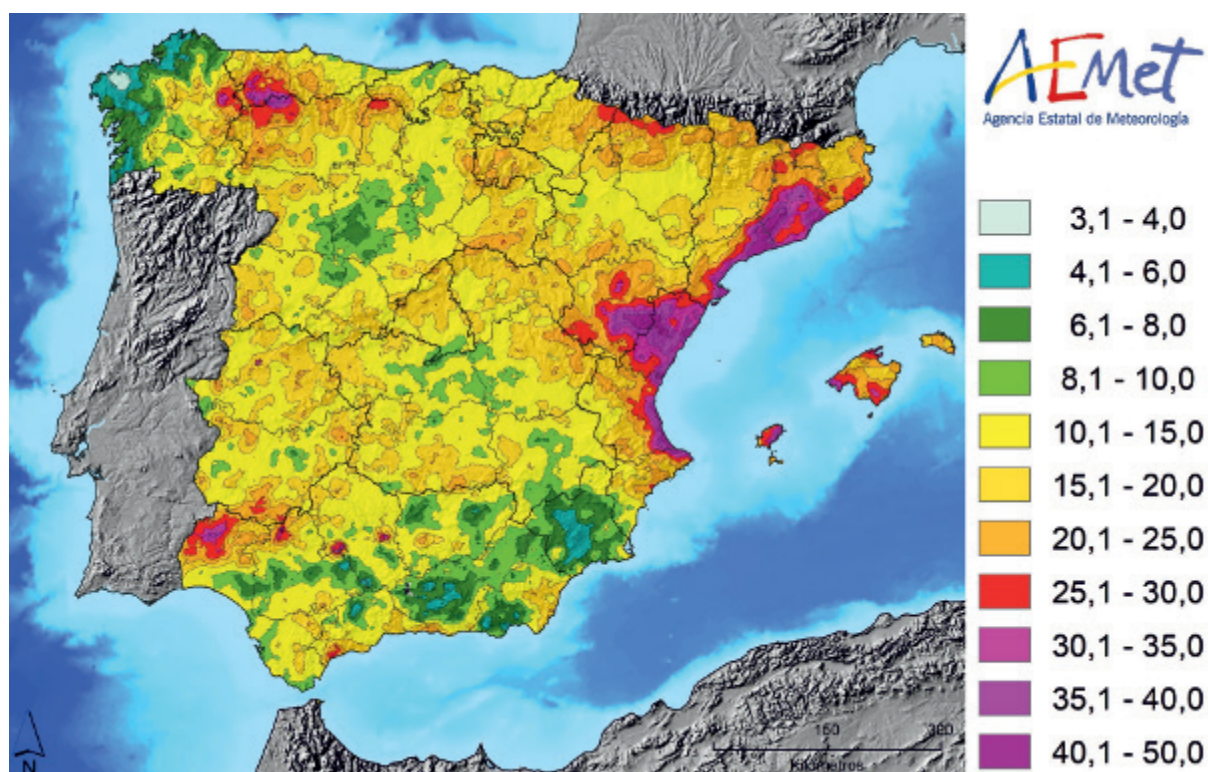


Figura 5.55. Número medio de descargas eléctricas en cada día de tormenta en zonas terrestres.

gran cantidad de descargas. Estas zonas son fundamentalmente la parte occidental de la cordillera Cantábrica, entre Asturias y León, la sierra de Aracena, en la provincia de Huelva y la isla de Ibiza.

Muy pocas veces se superan las 2000 descargas en una localidad durante un día de tormenta. El día en el que más descargas se registraron alrededor de un punto en un día de tormenta fue el 28 de septiembre de 2009, cuando en la zona de Pollença, en la isla de Mallorca, se llegaron a registrar 2632 descargas. El día anterior, el 27 de septiembre de 2009, se registraron 2200 descargas alrededor de la zona de Llutxent, en el sur de la provincia de Valencia, y el 6 de agosto de 2007, en la zona del monasterio de Montserrat, se contabilizaron 2232 descargas en ese día tormenta.

Si de cada día en el que se ha registrado tormenta en zonas terrestres, se calcula el número de descargas alrededor de cada observatorio y se extrae el valor máximo, se pueden obtener los percentiles que definirían los extremos de número de descargas en cada día de tormenta. De esta forma, el percentil 95 se sitúa en 452 descargas, el percentil 90 en 284 descargas y el percentil 80 en 119 descargas. Es decir, en el 20 % de los días en los que se registra tormenta, en algún punto se superan las 119 descargas, y en el 5 % de los días en los que se registra tormenta, en algún punto se superan las 452 descargas.

5.4. Días de tormenta de gran actividad eléctrica

A continuación se analizan para la península ibérica e islas Baleares y para las islas Canarias los días más activos desde el punto de vista de actividad eléctrica.

5.4.1. Días con mayor número de descargas en la península ibérica e islas Baleares

El día con mayor número de descargas en los 10 años del estudio fue el 14 de septiembre de 2009, con 104 989 descargas, pero si además se suman las 70 239 descargas registradas al día siguiente, que es el cuarto con mayor actividad de la serie, se obtienen un total de 175 228 en esos dos días. Esos dos días de 2009 estuvieron caracterizados por una intensa actividad convectiva de origen mediterráneo.

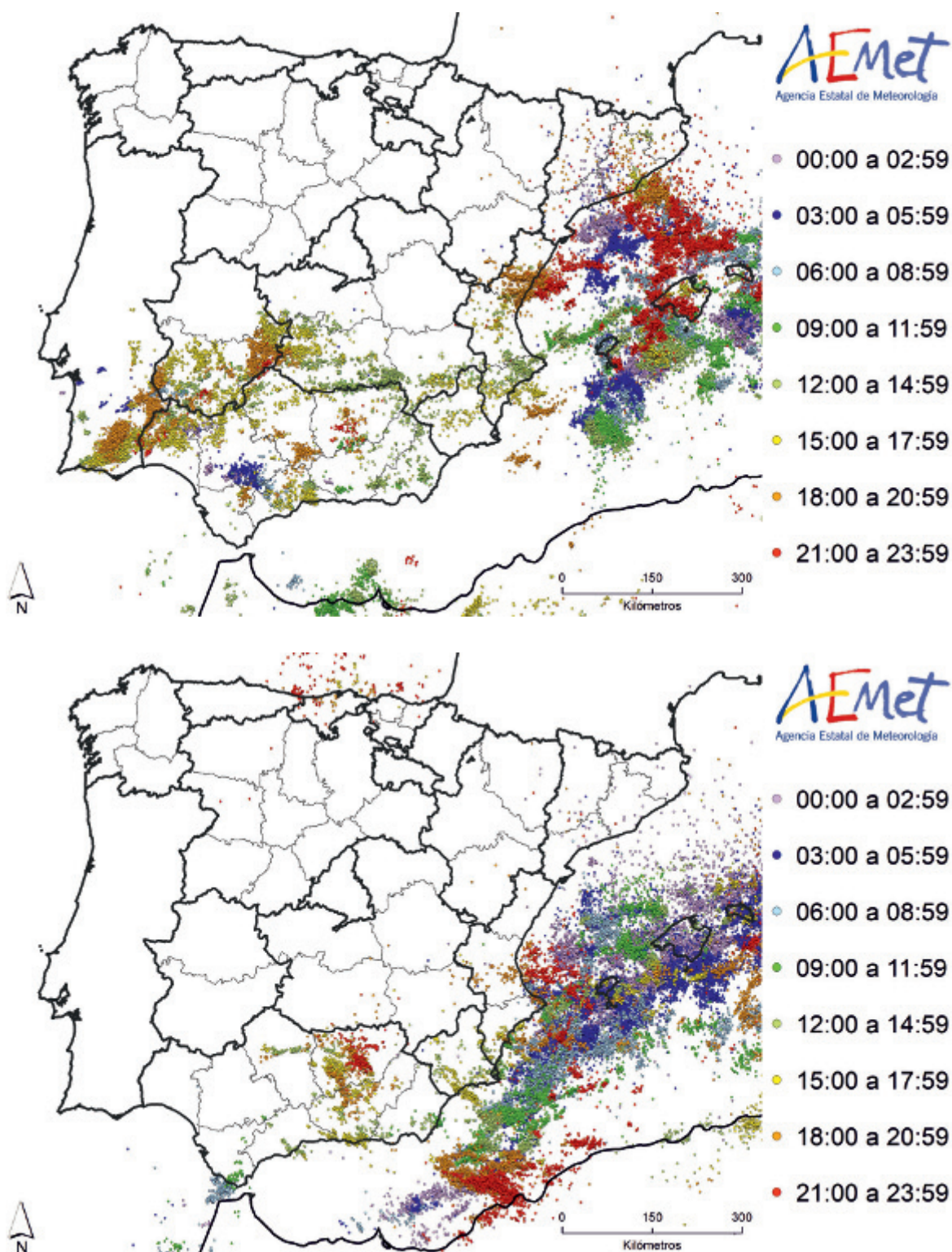


Figura 5.56. Descargas eléctricas registradas los días 14 (arriba) y 15 (abajo) de septiembre de 2009 por tramos trihorarios (hora UTC).

Como queda reflejado en la tabla siguiente, los días con mayor número de descargas eléctricas en el área de la Península y Baleares en el período de 10 años de estudio, se suelen registrar en septiembre, aunque con una situación atmosférica de gran inestabilidad termodinámica, también en julio o agosto puede haber días con más de 60 000 descargas.

Días con mayor número de descargas Península e islas Baleares	
Día	Descargas totales
14 de septiembre de 2009	104 989
17 de septiembre de 2014	93 823
31 de julio de 2015	79 546
15 de septiembre de 2009	70 239
14 de septiembre de 2007	69 270
28 de septiembre de 2009	66 156
17 de septiembre de 2010	63 105
13 de septiembre de 2009	62 868
23 de septiembre de 2016	61 342
8 de agosto de 2014	60 306

Tabla 5.2. Días con mayor número de descargas.

Agrupando todas las descargas por el día del año en las que se han registrado (independientemente del año), se comprueba que la máxima actividad se registra en la segunda quincena de septiembre, destacando los días 14 y 17 de septiembre, que, en los 10 años de registros, han acumulado más de 200 000 descargas cada uno (figura 5.57).

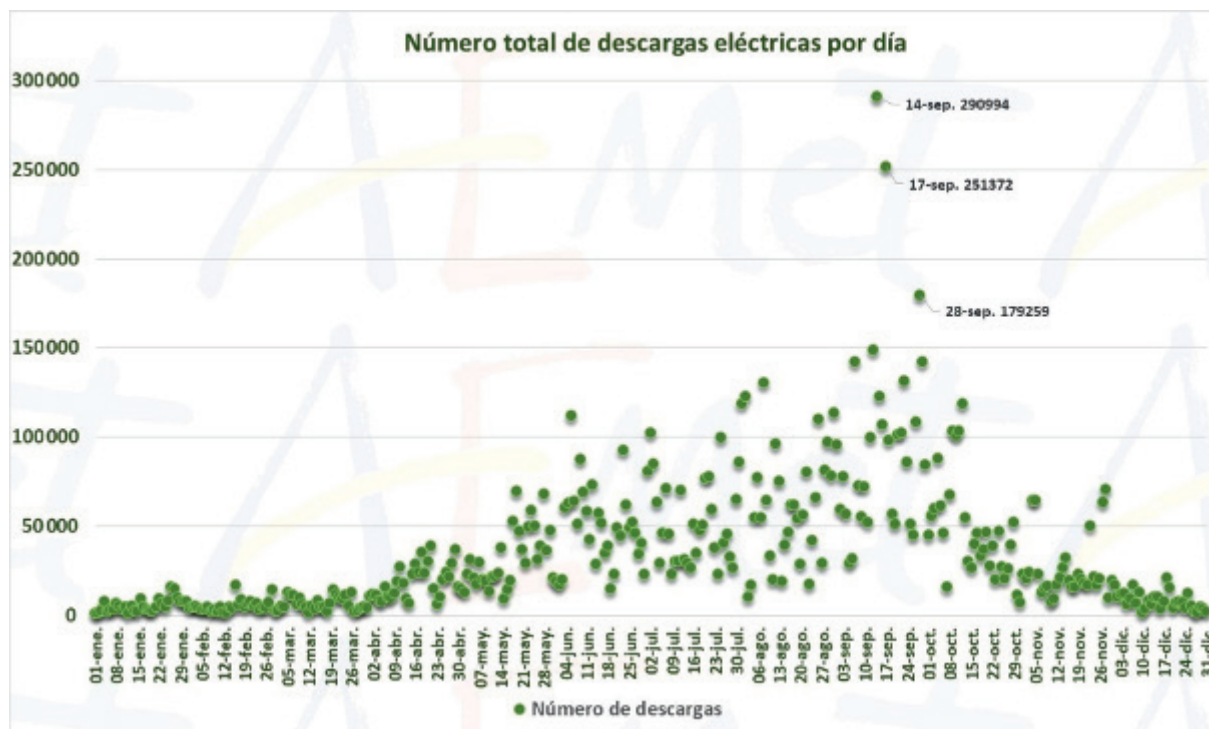


Figura 5.57. Número diario total de descargas eléctricas en la Península y Baleares (periodo 2007-2016).

Fuera del período 2007-2016, el 9 de agosto de 2018 se llegaron a registrar 268 396 descargas en la zona de la Península y Baleares, lo que supone más del doble de descargas que las registradas el día 14 de septiembre de 2009, que es el máximo del período 2007-2016.

5.4.2. Días con mayor número de descargas en las islas Canarias

En Canarias, el 20 % de todas las descargas de las registradas en 10 años lo fueron en solo dos días durante el episodio tormentoso del 29 y 30 de noviembre de 2010, que son con diferencia los días de mayor número de descargas en las islas (figura 5.58). Solo entre ambas fechas se registraron 35 463 descargas en Canarias, aunque realmente las descargas se registraron en poco más de 24 horas, entre las 07 horas del día 29, y las 10 del día 30. Este anómalo y singular episodio, convierten al año 2010 y al mes de noviembre de ese año en los de mayor número de descargas anual y mensual, respectivamente, en Canarias.

