

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica

*Evaluación de la precisión en la localización de descargas eléctricas nube-tierra de la red de detección de rayos de AEMET*

Trabajo Fin de Máster

Roberto García Gómez

Julio 2016

La realización del presente trabajo ha sido posible gracias al convenio de colaboración entre la Delegación Territorial en el Principado de Asturias de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y la Universidad de Oviedo.

## AGRADECIMIENTOS

A los tutores de este Trabajo Fin de Máster, Manuel Mora y María del Carmen Recondo.

A Ramón Pérez, Jefe de la Zona de Explotación Noroeste, Dirección de Explotación Territorial de Cellnex Telecom, S.A., por la desinteresada cesión de los datos para la elaboración de este trabajo.

A los profesores del Máster de Teledetección y SIG y a mis compañeros.

Al personal de la AEMET.

A Fridtjof Wedel-Jarlsberg Nansen y Alfred Lothar Wegener, mis meteorólogos de cabecera.

Y a la madre de Dani por acuñar... ¡rayos y centollos!

Contenido

1. RESUMEN.....	2
1. ABSTRACT. ....	2
2. INTRODUCCIÓN.....	3
2.1 Origen de los rayos y circuito eléctrico global. ....	3
2.2 Clasificación y formación de rayos descendentes negativos.....	5
2.3 Emisiones electromagnéticas .....	6
2.4 Sistemas de localización ( <i>Lightning Location System, LLS</i> ).....	7
2.5 Técnicas utilizadas .....	8
2.5.1 Tiempo de llegada ( <i>Time Of Arrival, TOA</i> ) .....	8
2.5.2 Radiogoniómetro ( <i>Direction Finding, DF</i> ).....	8
2.5.3 Combinación de TOA y DF .....	9
2.6 Rendimiento de un LLS .....	9
2.6.1 Eficiencia de la detección ( <i>Detection Efficiency, DE</i> ). ....	10
2.6.2 Precisión en la localización ( <i>Location Accuracy, LA</i> ). ....	10
2.6.3 Fiabilidad de la localización: elipse de error y $X^2$ (chi-cuadrado) reducido.....	10
2.7 Evaluación a partir de datos reales contrastados ( <i>Ground-Truth, GT</i> ) .....	11
3. Objetivos.....	13
4. Procedimiento.....	14
4.1 Materiales y Datos .....	14
4.1.1 Sistema de detección AEMET .....	14
4.1.2 Base de Datos de Rayos (BDRAY).....	15
4.1.3 Datos reales contrastados .....	16
4.1.4 Software. ....	17
4.2 Ámbito de estudio .....	18
4.3 Metodología .....	18
5. Resultados.....	20
5.1 Distribución espacial y temporal .....	20
5.2 Naturaleza y polaridad de las descargas.....	21
5.3 Eficacia en la detección (DE).....	21
5.4 Precisión de localización (LA).....	22
5.5 Elipses de error .....	30
6. Conclusiones .....	31
7. Bibliografía .....	32

## 1. RESUMEN.

La geolocalización de las descargas eléctricas reviste una gran importancia para diversos sectores de la sociedad, servicios meteorológicos, tráfico aéreo o prevención de riesgos. El objetivo del presente trabajo es evaluar la precisión de localización, en el norte de España, de descargas eléctricas nube-tierra de la Red de Detección de Rayos (REDRA) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para ello, se analizan datos reales contrastados, procedentes de antenas de comunicación que han sufrido averías por descargas eléctricas. Estos datos son cotejados con la Base de Datos de Rayos (BDRAY) asociada a REDRA y se calcula la precisión en la localización del sistema. La eficiencia en la detección calculada es del 70 % y la precisión media, hallada en la zona de Asturias y Cantabria, es de 1.481 m, con una ligera tendencia a descender de Este a Oeste y de Norte a Sur.