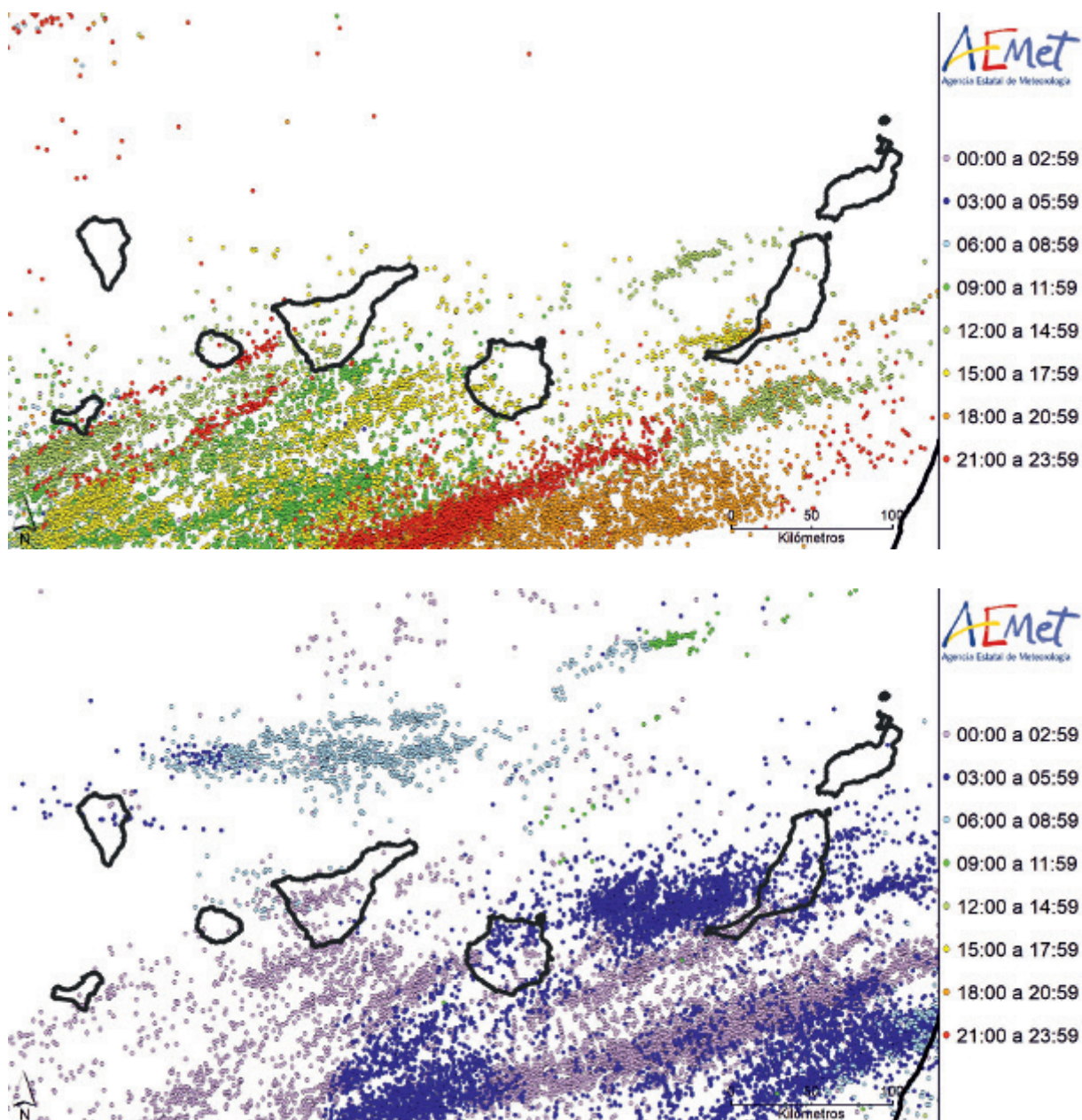


Figura 5.58. Descargas registradas los días 29 (arriba) y 30 (abajo) de noviembre de 2010 por tramos trihorarios (hora UTC).

En las islas Canarias, los días con mayor número de descargas eléctricas (tabla 5.3) se suelen registrar en los meses fríos, y solo en casos excepcionales como el 12 de agosto de 2015, el número de descargas en el área de estudio se puede acercar a las 5000.

Días con mayor número de descargas islas Canarias	
Día	Descargas totales
30 de noviembre de 2010	20 136
29 de noviembre de 2010	15 088
11 de diciembre de 2013	13 750
19 de octubre de 2014	8527
9 de enero de 2014	5746
27 de marzo de 2009	5584
1 de febrero de 2010	5074
12 de agosto de 2015	4710
9 de febrero de 2008	4345
19 de marzo de 2007	4344

Tabla 5.3. Días con mayor número de descargas.

Agrupando todas las descargas por el día del año en las que se han registrado (independientemente del año), se comprueba que la máxima actividad se registra entre el final de noviembre y el principio de diciembre, con un máximo secundario entre enero y febrero (figura 5.58).

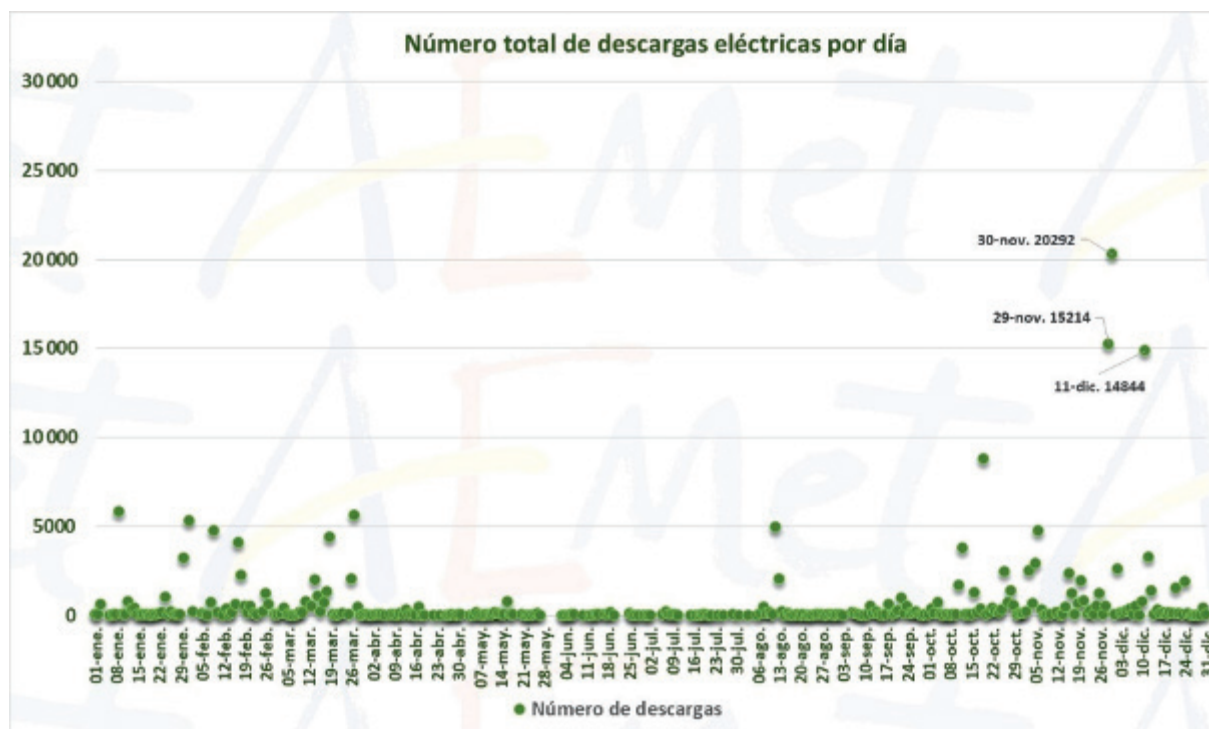


Figura 5.59. Número diario total de descargas eléctricas en Canarias (período 2007-2016).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS



Fotografía de José Antonio Quirantes Calvo®.

- CECIL, D. (2001). «LIS/OTD 0.5 Degree High Resolution Full Climatology (HRFC) [indicate subset used]». Dataset available online from the NASA Global Hydrology Center DAAC, Huntsville, Alabama, U.S.A.
- CHANGNON, S. A. (1985). «Secular variations in thunder-day frequencies in the twentieth century». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 90 (D4), 6181-6194.
- CHANGNON, S. A., CHANGNON, D. y PYLE, R. B. (1988). «Thunder events and cloud-to-ground lightning frequencies». *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 93 (D8), 9495-9502.
- CHANGNON JR, S. A. (1989). «Relations of thunderstorms and cloud-to-ground lightning frequencies». *Journal of climate*, 2 (8), 897-921.
- CHRISTIAN, H. J., BLAKESLEE, R. J., BOCCIPPIO, D. J., BOECK, W. L., BUECHLER, D. E., DRISCOLL, K. T., GOODMAN, S. J., HALL, J. M., KOSHAK, W. J., MACH, D. M. y STEWART, M. F. (2003). «Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector». *JGR Atmospheres*, 108, D1, pp. ACL 4-1 a ACL 4-15.
- CUMMINS, K. I., MURPHY, M. J., BARDO, E. A., HISCOX, W. L., PYLE, R. B. y PIFER, A. E. (1998). «A combined TOA/MDF Technology Upgrade of the U.S. National Lightning Detection Network». *Journal of Geophysical Research*, 103, D8, 9035-9044.
- CZERNECKI, B., TASZAREK, M., KOLENDOWICZ, L. y KONARSKI, J. (2016). «Relationship between human observations of thunderstorms and the PERUN lightning detection network in Poland». *Atmospheric Research*, 167, 118-128.
- FINKE, U. y HAUF, T. (1996). «The characteristics of lightning occurrence in southern Germany». Inst. für Physik der Atmosphäre.
- FLEAGLE, R. G. (1949). «The audibility of thunder». *J. Acoust. Soc. Am.*, 21 (4), 411-412.
- GÓMEZ VIÑAS, P. (2015). «Climatología de tormentas en Galicia a partir de datos de la red de detección de descargas eléctricas». Publicación interna de la Delegación Territorial de AEMET en Galicia. (A Coruña).
- GONZÁLEZ MÁRQUEZ, J. (2006). «Climatología de tormentas en España». Foro Meteored.
- KINGFIELD, D., CALHOUN, K. y DE BEURS, K. (2017). «Antenna structures and cloud-to-ground lightning location: 1995-2015». *Geophysical Research Letters*, 44, 5203-5212.
- LÓPEZ DÍAZ, J. A., PÉREZ PUEBLA, F. y ZANCAJO RODRÍGUEZ, C. (2012). «Tendencias y homogeneidad en las series de descargas eléctricas del período 2000-2011». *Boletín de la Asociación Meteorológica Española*, 38, 34-39.
- MÄKELÄ, A., ENNO, S. E. y HAAPALAINEN, J. (2014). «Nordic Lightning Information System: Thunderstorm climate of Northern Europe for the period 2002-2011». *Atmos. Res.*, 139, 46-61. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.01.008.
- MORA GARCÍA, M. A. (2012). «La actividad tormentosa en Castilla y León: Análisis microescalar y modelos conceptuales». Tesis doctoral. Universidad de Salamanca.
- NAG, A., MURPHY, M., SCHULZ, W. y CUMMINS, K. (2015). «Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques». *Earth and Space Science*, 2, 65-93, doi: 10.1002/2014EA000005.

- ORVILLE, R., HUFFINES, G. R., BURROWS, W. R. y CUMMINGS, K. L. (2011). «The North American Lightning Detection Network (NALDN). Analysis of Flash Data: 2001-09». *Mon. Wea. Rev.*, 139, 1305-1322.
- PÉREZ, A., WICKER, L. y ORVILLE, R. (1997): «Characteristics of cloud-to-ground lightning associated with violent tornadoes». *Weather and Forecasting*, 12, 401-410.
- PÉREZ PUEBLA, F. (2004). «Cooperación entre las redes de rayos de España y Portugal. (Asociación Meteorológica Española, Ed.)». XXVIII Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española.
- PÉREZ PUEBLA, F. y ZANCAJO RODRÍGUEZ, C. (2008). «La frecuencia de las tormentas eléctricas en España». *Revista de la AME*, 5, 21.
- PÉREZ PUEBLA, F., ZANCAJO RODRÍGUEZ, C. y GONZÁLEZ MÁRQUEZ, J. (2008). «Aproximaciones al concepto de tormenta eléctrica». *Calendario meteorológico 2008*. Instituto Nacional de Meteorología. Diciembre 2007.
- POELMAN, D. R., SCHULZ, W., KALTENBOECK, R. y DELOBBE, L. (2017). «Analysis of lightning outliers in the EUCLID network». *Atmos. Meas. Tech.*, 10, 4561-4572.
- RIVAS SORIANO, L., DE PABLO, F. y TOMAS, C. (2005). «Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula». *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 67, 1632-1639.
- SANZ, R., HERNÁNDEZ, M., JOSÉ, A., PRZEOR, M., GONZÁLEZ, P., PRATS, N. y BARRERA, E. (2017). «Análisis de los rayos registrados en Canarias en el período 2006-2015». En: *Calendario Meteorológico 2017* (págs. 241-254). Madrid: Agencia Estatal de Meteorología.
- SHEATHER, S. J. (1992). «The performance of six popular bandwidth selection methods on some real data sets (with discussion)». *Comput. Statist.*, 7, 225-281.
- SHEATHER, S. J. (2004). «Density estimation». *Statistical Science*, 19 (4), 588-597.
- SILVERMAN, B. W. (1986). «Density Estimation for Statistics and Data Analysis». London: Chapman & Hall.
- SCHULZ, W., DIENDORFER, G., PEDEBOY, S. y POELMAN, D. R. (2016). «The European lightning location system EUCLID — Part 1: Performance analysis and validation». *Natural hazards and earth system sciences*, 16, 595-605, <https://doi.org/10.5194/nhess-16-595-2016>, 2016.
- SCHULZ, W., DIENDORFER, G., PEDEBOY, S. y POELMAN, D. R. (2016). «The European lightning location system EUCLID — Part 2: Observations». *Natural hazards and earth system sciences*, 16 (2), 607-616.
- UMAN, M. A. y KRIDER, E. P. (1989). «Natural and Artificially Initiated Lightning». *Science, New Series*, 246, 4929, 457-464.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (1956). «World Distribution of Thunderstorm Days». WMO/OMM, No. 21, TP 2, Geneva.



ANEXO I

Características de la red de detección de descargas eléctricas de AEMET

Fotografía “Tormenta seca” de Fernando Bullón Miró® tomada en la playa del Puig (Valencia) en 2010.

Existen distintos sistemas de detección de rayos ubicados en tierra, cuyas características permiten detectar descargas nube a tierra, nube a nube o intranube, o ambos tipos. El sistema empleado por AEMET pertenece a los conocidos como de alcance medio o de precisión, cuyos sensores están espaciados a distancias inferiores a 400 km, y por tanto son idóneos para regiones como la península ibérica. Estos sensores están diseñados para detectar las emisiones en baja frecuencia (LF). En estas frecuencias, la señal electromagnética generada por la descarga es intensa y además su propagación por la superficie terrestre sufre poca atenuación. Se utiliza una tecnología combinada IMPACT (*Improve Performance for Combined Technology*), que consiste en determinar en primer lugar la dirección de donde procede la señal electromagnética (MDF, *Magnetic Direction Finder*). Mediante la información de al menos dos sensores, y trazando sobre un mapa las correspondientes líneas de procedencia de la descarga, la intersección de las mismas determinaría en primera instancia su localización.

De forma complementaria, se determina el tiempo de propagación de la señal hasta el sensor, que dependerá de la proximidad del sensor al punto de impacto superficial de la descarga. Mediante la información de dos sensores, el tiempo de retardo en la llegada de señal (TOA, *Time of Arrival*) entre ellos determina una hipérbola con las posibles ubicaciones de la descarga. Cada par de sensores que detectan la descarga determinarán una hipérbola, y la intersección de las distintas hipérbolas fijará la posible ubicación de la descarga. Se necesitan al menos 4 sensores para que la localización no sea demasiado ambigua, utilizando finalmente la intersección de círculos en vez de hipérbolas para optimizar la ubicación. Ambas técnicas, MDF y TOA se utilizan de forma combinada para obtener una mayor precisión en la localización de la descarga.