Palabras clave: Red de Detección de Rayos (REDRA), Base de Datos de Rayos (BDRAY), Precisión en la localización, Eficacia de la detección, Datos reales contrastados, Cordillera Cantábrica

## 1. ABSTRACT.

*The geolocation of lightning strokes lead to important effects on different social areas such as weather forecast services, air traffic or risk prevention. The goal is to evaluate the location accuracy of cloud-to-ground strokes from Red de Detección de Rayos (REDRA), as part of Agencia Española de Meteorología (AEMET). In order to do this, ground-truth data from communication towers which have been broken down due to lightning strokes are analysed. This data are checked with the Base de Datos de Rayos (BDRAY), associated with REDRA and the location accuracy (LA) of the system's geolocation is estimated. The detection efficiency (DE) calculated is 70% and the LA, in Asturias and Cantabria regions, is 1,481 m, with a slight tendence to drop from East to West and from North to South.*

*Keywords: Lightning Location Network (REDRA), Lightning Database (BDRAY), Location Accuracy, Detection Efficiency, Ground Truth Data. Cantabrian Mountains.*

## 2. INTRODUCCIÓN.

La geolocalización de descargas eléctricas, o de los procesos físicos implicados en ellas, es de importancia en múltiples aplicaciones, como son las alertas de descargas y procedimientos de seguridad asociados, predicciones meteorológicas, localización de daños causados a infraestructuras, evaluación de riesgos, investigación geofísica o seguros, entre otros. Entre los usuarios que requieren este tipo de información se encuentran servicios meteorológicos, responsables de aviación y tráfico aéreo, servicios forestales o compañías eléctricas.

### 2.1 Origen de los rayos y circuito eléctrico global.

El proceso de formación de un rayo (*flash*) forma parte del llamado circuito eléctrico global atmósfera–Tierra. La atmósfera se ioniza por la acción de la radiación solar, de la radiación cósmica y de la radioactividad natural terrestre, volviéndose más o menos conductora, en función de la energía de ionización recibida. La distribución heterogénea de estos iones da lugar a la ionosfera, capas altas de la atmósfera en las que la concentración de iones es máxima y con ello su conductividad. Por otro lado, las tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas por agua, además de la presente en las masas continentales, cuyos iones disueltos facilitan la conducción eléctrica en la corteza. De este modo se constituye un enorme condensador esférico [Uman, 1969], con dos superficies conductoras, la ionosfera, cargada positivamente, y la superficie terrestre, cargada negativamente, separadas por un dieléctrico, la atmósfera, dando lugar al circuito global de corriente continua (DC) (Figura 1).

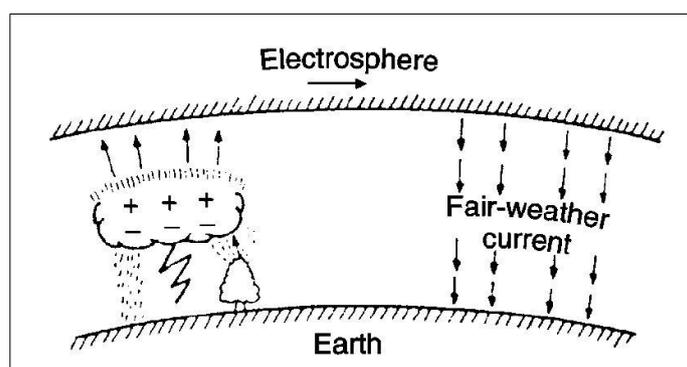


Figura 1. Modelo conceptual simplificado del circuito eléctrico global.  
Tomado de Rakov y Uman (2003), adaptado de Pierce (1974).

La corriente eléctrica generada, en ausencia de fenómenos tormentosos, entre las dos placas del condensador atmosférico se denomina “corriente de buen tiempo”. Fluye desde la ionosfera hacia la superficie terrestre, transportando cargas positivas, y su intensidad es muy pequeña, del orden de 2 pA/m.

Parece lógico suponer que existe algún mecanismo encargado de mantener la diferencia de potencial entre las placas del condensador. Ese mecanismo son las tormentas, y los rayos que se originan durante su proceso, siendo los principales responsables del mantenimiento del circuito global. La definición que da la Organización Meteorológica Mundial (OMM) de tormenta (*thunderstorm*) es: “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.” [Vocabulario Meteorológico Internacional, OMM - Nº 182.]

Durante la génesis de una nube convectiva, los mecanismos de generación y separación de cargas hacen aumentar la energía eléctrica del conjunto. Cuando la energía acumulada supera el umbral máximo que la nube puede soportar, se produce el rayo, que rebaja la energía acumulada, redistribuye las cargas eléctricas y restablece las condiciones de equilibrio entre la nube, el suelo y la atmósfera de su entorno.