La probabilidad de detección de rayos nube a tierra de este tipo de redes oscila entre un 85 % y un 95 %, decayendo a valores entre un 70 % y un 90 % para las descargas (estas diferencias se deben a la multiplicidad del rayo, ya que basta una sola descarga de las múltiples asociadas al rayo para detectarlo). En cuanto a la precisión en la localización, la mediana (valor central de la serie de valores ordenados de menor a mayor) oscila entre los 100-200 m y 1 km. Así mismo, la mediana de la intensidad de pico (valor máximo de intensidad eléctrica registrada) tiene un error de precisión del orden de un 15-20 % y la precisión en cuanto a la determinación de la polaridad (signo de la descarga eléctrica), es del 100 %.

La red de detección de rayos (REDRA) de AEMET está compuesta por tres subsistemas encargados respectivamente de la detección de descargas eléctricas (SDDE), el control de los equipos, el análisis y localización de sus medidas (SCAL) y la explotación de estos datos (CATS), que comprende el almacenamiento y explotación de los datos. El SDDE está formado por veinte equipos detectores de descargas eléctricas (IMPACT ES /ESP y LS7000/7001 de la empresa VAISALA) distribuidos por el territorio peninsular (14) y los archipiélagos balear (1) y canario (5). Estos detectores captan, analizan y discriminan la radiación electromagnética generada en las descargas eléctricas atmosféricas ocurridas dentro de su alcance, entre 50 y 1000 km. El SCAL recibe los datos, localiza en el espacio y en el tiempo las descargas y determina sus características físicas, permite el control y configuración de los equipos detectores, etc.

A través de acuerdos de colaboración, también se recibe información de cuatro equipos pertenecientes a la red de detección de descargas eléctricas del servicio meteorológico portugués (IPMA), y de diez equipos de la red del servicio meteorológico francés (Météo-France). Estos datos son integrados en el sistema y permiten cubrir de forma óptima toda la península ibérica y los mares circundantes (figura A1.1). Entre los actuales proyectos de innovación tecnológica llevados a cabo por AEMET

está el referente a la renovación de la red REDRA. Con este proyecto se pretende asegurar la operación continuada de la red de rayos y mejorar la explotación de sus datos. En el marco del proyecto se están sustituyendo algunos de los equipos detectores por otros con tecnología superior, se está dotando de un sistema SCAL adicional que permita actividades de desarrollo sin comprometer la operación y se está implementando un nuevo sistema de explotación más moderno que el utilizado hasta el momento.

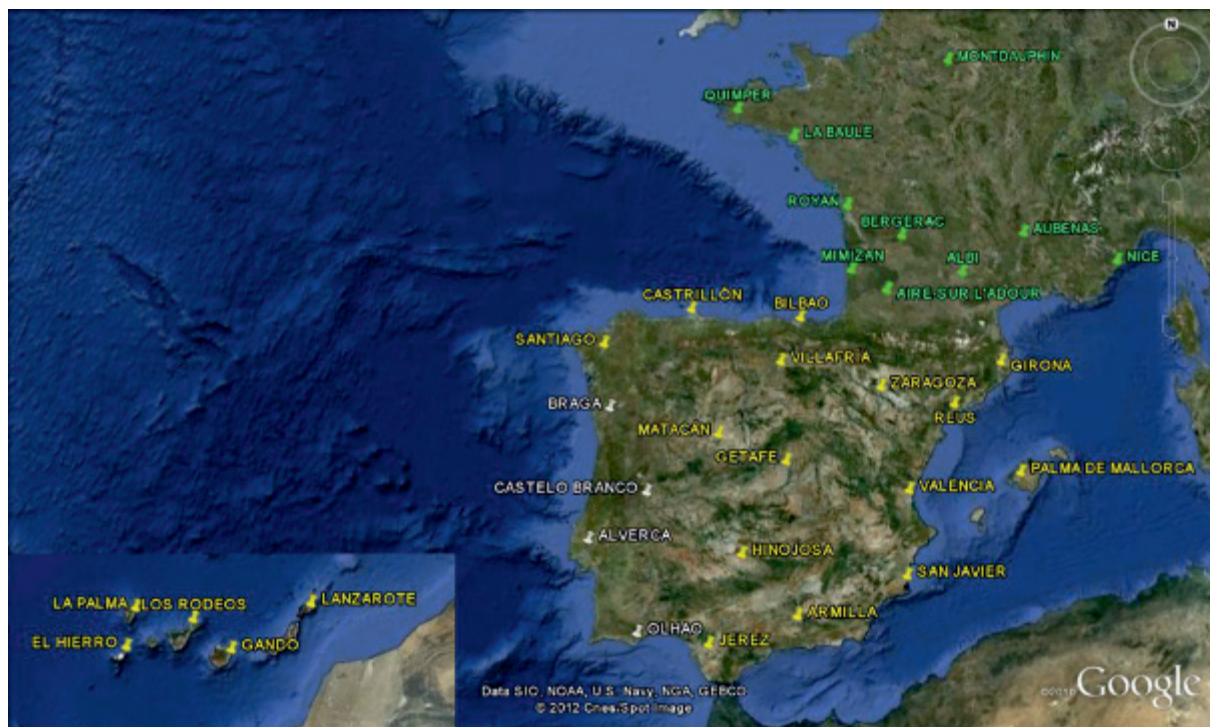


Figura A1.1. Localización de los sensores de detección de rayos de las diferentes redes. Amarillo: AEMET; blanco: Instituto de Meteorología de Portugal; verde: MetéoFrance.

Los sensores ubicados en la Península y Baleares están integrados en la red europea EUCLID (*European Cooperation for Lightning Detection*), que agrupa los datos de los 164 sensores de sus 27 países miembros (figura A1.2). Esta red comenzó en 2001 y actualmente sus datos son procesados en tiempo real en Austria (ALDIS, *Austrian Lightning Detection and Information System*), existiendo un centro de respaldo en Alemania. Los datos de esta red europea obtienen mejores parámetros de calidad que las propias redes nacionales, al incorporar la información procedente de detectores transfronterizos. Los sensores, que utilizan el mismo rango de frecuencias, son de características similares y compatibles, aunque desde 2006 se está produciendo una gradual renovación incorporando equipos de última generación que está próxima a finalizar. Este hecho, junto a la mejora de los algoritmos de cálculo, la mayor precisión de los sensores que miden el tiempo de llegada de la señal y las correcciones locales de los sensores por condiciones orográficas de propagación, han supuesto una gran mejora en la precisión de la localización de las descargas.

Pese a la evolución tecnológica, la detección y localización del punto de impacto de las descargas eléctricas está sujeta a cierta incertidumbre. Los sensores tienen determinados errores sistemáticos, pero además un error aleatorio, tanto en la estimación de la dirección de procedencia de la señal (error angular) como en la estimación del tiempo de retardo de llegada de la señal (error temporal). Por tanto, en cualquier red de detección, existe cierta incertidumbre en la localización exacta de las descargas.

Suponiendo que este error (en la dirección de procedencia y en la medida del tiempo) tuviera una distribución gaussiana (normal) y teniendo en cuenta los distintos sensores que intervienen en la localización de una descarga, para cada descarga se puede definir una elipse en cuyo interior existe una

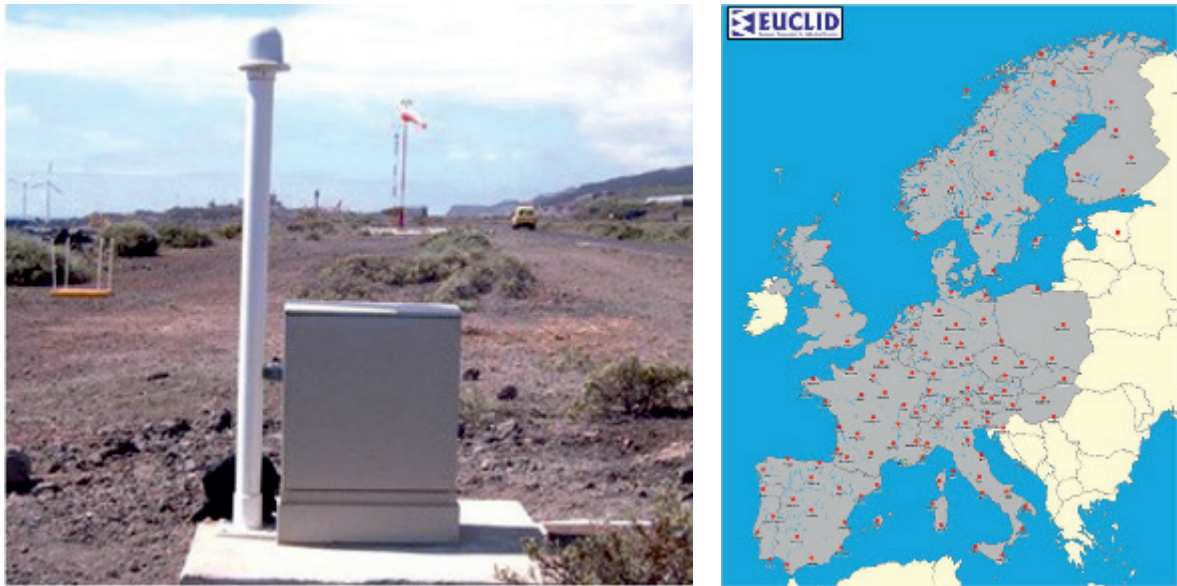


Figura A1.2. Equipo detector rayos (izqda.). Equipos detectores que conforman la red EUCLID (dcha.).
Fuente: AEMET y EUCLID.

probabilidad del 50 % de que se encuentre el punto de impacto verdadero de la descarga. Los semiejes mayor y menor de esta “elipse de confianza” son parámetros que se calculan de forma individual para cada descarga, y por tanto, la orientación y dimensión (semieje mayor y semieje menor) de la elipse indican en cierto modo la precisión estimada en la localización (figura A1.3). Si se desea que la probabilidad de encontrar la descarga en una elipse determinada sea superior al 50 %, es necesario aplicar un factor de escala a los semiejes de la elipse, multiplicando estos valores por 1,82 para obtener una probabilidad del 90 % y por 2,87 para una probabilidad del 99 % respectivamente.

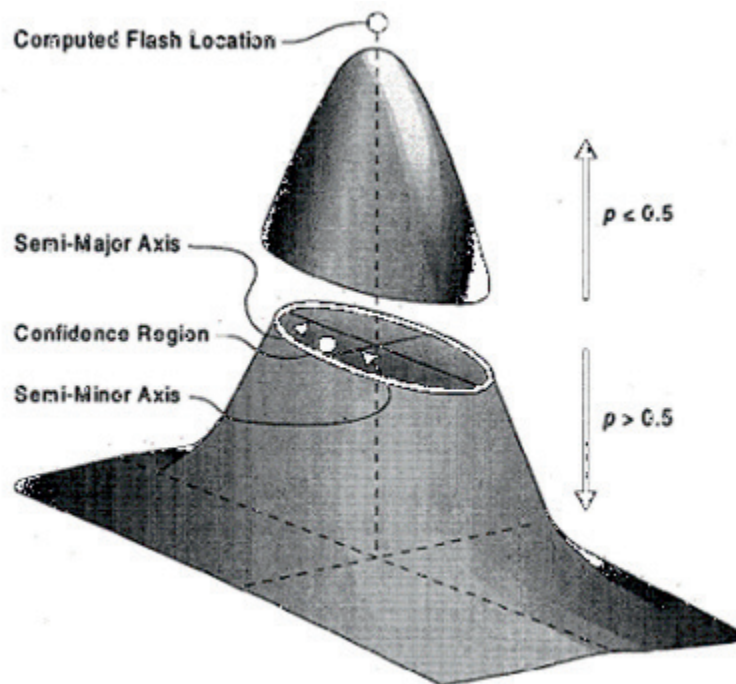


Figura A1.3. Distribución gaussiana bidimensional del error de localización a partir de la posición estimada (más probable) de la descarga (pico de la campana). El percentil 50 de la elipse de error se obtiene cortando la campana de distribución al nivel de probabilidad de 0,5. Fuente: CUMMINGS et al., 1998.

Las características que definen una red de detección de rayos son la probabilidad de detección de descargas o rayos y la precisión en la localización de las mismas. Ambos valores van a depender de la posición relativa de la descarga respecto a los detectores, del número de sensores que detectan la descarga y de la intensidad de la misma. Respecto a la red de detección de descargas eléctricas de AEMET se estima que actualmente la precisión en la localización es de unos 500 m y que la eficiencia de detección es del 90 %.

La precisión en la localización está muy relacionada con el valor del semieje mayor de la elipse de confianza (a menor valor del semieje mayor medio de las descargas, la red será más precisa). En la figura A1.4 se puede observar la precisión estimada de la red EUCLID. Otro parámetro utilizado para determinar la calidad de los datos individuales viene definido por el parámetro χ^2 (también denotado como “chi-cuadrado”, o “chi-2”), que consiste en una medida normalizada del “grado de acuerdo” o “consistencia” entre todos los sensores que intervienen en la localización de una descarga. Idealmente, esta distribución estadística debería tener un valor medio y mediana de 1, pero en la realidad, debido a los errores angulares y temporales de los diferentes sensores que intervienen, esto no sucede así. Según la bibliografía consultada, valores individuales entre 0 y 3 se consideran buenos, y entre 3 y 10 aceptables.

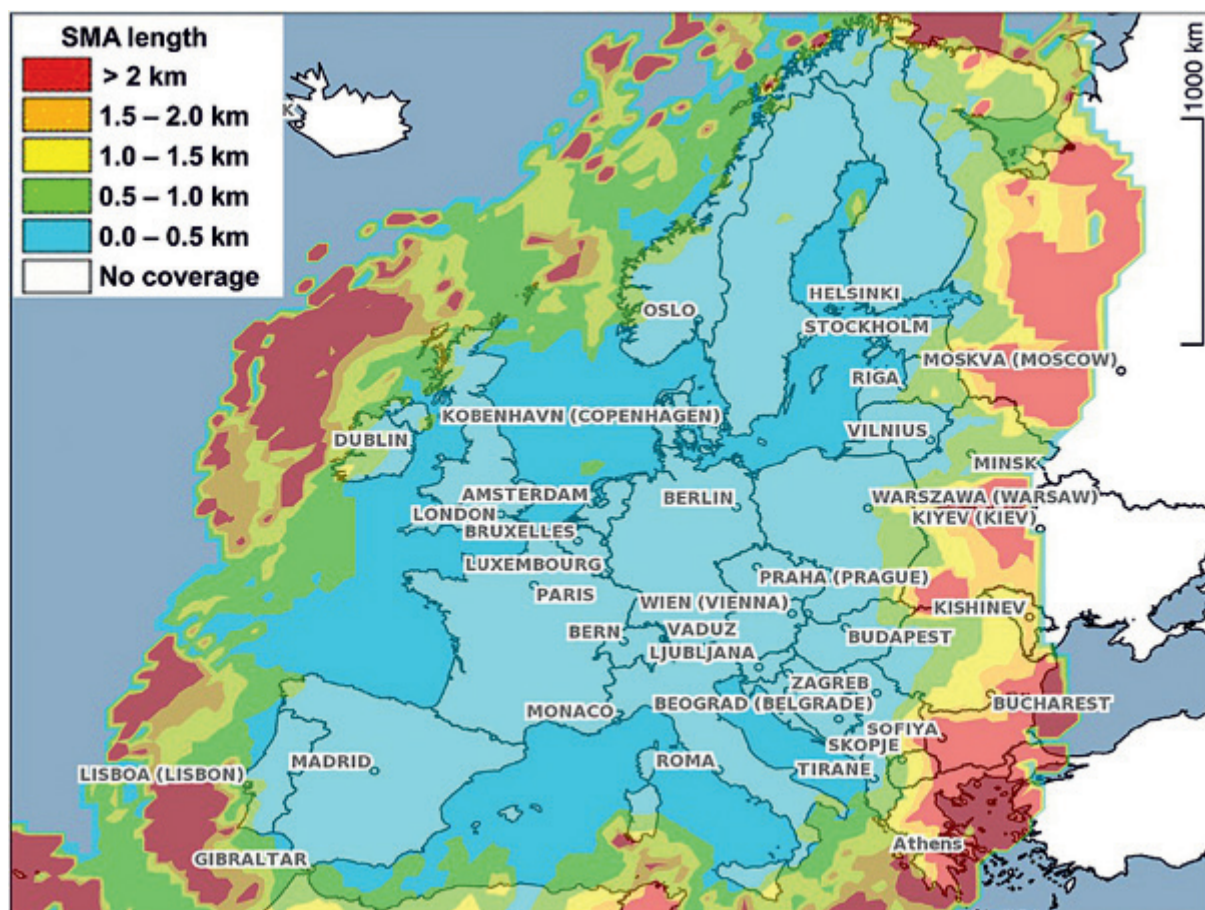


Figura A1.4. Mediana de los valores de semieje mayor (Median of the semimajor axis, SMA) de las elipses de confianza (probabilidad del 50 %) para descargas nube-tierra en la región de cobertura de la red europea EUCLID (resolución 50×50 km) en 2013. Fuente: NAG et al., 2010.



ANEXO II

**Datos seleccionados.
Parámetros de calidad y precisión de la red.
Filtrado de datos**

Tormenta en Ayora (Valencia). Imagen de David Ávila® (@meteoayora).

La red de detección de descargas eléctricas en la Agencia Estatal de Meteorología comenzó su operatividad en el año 1992, mejorando de forma muy significativa la calidad de sus datos a partir del año 2000, coincidiendo con la renovación de los equipos (tecnología GPS, *Global Positioning System*, en el análisis de la señal de detección) y nuevos algoritmos en la metodología de localización de las descargas. Para poder representar mapas de variables espaciales es fundamental disponer de buena precisión en la geolocalización, por ello, para el presente trabajo se consideraron inicialmente las descargas eléctricas registradas entre los años 2000 y 2016 para la Península y Baleares y a partir de 2007 para el caso de Canarias (año de la implantación de la red en el archipiélago). Esta serie de 17 años (10 para Canarias) se considera homogénea, pese a que la red ha sufrido cambios en cuanto a los sensores (LÓPEZ *et al.*, 2012), y sus datos son de buena calidad. No obstante, como resultado del análisis espacial de la calidad de los datos que se expone a continuación, se ha reducido el estudio de la Península y Baleares al período 2007-2016 con objeto de lograr la máxima representatividad. De igual forma, la ventana espacial inicialmente elegida se ha reducido ligeramente con el mismo objetivo de lograr una mayor representatividad.

Anexo II.A. Preselección de la ventana espacial y filtrado de datos

Los datos proceden inicialmente de dos áreas representativas (una para la Península y Baleares y otra para Canarias). El entorno de la Península y Baleares preseleccionado es el limitado por los paralelos 45°N y 34°N y los meridianos 11°W y 5°E (figura A2.1), que abarca 2 181 000 km². En esos 17 años (2000-2016), la base de datos de descargas eléctricas ofrece un total de 25 528 942 registros.

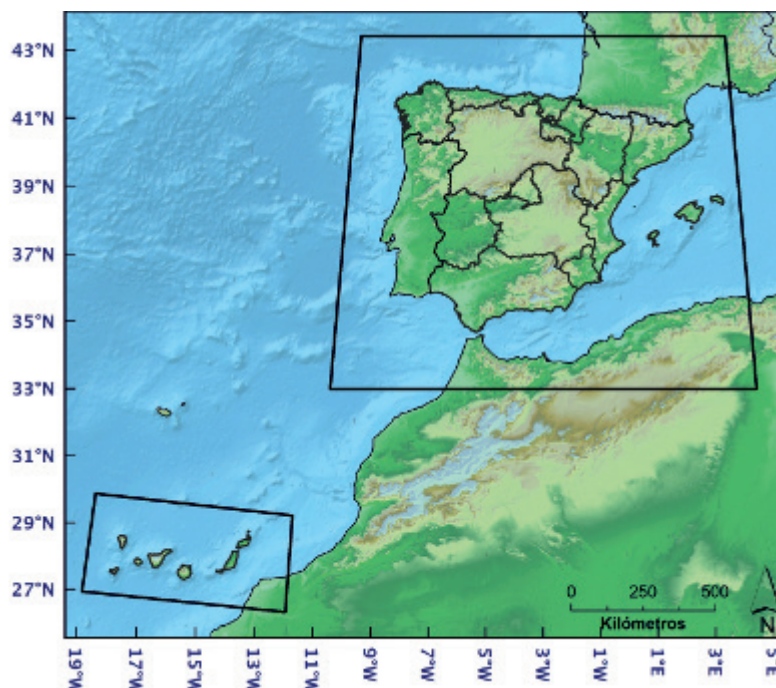


Figura A2.1. Preselección de dos ventanas geográficas rectangulares de las que se han extraído los datos de descargas inicialmente.

Para la zona de las islas Canarias se ha preseleccionado el área comprendida entre los paralelos 30°N y 27°N y los meridianos 19°W y 12°W (figura A2.1), que abarca una superficie de 260 232 km², aproximadamente ocho veces y media inferior a la ventana geográfica de la Península e islas Baleares. En el período de 10 años (2006-2016) la base de datos de descargas eléctricas ofrece un total de 178 247 registros.

Una vez obtenidos todos los datos, se ha procedido a filtrar y eliminar aquellos que tienen un parámetro chi-cuadrado superior o igual a 10, ya que se consideran datos erróneos (probablemente por sensores mal calibrados, ruidos inusuales o errores en el ángulo de posicionamiento de la descarga o en el instante de su detección).

En total, se han eliminado 420 718 registros de la Península y Baleares lo que supone el 1,65 % del total, aunque el número de descargas consideradas erróneas (chi-cuadrado mayor o igual a 10) ha ido descendiendo en el tiempo, de forma que a partir del año 2007 el porcentaje de registros erróneos es inferior al 1 % del total anual. De los registros de las islas Canarias se han eliminado 1543 lo que supone el 0,87 % del total, con lo que la base de datos final de Canarias cuenta con un total de 176 704 registros. La distribución anual de descargas consideradas erróneas se puede apreciar en la figura A2.2.

En cuanto a los parámetros que definen la calidad de la red, chi-cuadrado y semieje mayor de la elipse, estos también han ido mejorando con el tiempo, correspondiendo a la implementación de avances tecnológicos en los equipos detectores. Con objeto de ver la evolución de estos parámetros con el tiempo se han generado mapas y extraído los parámetros estadísticos del semieje mayor y χ^2 en el promedio anual (figura A2.3). Los parámetros estadísticos de cada descarga, aunque obedecen a un patrón espacial determinado, están irregularmente distribuidos por todo el territorio. Por ello no se obtienen datos satisfactorios si se interpolan directamente, así que es necesario hacer una suavización previa para estudiar estos patrones.

A tal fin, se generaron dos mallas de puntos, una para la Península y Baleares y la otra para las islas Canarias. Cada punto está separado de los contiguos, tanto en latitud como en longitud, por distancias de 0,25°, de forma que la ventana geográfica de estudio inicial de la Península e islas Baleares y la de las islas Canarias, quedan cubiertas por una nube de puntos, 2816 para el caso de la Península e islas Baleares y 336 para las islas Canarias. Para cada uno de los puntos de la malla generada, se han calculado dos campos, el parámetro chi-cuadrado medio dentro de una distancia geodésica de 0,5° de radio alrededor de cada punto y el eje mayor medio con los mismos criterios anteriores. Así, la malla de puntos obtenida contiene la estadística media anual de los parámetros de calidad de la red en un radio de 0,5° alrededor de cada punto, aproximadamente un radio de 50 km.

Una vez obtenida esa malla de puntos, ya sí que puede procederse a la interpolación de los datos con una función *kriging*. Con ello se pretende representar espacialmente dos parámetros utilizados en la bibliografía consultada y por el mismo fabricante de los equipos para evaluar la calidad y precisión de la red.

El resumen del χ^2 medio y del semieje mayor medio de cada año del período estudiado es el representado en los gráficos siguientes (figura A2.3).

Para la Península e islas Baleares se ve un claro descenso con el tiempo de ambos parámetros, con una tendencia a la estabilización a partir de 2007, que es el año de inicio de las estadísticas para el caso de las islas Canarias. A partir de 2007, el χ^2 medio anual está estabilizado en valores próximos a 1,2, y el semieje mayor queda estabilizado alrededor de 2 km. Esta tendencia observada puede estar relacionada con las progresivas mejoras que se han ido introduciendo en la red, las mejoras en el filtrado de datos erróneos o sospechosos, y sobre todo con la integración de las redes ibéricas, con la inclusión de los datos registrados por Portugal, y la instalación de la red de Canarias. Como resultado, se ha mejorado la precisión de la red en el suroeste de la zona de estudio peninsular. Esta colaboración internacional integrando redes de observación una vez más se ha demostrado fundamental para la optimización y mejora de las redes de observación.

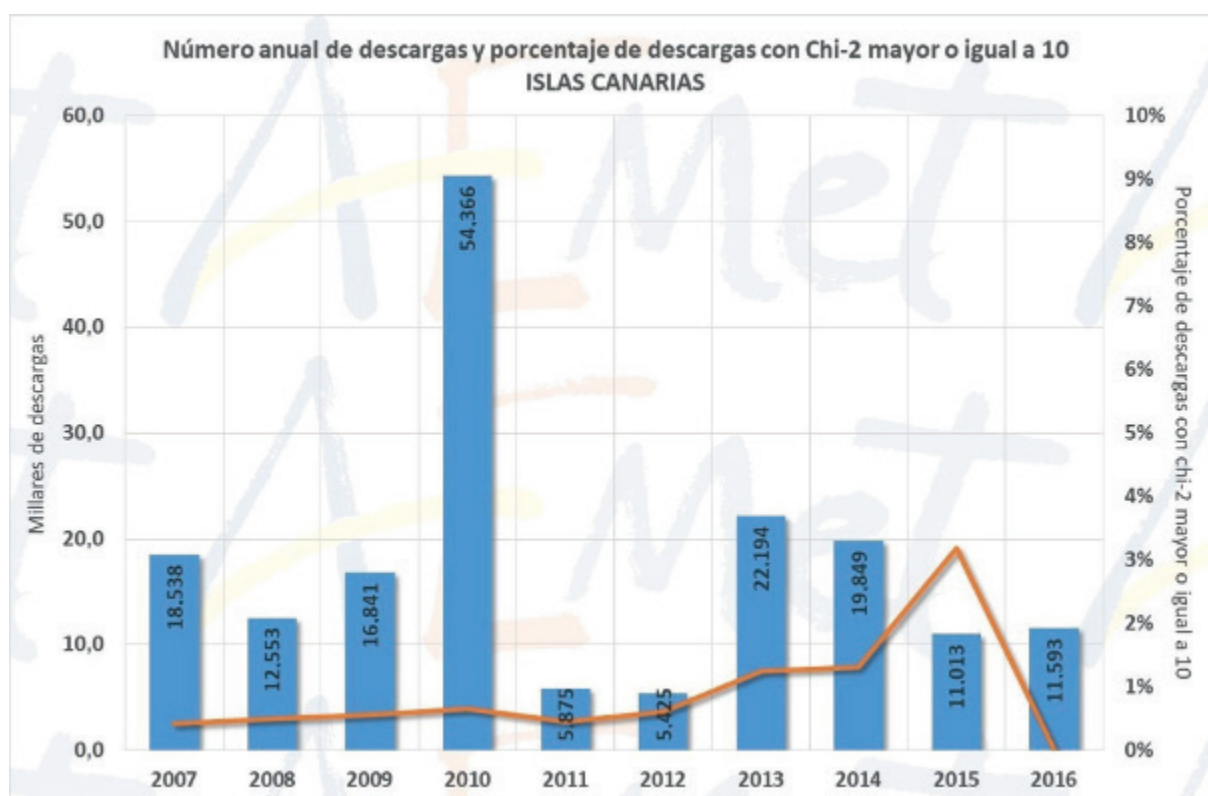
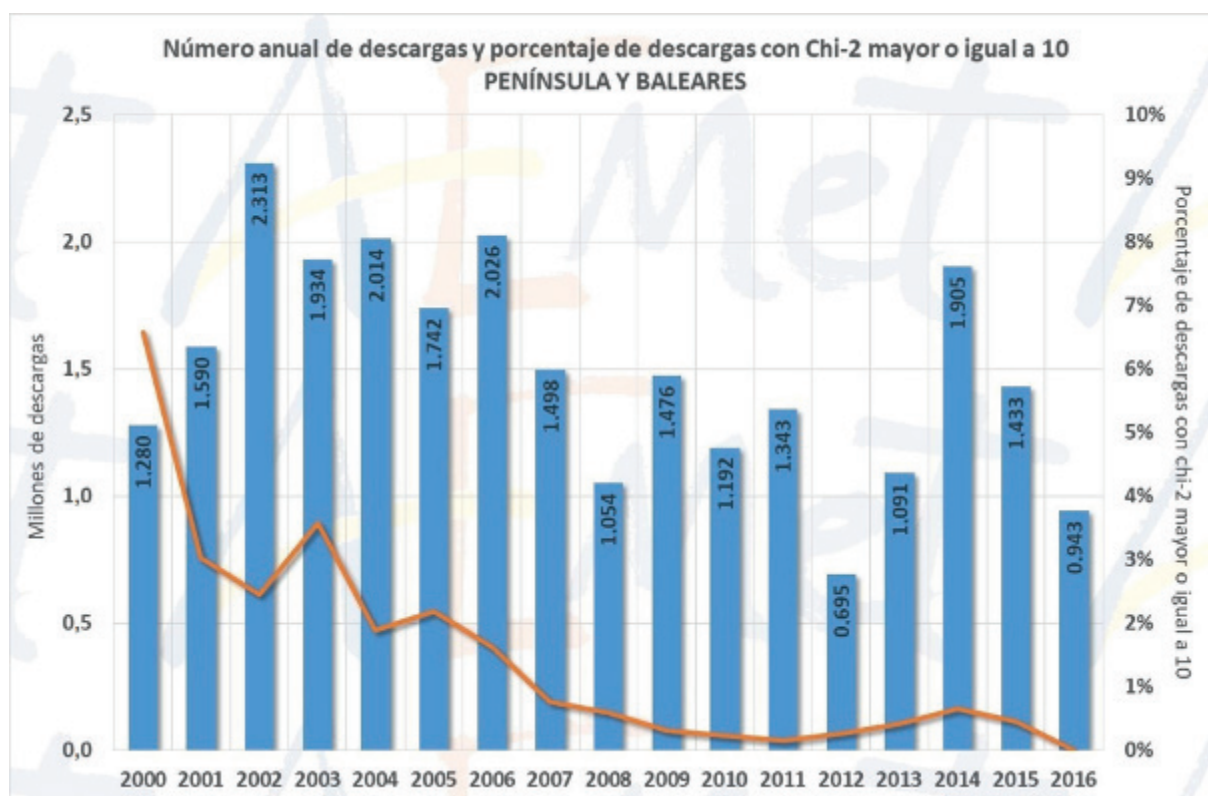


Figura A2.2. Número anual de descargas registradas y porcentajes de descargas con el parámetro χ^2 mayor o igual a 10 (registros erróneos eliminados), en la Península y Baleares (arriba) y en las islas Canarias (abajo).

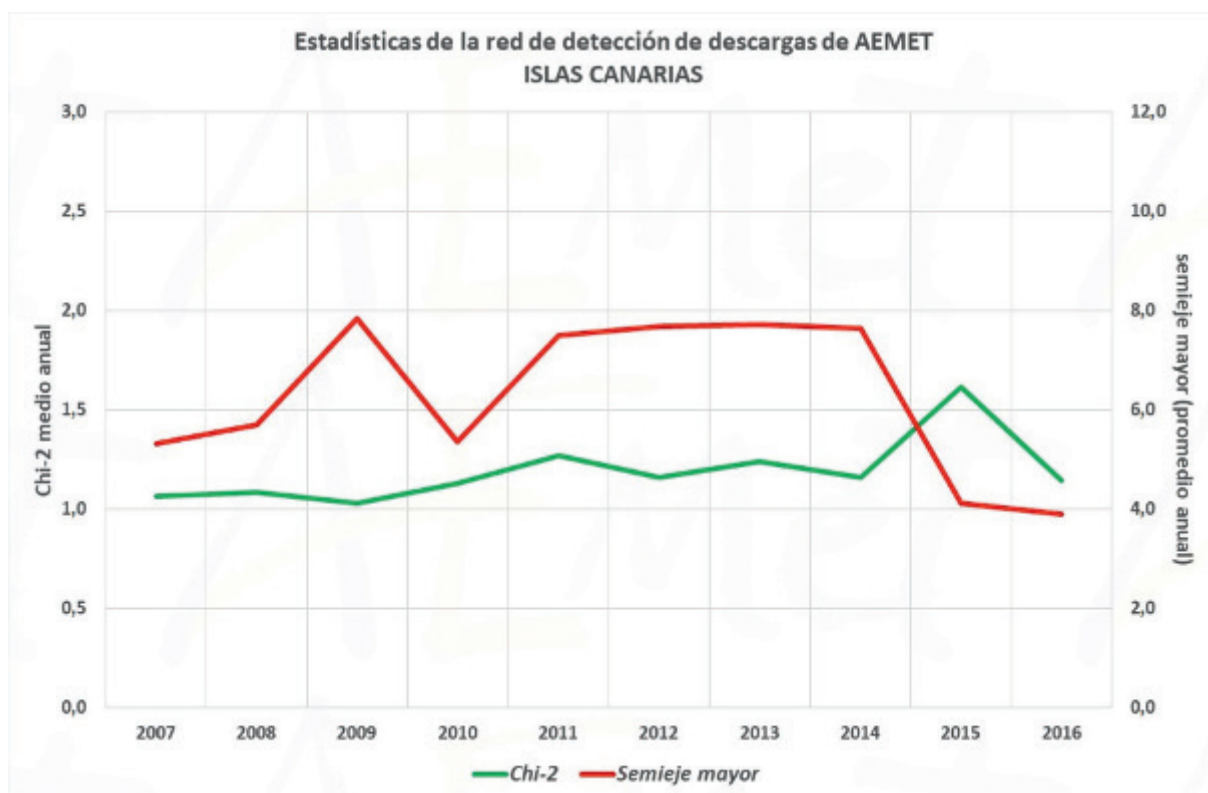
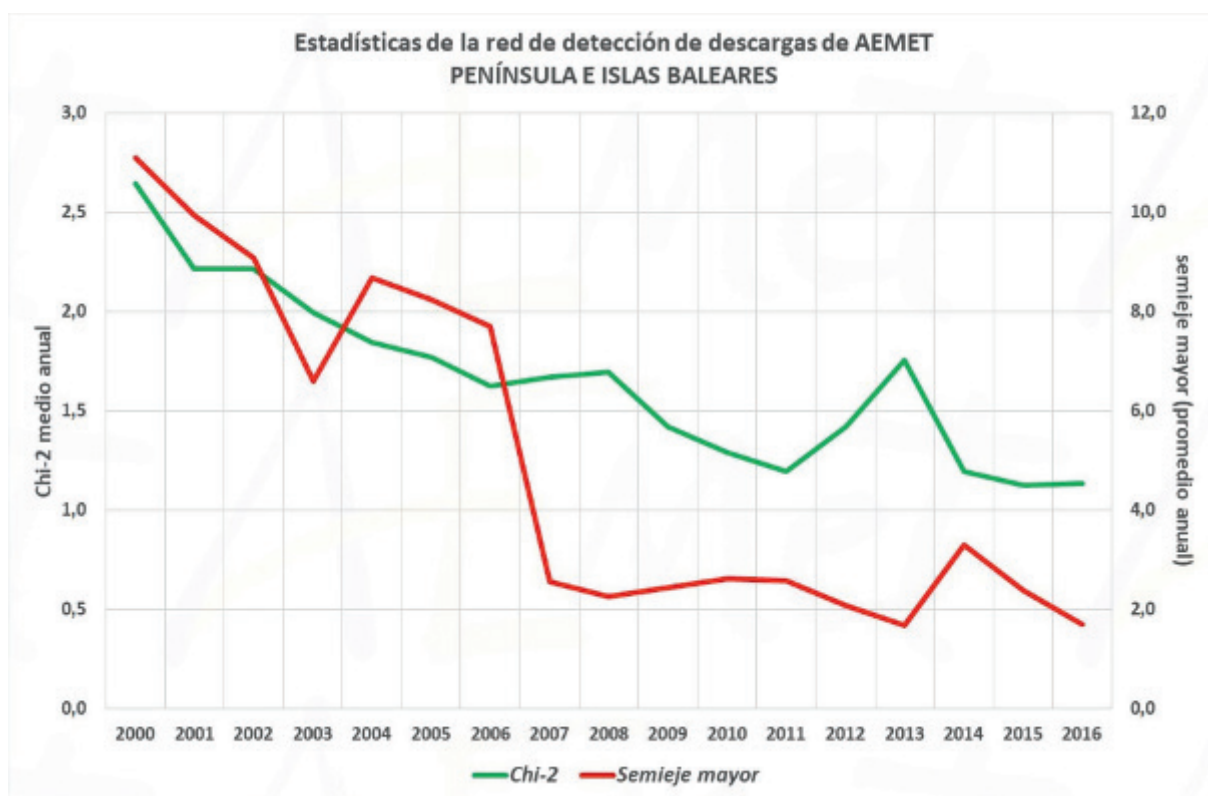


Figura A2.3. Evolución en el tiempo del χ^2 (chi-2) y la longitud del semieje mayor asociado a cada descarga, que son los dos parámetros que determinan la calidad de cada descarga detectada por el sistema.

Para las islas Canarias, desde la puesta en marcha de la red, los parámetros de calidad están muy estables durante todo el período, aunque se ve una mejora en la precisión de la localización a partir de 2015, cuando desciende de valores medios anuales de 8 km a valores medios anuales de 4 km. Desde 2007, el chi-2 medio anual está estabilizado en valores próximos a 1,1.

Esa mejora en los parámetros de calidad medios también se puede observar mediante mapas promedio anuales (figuras A2.4 y A2.5) en las dos zonas de estudio (2000-2016 para Península y Baleares y 2007-2016 para Canarias). En la representación se han integrado artificialmente ambas zonas en un único mapa para una mejor comparación a partir de 2007 en que se disponen datos de Canarias. En las figuras A2.6 y A2.7 aparecen todos los mapas promedio anuales de las variables chi-2 y semieje mayor durante el período 2000-2016 así como un mapa promedio para todo el período.

La elección del período 2007-2016 se justifica por la máxima calidad de estos datos como se ha mencionado. De forma visual se pueden comparar los mapas promedio del período largo (2000-2016) con los del período de 10 años (2007-2016), figuras A2.4 y A2.5. Es notable el cambio que se produce en el suroeste peninsular a partir del año 2007 en ambos parámetros. En general, la precisión de la red (semieje mayor medio) siempre se ha mantenido alta en el cuadrante nordeste. También destaca que esa precisión no se llega a alcanzar de forma estable por el norte, oeste y sur. No se debe olvidar que la operatividad de todos los sensores de la red simultáneamente es difícil de lograr, de forma que este hecho influye también en la distribución espacial y temporal de los parámetros de calidad.

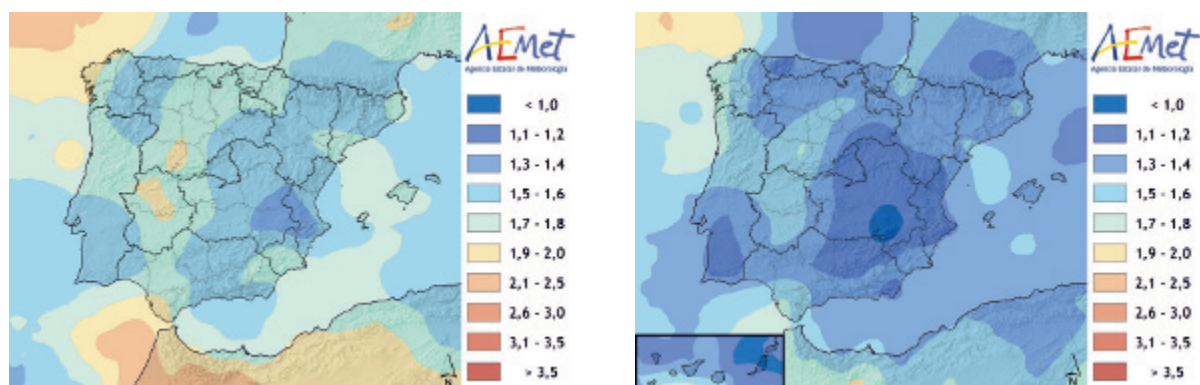


Figura A2.4. Promedio del parámetro chi-2 en un radio de 0,5° alrededor de cada punto de rejilla del período 2000-2016 (izquierda) y del período 2007-2016 (derecha) en un radio de 0,5° alrededor de cada punto de rejilla.

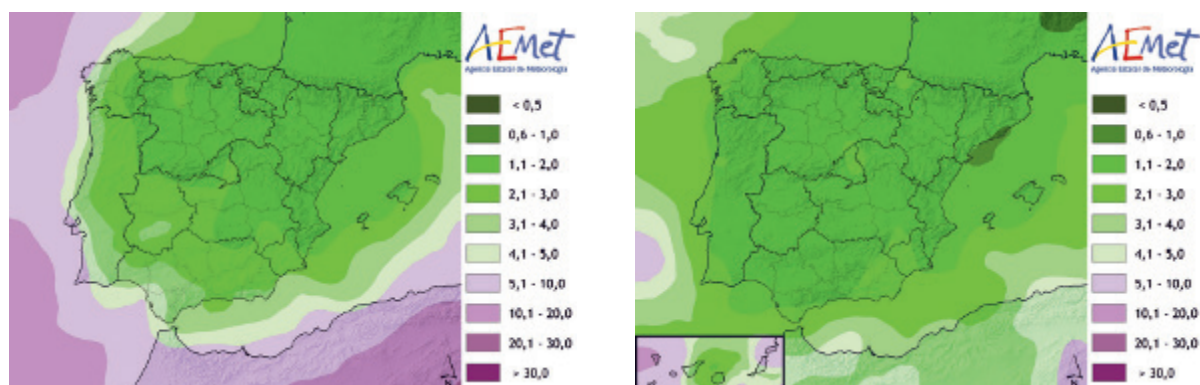


Figura A2.5. Promedio del parámetro semieje mayor (km) en un radio de 0,5° alrededor de cada punto de rejilla del período 2000-2016 (izquierda) y del período 2007-2016 (derecha) en un radio de 0,5° alrededor de cada punto de rejilla.

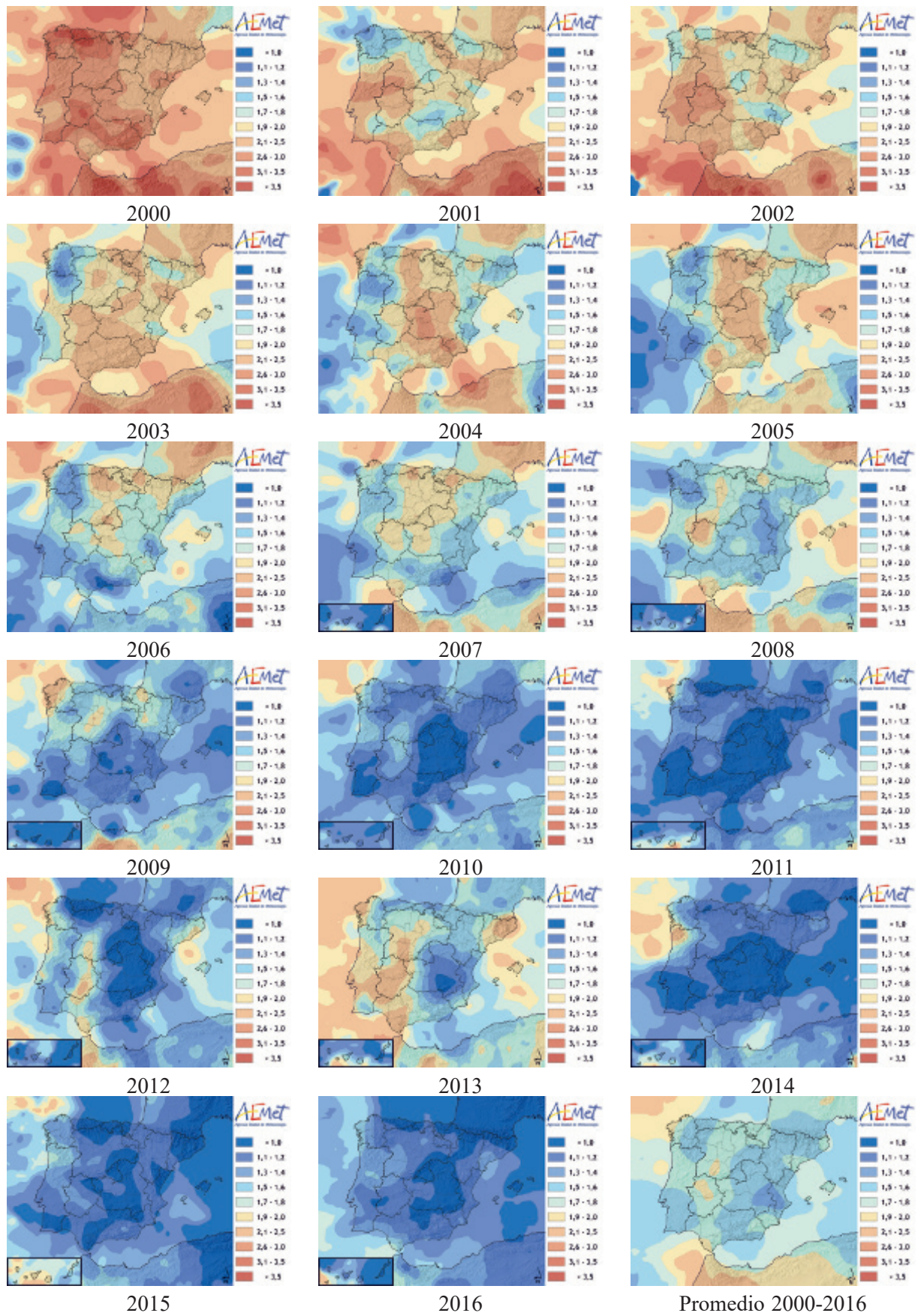


Figura A2.6. Promedio anual del parámetro chi-2 en un radio de $0,5^\circ$ alrededor de cada punto de rejilla. Años 2000 a 2016 y promedio 2000-2016.

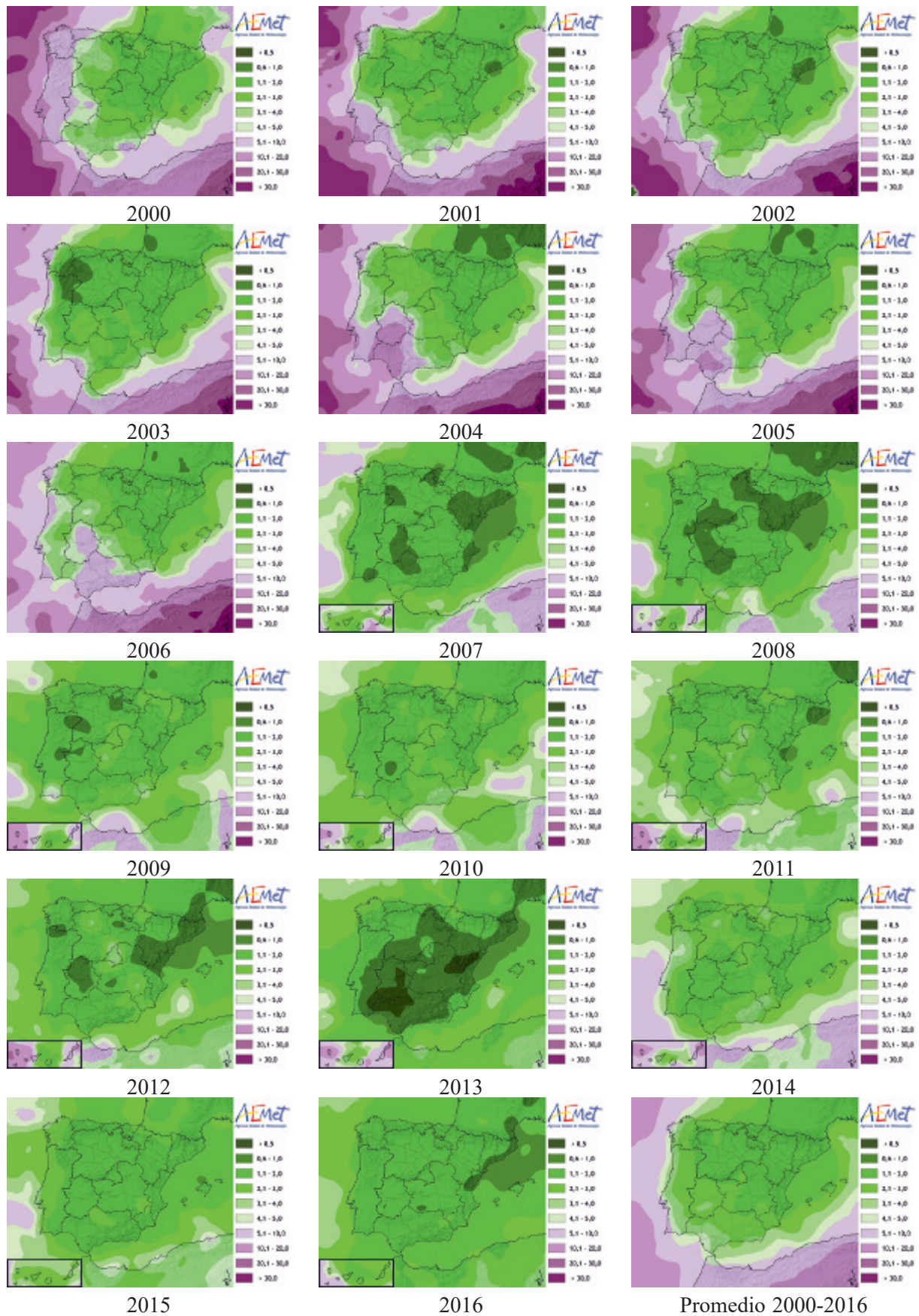


Figura A2.7. Promedio anual del parámetro semieje mayor (km) en un radio de 0,5° alrededor de cada punto de rejilla. Años 2000 a 2016 y promedio 2000-2016.

Anexo II.B. Datos utilizados para la generación de esta climatología

La conclusión de los análisis de los parámetros de calidad tanto en el tiempo como en el espacio es que, sobre todo para el caso de la Península y Baleares, es aconsejable reducir tanto la extensión de la rejilla de datos a emplear como el período temporal. La ventana seleccionada abarca una extensión que comprende las zonas terrestres de la Península, Ceuta, Melilla y Baleares, por lo que se ha reducido la zona inicial de estudio en un 1° por el norte, oeste y sur, quedando igual por el este. Respecto a la ventana geográfica inicial de Canarias no se ha modificado.

En cuanto a la extensión temporal, se ha considerado que definitivamente el período 2007-2016 es suficientemente homogéneo para trabajar con garantías, además de que coincide con el período de datos para el caso de las islas Canarias, por lo que con estos criterios se puede construir una climatología de descargas y tormentas homogénea para las dos redes, la de la Península e islas Baleares y la de las islas Canarias, de forma que se pueden construir mapas y gráficos que permitirán comparar la distribución de descargas y tormentas en ambos territorios. A pesar de haber reducido la rejilla, para realizar interpolaciones se van a emplear los datos externos para así mejorar la resolución en los bordes, a pesar de que finalmente solo se represente el área indicada.

En definitiva, los datos finales con los que se ha trabajado responden a las siguientes características:

- descargas nube-tierra filtradas (datos de la base de datos de AEMET con $\chi^2 < 10$);
- período 2007-2016;
- ventanas geográficas (figura 3.1):
 - Península-Baleares: 44°N a 35°N y 10°W a 5°E,
 - Canarias: 30°N a 27°N y 19°W a 12°W.

Es conveniente mencionar que la mejora en los sistemas de detección de descargas a lo largo del tiempo ha incrementado la eficiencia en la detección de los eventos de baja intensidad, lo que según varios estudios recientes ha revelado que muchas de esas descargas que actualmente se están tratando como nube-tierra, realmente serían descargas intranube (KINGFIELD *et al.*, 2017). Por tanto, habría que considerar como descargas intranube todas aquellas con polaridad positiva y cuya intensidad fuese inferior a +15 kA, y todas aquellas con polaridad negativa con una intensidad superior a -10 kA. De acuerdo con esos criterios, según Kingfield, el 46,5 % de las descargas con polaridad positiva y el 23,7 % de las descargas de polaridad negativa detectadas en Estados Unidos habría que descartarlas por tratarse de descargas intranube. Aplicando esos mismos criterios a los registros que se van a utilizar en esta publicación, una cuarta parte de las descargas totales detectadas en España (el 37 % de las descargas de polaridad positiva y el 23 % de las de polaridad negativa) que están siendo tratadas como descargas nube-tierra, realmente serían intranube.

Mientras se sigue avanzando en estas investigaciones sobre el tratamiento que habría que dar a las descargas de baja intensidad, en esta publicación se van a considerar como descargas nube-tierra todas las descargas que han pasado los filtros de calidad antes descritos, que es como actualmente permanecen archivadas en la base de datos de rayos de AEMET.



ANEXO III

Metodología utilizada para el cálculo de la densidad de descargas eléctricas

Fotografía propiedad de AEMET® realizada por José Antonio Quirantes Calvo.

La densidad, expresada como número de descargas por unidad de superficie, se puede calcular utilizando métodos simples, como, por ejemplo, sumando el número de descargas que caen en el mismo área y posteriormente dividiendo por el tamaño de la celda para obtener el valor de densidad en cada una de ellas. En este trabajo se ha optado por emplear cálculos de densidad con función *kernel*, que se consideran más ajustados a la realidad, ya que con este método se calcula el valor de densidad de descargas para cada celda de la capa de salida a partir de la función núcleo (*kernel*), de forma que el resultado final se ve suavizado debido a que a medida que nos alejamos del punto interpolado disminuye su influencia, mientras que en los otros modelos cada celda tiene un mismo valor numérico, correspondiente al número de descargas que recaen dentro de la superficie de trabajo que se esté considerando, con el resultado de un mapa pixelado, que no se corresponde con una realidad en la que las transiciones no son abruptas sino que se presentan de forma suave. Además, los resultados variarán en función del punto de referencia espacial origen de la partición del espacio en celdas.

La función *kernel* se basa en la función cuadrática que describió SILVERMAN (1986). Las superficies resultantes que rodean a cada punto en la densidad *kernel* se obtienen mediante una fórmula cuadrática con el valor más alto en el centro de la superficie (la ubicación del punto donde se ha registrado la descarga) y se estrechan hasta cero en la distancia de radio de búsqueda o ancho de banda (*bandwidth* en la bibliografía inglesa). Para cada celda de salida se calcula el número total de intersecciones acumuladas de las superficies de expansión individual.

Al igual que muchas técnicas de análisis espacial, las funciones de estimación de densidad de tipo *kernel* (KDE) requieren determinar unos parámetros óptimos de entrada de la función, con el fin de producir una cartografía precisa. En el presente caso, el rendimiento de los estimadores de densidad *kernel* depende fundamentalmente del valor del parámetro de suavizado, comúnmente conocido como radio de búsqueda o ancho de banda. La elección de un radio de búsqueda óptimo es crítico a la hora de obtener unos resultados aceptables, ya que un radio de búsqueda pequeño generará mucho “ruido” en el resultado final, y un radio de búsqueda grande suavizará hasta hacer desaparecer zonas de mesoescala con singularidades meteorológicas, con una densidad de descargas mayor (menor), que la del entorno próximo, como ocurre por ejemplo con la zona del Maestrazgo turolense, donde si se eligiese un radio amplio de búsqueda al hacer los cálculos de densidad, la singularidad meteorológica de esta zona quedaría diluida entre el entorno próximo con menor actividad eléctrica.

En este caso, se va aplicar un radio de búsqueda calculado para el conjunto de todas las descargas de la base de datos depurada, y para cada mapa a realizar (anual, estacional y mensual) utilizando una variante de la regla general de Silverman:

$$h = 0,9 A n^{-1/5}$$

Donde h es el radio de búsqueda o ancho de banda a aplicar en los mapas de densidad, A es el mínimo de distancia estándar de la muestra (rango intercuartílico/1,34)], y n es el número de descargas. Por ejemplo, el ancho de banda obtenido aplicando este criterio a la base de datos de descargas manejada para la Península y Baleares para el mapa de densidad anual es de 14 629 metros y para el caso de Canarias 14 853.

Para la presentación final de los datos se va aplicar una salida de *grid* de 1000 metros de lado y se van a usar distancias geodésicas entre elementos.

ANEXO IV

Metodología utilizada para la estimación del número de días de tormenta

Fotografía propiedad de AEMET® realizada por José Antonio Quirantes Calvo.



En 1956, la Organización Meteorológica Mundial estableció la definición de día de tormenta considerando que ha habido tormenta en un observatorio cuando en un día natural (civil) se ha oído al menos un trueno. Por tanto, un día de tormenta es registrado como tal independientemente del número real de tormentas que haya habido ese día en el observatorio. Cuando se ve el relámpago, pero no se oye el trueno, no se considera que ha habido tormenta en el observatorio, y cuando la tormenta comienza antes de la medianoche y termina después de la medianoche, se computa como dos días de tormenta distintos.

Con este criterio, la consideración de día de tormenta es independiente de la intensidad y duración de las mismas, y lo más importante para el objeto de este trabajo: no se establece un círculo de radio fijo dentro del cual se considera de forma objetiva que ha habido tormenta. La misma Organización Meteorológica Mundial indica que el requisito de que se oiga realmente el trueno, limita el área cubierta por cada punto de observación a un círculo con un radio de unos 20 km, sin más precisión. Analizando los aspectos físicos de la génesis del trueno, se trata de una onda acústica generada por la abrupta expansión del aire debido al momentáneo incremento de presión por las altas temperaturas que se alcanzan durante la descarga inicial. Desde el punto de vista de la mecánica de ondas, la velocidad de propagación del sonido generado durante la formación de la descarga depende de la temperatura del aire y la trayectoria de la onda sónica está sujeta a las leyes de refracción en función del gradiente térmico vertical. Teniendo en cuenta la altura a la que se genera la descarga, se podría calcular la distancia de forma teórica a la que es audible el trueno, aunque existen otros factores a tener en cuenta, como por ejemplo el viento. Por tanto, la distancia máxima audible del trueno dependerá de cada descarga particular en función de las condiciones ambientales.

Desde hace décadas en España existe una red de observatorios principales con personal las 24 horas del día que codifican los días de tormenta de acuerdo a los criterios anteriores de la Organización Meteorológica Mundial. Sin embargo, los datos de días de tormenta contabilizados a partir de esta red no se pueden considerar homogéneos ni en el espacio ni en el tiempo.

Debido a la compleja orografía de España y a que la red de observatorios meteorológicos tiene emplazamientos con características muy diferentes, muchos de ellos situados en sitios ruidosos como aeropuertos o en el centro de las ciudades, y otros situados en zonas aisladas en entornos poco ruidosos, las observaciones convencionales de número de días de tormenta presentan múltiples heterogeneidades. Incluso en una misma estación, diferentes observadores pueden tener percepciones distintas del trueno en un día de tormenta.

En cuanto a evolución temporal, observatorios que estaban en zonas periurbanas hace décadas, han sido absorbidos por la expansión de las ciudades, y lo que antes era un ambiente casi rural, ahora es un emplazamiento urbano, que impide escuchar las tormentas con la misma nitidez que antes. Las nuevas técnicas de construcción, con aislamientos térmicos y acústicos más sofisticados, alteran también las condiciones de observación de tormentas, y el aumento del tráfico aéreo también puede haber alterado la forma en la que se escuchan los truenos de las tormentas y, por tanto, el criterio con el que se notifican en los observatorios de los aeropuertos.

Además, con el desarrollo de automatismos, algunos observatorios principales han dejado de prestar servicio presencial durante las 24 horas, por lo que durante la ausencia de observadores no se codifican este tipo de meteoros tal y como se hacía en décadas pasadas, pudiendo originarse lagunas en la codificación de las tormentas, aunque la estación automática siga registrando otros meteoros como la precipitación, la temperatura, etc.

Paralelamente a la red de observatorios principales, hay una red denominada secundaria, gestionada por personal voluntario, en virtud de la cual también se codifican meteoros como la existencia de tormenta. Pero en estos observatorios los datos no se refieren al día natural, de 00 a 24 horas, sino que se refieren al denominado día pluviométrico, entre las 07 UTC de un día, y las 07 UTC del día siguiente. Muchos de estos observatorios presentan la ventaja de estar ubicados en núcleos pequeños de población, que no han sufrido un crecimiento como el de las grandes ciudades donde se sitúan muchos de los observatorios principales, y los observadores de esta red secundaria, en la mayoría de los casos, suelen ser bastante rigurosos en el registro de datos.

Con estas consideraciones previas, a la hora de trazar una cartografía del número de días de tormenta a partir de las observaciones convencionales no automáticas, surgen los problemas de la heterogénea distribución de la red por el territorio, la ausencia de observatorios en puntos singulares de interés, como son zonas de alta montaña o en el mar, y en general la presencia de observatorios solo en zonas pobladas. Por ello, el análisis del número de días de tormenta a través de datos de teledetección, que cubren todo el territorio, puede ser más completo y permite revelar zonas en las que la frecuencia de tormentas es muy alta (o muy baja), y singularmente diferenciadas del entorno próximo, pero en las que no hay observatorios meteorológicos convencionales. En definitiva, es pertinente la generación de una climatología de días de tormenta con los datos de la red de detección de descargas eléctricas de AEMET.

La construcción de esta climatología de tormentas teniendo en cuenta los datos de la red de descargas eléctricas se basa en determinar el número de días en los que al menos se ha registrado una descarga alrededor de un punto dentro un círculo de radio determinado, por lo que la primera tarea antes de empezar es definir cuál es el radio a considerar, teniendo en cuenta que dentro de ese círculo el observador debería de oír el trueno, y fuera del círculo teórico no oírlo, ya que como se ha comentado previamente, para que se considere día de tormenta en un observatorio no es necesario que haya precipitación en el mismo, sino solo que se oiga el trueno.

Por tanto, como la normativa internacional no establece la distancia exacta a que la se oye el trueno para considerar que ha habido tormenta en un observatorio, el primer objetivo para trazar una cartografía de número de días de tormenta a partir de los datos de la red de detección descargas, es tratar de definir de forma objetiva la distancia a un punto (que podría ser un observatorio meteorológico) desde la que se oye el trueno. Esta tarea no es sencilla y ha sido abordada desde hace décadas por diversos grupos de investigación internacionales tanto en Europa como en Estados Unidos, que han puesto de manifiesto los problemas que van a surgir al estudiar este asunto, algunos de ellos ya citados en este apartado:

1. Horarios diversos en los observatorios principales, que no siempre han mantenido presencia humana durante 24 horas, lo que ha podido suponer pérdida de datos.
2. Crecimiento de la actividad aérea, que ha podido afectar a la calidad de las observaciones de días de tormenta en observatorios meteorológicos de aeropuertos.
3. Crecimiento de ciudades que ha implicado que observatorios principales que antes estaban en la periferia de la urbe, ahora hayan quedado dentro del núcleo urbano, en muchas ocasiones rodeados de vías con mucho tráfico.
4. Cambios en el aislamiento acústico de las oficinas meteorológicas que pueden dificultar la audición del trueno de la tormenta dentro de las mismas.
5. La orografía que rodea el observatorio también implica que el trueno se oiga a distancias considerablemente distintas. Observatorios en zonas altas suelen presentar más facilidad para notificar tormenta que los observatorios en fondos de valle.

Por tanto, el problema inicial a la hora de realizar una climatología y cartografía de días de tormenta en función de los datos de la red de descargas es el siguiente: ¿a qué distancia se oye el trueno de una tormenta desde un observatorio? O, al menos, ¿cuál es la distancia media a la que se oye el trueno de una tormenta desde un observatorio de la red española? Determinar esa distancia a la hora de realizar una climatología de días de tormenta es fundamental, ya que, por ejemplo, si se toma un radio de 10 km

alrededor del punto de observación para considerar día de tormenta en la Península, en zonas al sur de los Pirineos orientales (nordeste de Huesca y norte de Lleida y Girona), que son las de mayor número de días de tormenta en España, habría un promedio de 37 días de tormenta al año, pero por cada kilómetro que se redujese o aumentase el radio, el número de días se reduciría o aumentaría respectivamente en aproximadamente 2.

Por ejemplo, si se considera día de tormenta cuando la descarga cae dentro de un círculo de 8 km alrededor del punto de observación en la zona de más días de tormentas en España, en los Pirineos orientales, habría 33 días de tormenta (4 menos que si se considera el radio de 10 km), y si se considera día de tormenta cuando la descarga cae dentro de un círculo de 12 km alrededor del punto de observación, en la zona de más días de tormentas en España habría 41 días de tormenta. Es por eso por lo que resulta muy importante antes de realizar cálculos establecer la distancia de consideración de día de tormenta.

De forma aproximada, el trueno que se genera a una altitud de 4 km, rara vez se escucha más allá de 25 km de distancia, y si se genera a más baja altitud, el trueno será oído a menos de 25 km (FEAGLE, 1949). Variables como la cizalladura del viento o la existencia de inversiones térmicas (en una zona con inversión térmica el alcance de la onda sonora es mayor), o factores invariables como la orografía, hacen que el rango máximo de audición del trueno varíe mucho dependiendo del lugar y del momento, de acuerdo a los aspectos teóricos de mecánica de ondas anteriormente señalados.

Por tanto, ya se tiene una primera referencia objetiva: 25 km sería el límite físico máximo desde el que se puede oír el trueno, pero en general en la mayoría de las ocasiones la distancia desde la que se oye el trueno es mucho menor, y así ha quedado reflejado en los estudios que se han hecho intentando hacer un cálculo objetivo de la distancia desde la que se oye el trueno de una tormenta, que han considerado en general radios de entre 10 km y 20 km. La propia Organización Meteorológica Mundial ya limitó el área cubierta por cada punto de observación a un círculo con un radio de unos 20 km.

Los estudios de la audibilidad del trueno sugieren que estos se escuchaban a distancias de 8 y 19 km (CHANGNON, 1989). Otros autores establecen otros valores: entre 15 km y 20 km (FINKE, 1996); 11,3 km (MÄKELÄ *et al.*, 2014) en el caso de los países nórdicos indicando que para su entorno correlaciona bien con los datos convencionales basados en observaciones humanas, o un valor medio de 17,5 km (CZERNECKI *et al.*, 2015) en un estudio que relacionaba observaciones de días de tormenta contenidas en informes SYNOP y los datos de la red de detección de descargas de Polonia.

En España, se ha trabajado con radios de 10 km con resultados satisfactorios (PÉREZ PUEBLA, 2008), e incluso valores menores como entre 5 y 6 km (SANZ *et al.*, 2017). En Galicia se obtuvo un círculo de 12 km de radio como el más adecuado para los observatorios de la comunidad autónoma gallega, para lo que cruzaron datos de observación convencional con datos de la red de descargas (GÓMEZ VIÑAS, 2015).

Al igual que se ha hecho en varios de los estudios citados anteriormente, para establecer el radio medio del círculo dentro del cual se notifican tormentas en España, se van a correlacionar los datos de las observaciones convencionales que están anotadas en el Banco Nacional de Datos Climatológico de AEMET del período 2007-2016 (el mismo período que el de la base de datos de descargas empleada en esta publicación), con los datos de la red de descargas eléctricas. El método ha sido el siguiente:

1. Se han seleccionado los datos de los observatorios de la red principal de AEMET, y se les ha sometido a un control de calidad, ya que no todos los observatorios disponen de personal en horario de 24 horas o durante los 365 días del año para cifrar meteoros, aunque muchos de ellos, sobre todo en capitales de provincia medianas y pequeñas, a pesar de tener un horario inferior a 24 horas, siguen prestando atención a los meteoros que se producen fuera de su horario de trabajo para anotarlos al día siguiente. Otros, sobre todo situados en grandes ciudades, no lo hacen.
2. Se han completado los datos de los observatorios de la red principal de AEMET con datos de la red termopluiométrica secundaria que cifraron meteoros entre el período 2007-2016 sin presentar ninguna laguna. Los datos de estos observatorios se consideran muy importantes, ya

que básicamente proceden de zonas rurales no cubiertas por observatorios con personal propio de AEMET. Son estaciones gestionadas por observadores muy expertos y comprometidos que ofrecen garantía de observación continua de meteoros. Además, los datos de estos observatorios se han sometido a un control de calidad, y se ha procurado introducir datos de observatorios de calidad contrastada situados en zonas singulares con gran densidad de descargas.

3. Con los criterios anteriores se han seleccionado finalmente los datos de 188 observatorios de la Península, islas Baleares y ciudades autónomas de Ceuta y Melilla, de los cuales se ha calculado el promedio anual de días de tormenta en el período 2007-2016.
4. Para cada observatorio seleccionado se ha calculado el número medio de días de tormenta en el período 2007-2016 a tenor de los datos de la red de descargas de AEMET. Se ha considerado día de tormenta aquel en el que al menos se ha registrado una descarga dentro de un círculo de radio de 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14 y 15 km alrededor del punto de observación. A medida que se aumenta el radio de búsqueda alrededor del punto de observación, aumenta el número de días de tormenta. En este punto hay que precisar que en la base de datos manejada se han eliminado 299 descargas que se han considerado erróneas o cuanto menos dudosas, por producirse la mayoría en aire claro, sin nubosidad, y habría que considerarlas por tanto como resultados anómalos del sistema automático de detección. Esas 299 descargas solo representan un 0,002 % del total de la base de datos y además tienen una distribución aleatoria dentro de la ventana geográfica seleccionada, por lo que no afectan a los mapas de densidad de descargas, pero sí que afectan al número total de días de tormenta, ya que una única de esas descargas anómalas dentro del círculo alrededor de un observatorio representa un día de tormenta, día que no es computado si solo se ha producido esa descarga y se ha eliminado de la base de datos al considerarse errónea.
5. Se ha obtenido el valor absoluto de la diferencia entre el dato realmente observado con los criterios de los puntos 1, 2 y 3, y el valor calculado en cada uno de los radios indicados en el punto 4.
6. Al mínimo de cada uno de los 11 valores obtenidos en el punto anterior se le ha asignado el radio de búsqueda correspondiente, que será por tanto el radio más ajustado a las observaciones meteorológicas de cada observatorio.

Hay que destacar que algunos de estos observatorios, a pesar de pertenecer a la red principal, no son observatorios con horarios de 24 horas, sin embargo muchos de ellos están situados en capitales de provincia de tamaño mediano o pequeño, lo que facilita que a pesar de la ausencia de los observadores del puesto de trabajo, la profesionalidad de estos deriva en que el cifrado de meteoros no se ve afectado por el turno de trabajo, ya que los datos notificados y registrados en el Banco Nacional de Datos Climatológico son coherentes con las estimaciones del entorno.

Una vez explicado el método de determinación del radio de notificación de tormentas en la Península e islas Baleares, surge el mapa de la figura A4.1, en el que se representa en formato gráfico la distancia a la cual se notifican tormentas a partir de los registros de los 188 observatorios seleccionados y teniendo en cuenta los cálculos efectuados con los datos de la red de descargas eléctricas de AEMET.

El promedio de la distancia utilizada para la notificación de tormenta en la superficie del territorio es de 10,1 km. Este será, por tanto, el valor que se utilizará para realizar de forma objetiva la cartografía de número de días de tormenta en la Península e islas Baleares.

Para el caso de Canarias, la tarea de establecer un radio alrededor del cual se notifican tormentas es más compleja que para la Península. Primero porque es un área más pequeña, lo que dificulta la posibilidad de disponer de un número suficiente de observatorios de calidad contrastada que cifren meteoros y, en concreto, que cifren la existencia o no de tormenta durante las 24 horas del día. Otra dificultad añadida para el caso de Canarias es que, al igual que ocurría con las descargas, hay muy pocas tormentas, lo que también complica la tarea de hacer una buena correlación entre datos manuales basados en observaciones humanas y datos automáticos basados en los registros de la red de descargas, sobre todo debido a que en una población reducida de datos, una estadística de 10 años puede ser insuficiente.

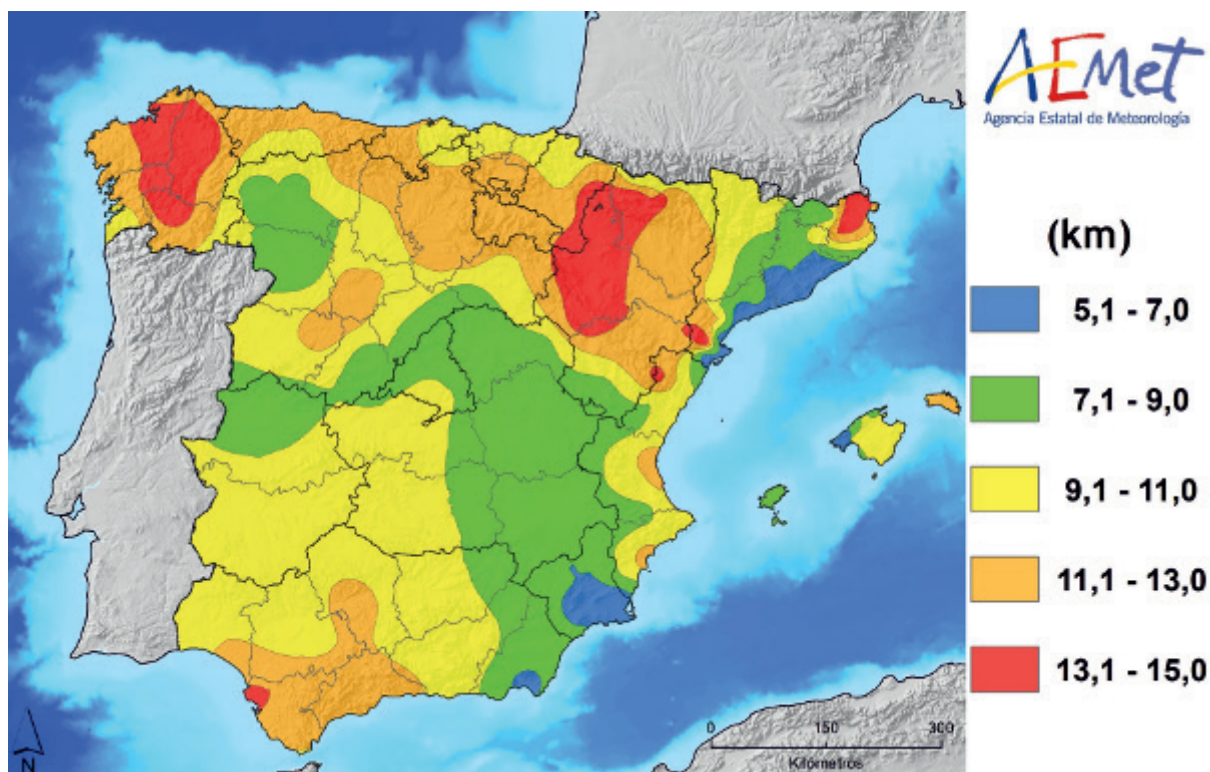


Figura A4.1. Radio en kilómetros alrededor de cada punto del territorio dentro del cual se notifican tormentas en la Península y Baleares.

Con los mismos criterios que se establecieron para la Península, se han seleccionado finalmente los datos de 12 observatorios de las islas Canarias, de los cuales se ha calculado el promedio anual de días de tormenta en el período 2007-2016.

El promedio de la distancia utilizada para la notificación de tormenta en Canarias es de 8,9 km, inferior al de la Península. Este será por tanto el valor que se utilizará para realizar de forma objetiva la cartografía de número de días de tormenta en las islas Canarias.

Como conclusión, la observación y notificación de tormenta por observadores está sometida a múltiples incertidumbres, como son las condiciones de audibilidad del observatorio, las condiciones atmosféricas que condicionan la propagación del sonido, la situación geográfica del observatorio, y muchos otros factores subjetivos. Todos estos condicionantes indican las ventajas de emplear la red de descargas eléctricas para realizar una cartografía de días de tormenta, ya que una vez establecido el radio de búsqueda de descargas alrededor de cada punto del territorio, queda establecido un criterio uniforme y objetivo para la definición de día de tormenta en todo el territorio, criterio que además está calculado teniendo en cuenta las observaciones convencionales realizadas de acuerdo a los criterios de la Organización Meteorológica Mundial.

Sin embargo, es necesario mencionar que podría darse la circunstancia de escuchar un trueno procedente de una descarga nube-nube o intranube, por tanto, no detectada por la red de detección de descargas eléctricas, que en principio solo registra las descargas nube-tierra.

Con el criterio del cálculo del radio de búsqueda empleado, se procede a contar el número de días en los que se ha registrado al menos una descarga dentro de un círculo de área de 320,5 km² con centro en el punto de observación para el caso de la Península y Baleares, y de 248,8 km² con centro en el punto de observación para el caso de las islas Canarias.

Mientras que en los mapas de densidad del capítulo 4 se contaba el número de descargas registradas en un área determinada, independientemente del número de días en los que se hubiesen registrado esas

descargas, para el caso de la elaboración del número de días de tormenta del capítulo 5 no interesaba el número de descargas registradas, sino el número de días en los que se ha registrado alguna descarga.

Gráficamente, la figura A4.2 representa de forma esquemática el modelo conceptual de cálculo de número de días de tormenta. En la imagen de la izquierda se han registrados 13 descargas, pero solo se consideraría un día de tormenta, en la imagen de la derecha se han registrado 9 descargas en 4 días diferentes, por lo que a pesar de haber menos descargas, se considera que se han producido 4 días de tormenta.

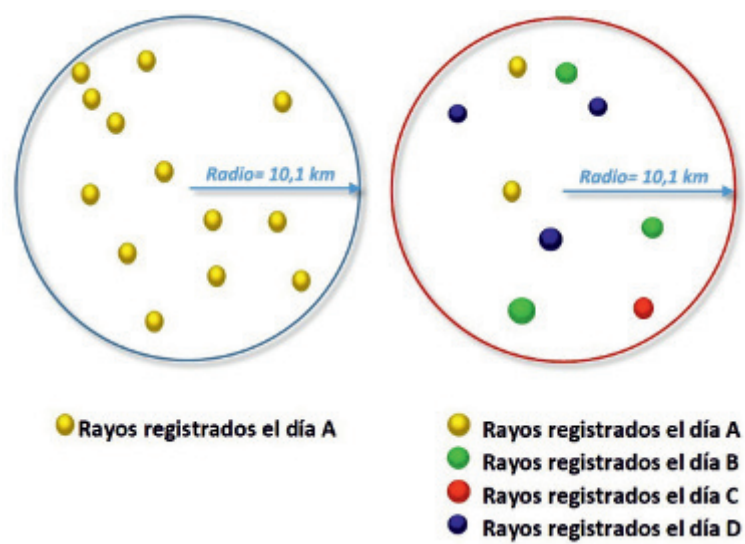


Figura A4.2. Modelo conceptual de cálculo de número de días de tormenta.

Anexo IV.A. Ejemplos de radios estimados para la consideración de tormenta en observatorios

A continuación se exponen varios ejemplos del proceso de obtención del radio de cifrado de tormentas en alguno de los 188 observatorios seleccionados.

En el observatorio del aeropuerto de Barcelona, el promedio anual de días de tormenta anotado en el banco de datos climatológico es de 12 días. Teniendo presentes las estimaciones de días de tormenta de la red de rayos, en el aeropuerto de Barcelona se notifica tormenta cuando se registran rayos dentro de un círculo de radio inferior a 5 km. Por tanto, en este observatorio se notifican tormentas cuando estas están ya muy cercanas.

Observatorio del aeropuerto de Barcelona										
Promedio de días de tormenta observado en el periodo 2007-2016										
12 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
13	14	16	18	19	20	22	24	26	27	29
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
1	2	4	6	7	8	10	12	14	15	17
Radio estimado de cifrado de tormenta en el aeropuerto de Barcelona: 5 km										

Tabla A4A.1. Observatorio del aeropuerto de Barcelona: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

Este patrón de cifrado de tormentas cuando estas se hallan muy cerca del observatorio, que es el que se ha estimado para el aeropuerto de Barcelona, es un patrón que se repite en muchos observatorios

del litoral mediterráneo, desde Cataluña hasta Almería, salvo el litoral de la Comunidad Valenciana. Por ejemplo, para el observatorio del aeropuerto de Reus, el radio es de 5 km, igual que en el aeropuerto de Barcelona, para el observatorio de Fabra de Barcelona el radio es de 6 km, al igual que ocurre en los observatorios de Palma de Mallorca, aeropuerto de Almería y San Javier.

En provincias del este de Castilla-La Mancha, en las zonas próximas al sistema Central, en el sur de Aragón, prelitoral catalán, zonas de León y Zamora y en Ibiza, también hay una tendencia a notificar tormentas en radios inferiores a 10 km. En Navacerrada, el radio de notificación de tormentas es de 7 km, igual que en el observatorio de Cuenca, Ponferrada y de Ávila, mientras que en Cáceres, Teruel, Ibiza, Colmenar Viejo y Torrejón, se notifican tormentas en un radio de 8 km alrededor de cada observatorio.

Observatorio de Navacerrada										
Promedio de días de tormenta observado en el período 2007-2016										
17 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
13	15	17	18	20	20	22	23	24	25	26
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
4	2	0	1	3	3	5	6	7	8	9
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Navacerrada: 7 km										

Tabla A4A.2. Observatorio de Navacerrada: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En el otro extremo, entre los observatorios que notifican tormentas lejanas, en radios superiores a 12 km, en el observatorio de A Coruña, el promedio anual de días de tormenta anotado en el banco de datos climatológico es de 12 días, igual que el del aeropuerto de Barcelona, pero a partir de las estimaciones de días de tormenta de la red de rayos, en A Coruña se notifica tormenta cuando se registran rayos dentro de un círculo de radio de aproximadamente 14 km, mientras que en el aeropuerto de Barcelona se hace en un radio inferior a 5 km.

Observatorio de A Coruña										
Promedio de días de tormenta observado en el período 2007-2016										
12 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
4	5	6	7	8	9	10	10	11	12	12
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
8	7	6	5	4	3	2	2	1	0	0
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de A Coruña: 14 km										

Tabla A4A.3. Observatorio de A Coruña: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

Este patrón de cifrado de tormentas cuando están muy lejos del observatorio que se ha estimado para el observatorio de A Coruña, es un patrón que se repite en casi todos los observatorios gallegos. Por ejemplo, para los observatorios de Lugo y Ourense, el radio es de 15 km, y para los observatorios de Pontevedra y del aeropuerto de Santiago de Compostela, el radio es de 13 km. Solo el aeropuerto de Vigo presenta un patrón diferente, con un radio estimado de notificación de tormentas de 9 km.

Otros observatorios del norte de la Península comparten este patrón de notificación de tormentas lejanas, con radios de círculo amplios. En Aragón, el radio de notificación de tormentas en el observatorio de Daroca es de 15 km, en Calamocha 14 km y en el aeropuerto de Zaragoza 13 km. También en los extremos norte y sur de Cataluña, los radios de notificación de tormentas son amplios. En la estación de Espolla-Les Alberes (Girona), estación de calidad contrastada, el radio de notificación de tormentas es superior a 15 km, y en Tortosa, el radio es también de 15 km.

Observatorio de Daroca										
Promedio de días de tormenta observado en el periodo 2007-2016										
26 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
12	14	15	18	19	20	22	22	24	25	26
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
14	12	11	8	7	6	4	4	2	1	0
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Daroca: 15 km										

Tabla A4A.4. Observatorio de Daroca: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En una de las zonas de mayor densidad de tormentas de España, entre el Maestrazgo turolense y el Maestrat castellonense, la tendencia de los observatorios también es de considerar radios amplios para el cifrado de día de tormenta. Por ejemplo, en el observatorio de Vilafranca, el radio de notificación de día de tormenta es de 14 km y en el de Morella de 12 km.

Observatorio de Vilafranca/Villafranca del Cid										
Promedio de días de tormenta observado en el periodo 2007-2016										
36 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
20	22	24	26	28	30	31	33	34	36	37
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
16	14	12	10	8	6	5	3	2	0	1
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Vilafranca/Villafranca del Cid: 14 km										

Tabla A4A.5. Observatorio de Vilafranca/Villafranca del Cid (Castellón): días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En las localidades andaluzas próximas al litoral de Cádiz y Málaga también se notifican tormentas lejanas, con radios superiores a 12 km. En Rota el radio medio de notificación de tormentas es de 14 km, en el aeropuerto de Jerez de 13 km y en el de Málaga de 12 km.

Observatorio de Rota										
Promedio de días de tormenta observado en el periodo 2007-2016										
16 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
7	8	9	10	11	12	13	13	14	15	15
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
9	8	7	6	5	4	3	3	2	1	1
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Rota: 14 km										

Tabla A4A.6. Observatorio de Rota (Cádiz): días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En el Cantábrico, también hay una tendencia a notificación de tormentas en radios superiores a 10 km. En el observatorio de Oviedo se notifican tormentas en un círculo de radio de 11 km alrededor del observatorio, en el de Santander dentro de un círculo de radio de 12 km, y en el aeropuerto de San Sebastián, en un radio de 11 km.

Observatorio de Oviedo										
Promedio de días de tormenta observado en el período 2007-2016										
16 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
7	8	10	12	13	13	14	16	17	18	18
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
8	6	5	3	2	1	0	2	3	3	5
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Oviedo: 11 km										

Tabla A4A.7. Observatorio de Oviedo: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En los aeropuertos de Córdoba, Alicante y València, y en el observatorio de Alicante, el radio de notificación de tormentas es de 12 km, y en el de Menorca, 13 km.

Observatorio del aeropuerto de València										
Promedio de días de tormenta observado en el período 2007-2016										
19 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
9	10	12	14	15	16	17	19	19	20	21
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
10	9	7	5	4	3	2	0	0	1	2
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio del aeropuerto de València: 12 km										

Tabla A4A.8. Observatorio del aeropuerto de València: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

Y alrededor de 10 km de radio para la notificación de tormentas se encuentran los observatorios de los aeropuertos de Sevilla, León, Pamplona, Melilla, Granada, bases aéreas de Getafe y Granada, y observatorio provincial de Castellón.

Con los mismos criterios que se establecieron para la Península, se han seleccionado finalmente los datos de 12 observatorios de las islas Canarias, de los cuales se ha calculado el promedio anual de días de tormenta en el período 2007-2016. A continuación se exponen dos ejemplos del proceso de obtención del radio de cifrado de tormentas en alguno de los 12 observatorios seleccionados en Canarias. En el observatorio de Izaña, el promedio anual de días de tormenta anotado en el banco de datos climatológico es de 2,2 días. A partir de las estimaciones de días de tormenta de la red de rayos, en el observatorio de Izaña se notifica tormenta cuando se registran rayos dentro de un círculo de radio inferior a 5 km. Por tanto, en este observatorio se notifican tormentas cuando estas están ya muy cercanas.

Observatorio de Izaña										
Promedio de días de tormenta observado en el período 2007-2016										
2,2 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
2,6	3,5	3,7	4,1	4,4	5,0	5,5	5,5	5,7	5,9	6,2
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
0,4	1,3	1,5	1,9	2,2	2,8	3,3	3,3	3,5	3,7	4,0
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio de Izaña: 5 km										

Tabla A4A.9. Observatorio de Izaña: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

En el observatorio del aeropuerto de Gran Canaria, el promedio anual de días de tormenta anotado en el banco de datos climatológico es de 1,9 días. A partir de las estimaciones de días de tormenta de

la red de rayos, en el observatorio del aeropuerto de Gran Canaria se notifica tormenta cuando se registran rayos dentro de un círculo de radio aproximado de 8 km.

Observatorio del aeropuerto de Gran Canaria										
Promedio de días de tormenta observado en el periodo 2007-2016										
1,9 días de tormenta/año										
Número de días de tormenta en base a datos de la red de descargas con distintos radios de búsqueda alrededor del observatorio										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
1,0	1,1	1,3	1,8	2,2	2,5	2,6	2,9	3,4	3,6	3,7
Valor absoluto de la diferencia entre días de tormenta observados y calculados en distintos radios de búsqueda										
5 km	6 km	7 km	8 km	9 km	10 km	11 km	12 km	13 km	14 km	15 km
0,9	0,8	0,6	0,1	0,3	0,6	0,7	1,0	1,5	1,7	1,8
Radio estimado de cifrado de tormenta en el observatorio del aeropuerto de Gran Canaria: 8 km										

Tabla A4A.10. Observatorio del aeropuerto de Gran Canaria: días de tormenta observados, calculados mediante los datos de la red de detección de descargas con distintos radios de búsqueda, y radio estimado de cifrado de tormentas en este observatorio.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido posible gracias a la operatividad de la Red de Detección de Descargas Eléctricas de AEMET, por ello los autores agradecen a AEMET la disponibilidad de sus datos. También expresamos nuestro reconocimiento al personal de AEMET que ha realizado estudios sobre actividad eléctrica, en especial Francisco Pérez Puebla y Jorge González Márquez, así como a Mariana Cano Cardona y Aday Melián Quintana, alumnos del Grado en Geografía y Medio Ambiente de la Universitat de València, que colaboraron en la realización de este trabajo durante su período de prácticas externas en la Delegación de AEMET en la Comunidad Valenciana. Queremos también agradecer a David Mancebo Atienza (@objtormentas), gran aficionado a la meteorología y fotografía, el habernos facilitado fotos de tormentas para esta publicación, así como a David Ávila, Paco Burguera Catalá, José Antonio Quirantes Calvo y Fernando Bullón Miró. Por último, queremos agradecer el aporte de conocimiento en el campo de la electricidad atmosférica en España a Fernando de Pablo y Luis Rivas, catedráticos de la Universidad de Salamanca.

ISBN 978-84-7837-100-6



9 788478 371006 >

P.V.P.: 15,00 €
(IVA incluido)