La mayoría de rayos se producen en cumulonimbos, existiendo varios modelos teóricos de electrificación para este tipo de nubes. Uno de los más aceptados dentro de la comunidad científica se conoce como modelo tripolar [Williams, 1989], ya sugerido en estudios, alrededor de 50 años antes [Simpson y Scrase, 1937; Simpson y Robinson, 1941]. En este modelo, la célula tormentosa se encuentra estratificada en tres regiones (Figura 2), asociadas a las isotermas de 0°C, -15°C y -40°C. El centro de carga superior es positivo y se sitúa en torno a los -40°C de temperatura. Por debajo, se encuentra un centro de carga negativo, de similar magnitud al superior, asociado a la isoterma de -15°C, y, finalmente, un tercer centro de carga positivo en la base de la nube, con menor carga que los anteriores, y situado en torno a la isoterma de 0°C.

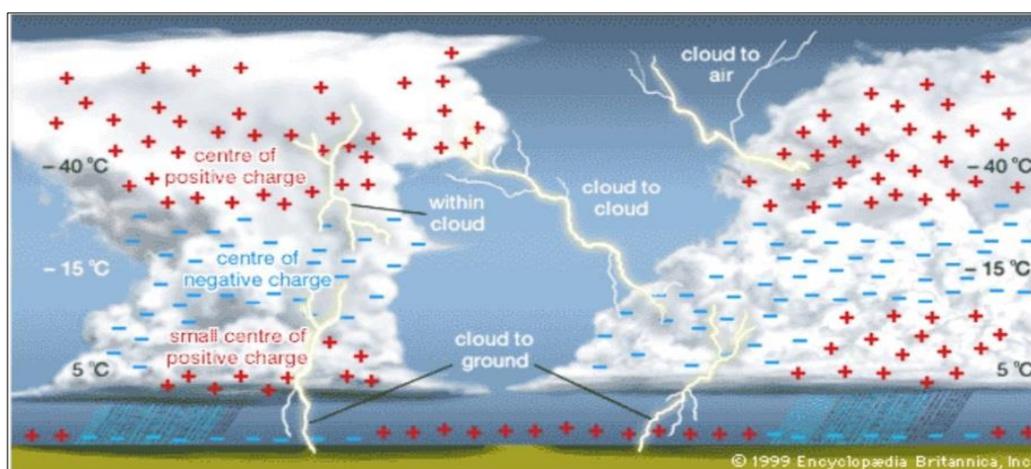


Figura 2. Modelo Tripolar y diferentes clases de rayos. Tomado de Encyclopædia Britannica.

## 2.2 Clasificación y formación de rayos descendentes negativos

En función del inicio y el final del transporte de cargas, los rayos pueden clasificarse del siguiente modo:

1. Descargas de nube (*intracloud, IC*)
  - a. Intranube (*within-cloud*), origen y final dentro de la misma nube.
  - b. Nube-Nube (*cloud-to-cloud*), origen y final en nubes diferentes.
  - c. Nube-Aire (*cloud-to-air*), origen en nube y final en aire claro.
2. Descargas nube-tierra (*cloud-to-ground, CG*), origen en nube y final en superficie terrestre.

El presente trabajo se centra en este tipo de descargas, que de forma más específica se pueden subclasificar de la siguiente forma, teniendo en cuenta su polaridad y su sentido:

- a. Descendentes positivas (*Downward positive discharges*)
- b. Descendentes negativas (*Downward negative discharges*)
- c. Ascendentes positivas (*Upward positive discharges*)
- d. Ascendentes negativas (*Upward negative discharges*)

La mayoría de las descargas que tienen lugar son IC, y la proporción entre estas y las descargas CG varía, dependiendo del tipo y lugar de la tormenta, entre 2 y 10 rayos IC por cada rayo CG [Boccipio et al., 2001]. La mayoría de las descargas CG no llega a tocar la superficie (aproximadamente el 75%) y las más comunes son las descendentes negativas, alrededor del 90%.

La secuencia temporal del desarrollo típico de una descarga negativa CG se muestra en la Figura 3. Dentro de la nube se produce un proceso de ruptura (*preliminary breakdown*), que desencadena la formación de la guía escalonada (*stepped leader, SL*), que formará uno o varios canales, uno de los cuales evoluciona hacia tierra. Cuando la SL se aproxima a la superficie, se forman una o más guías ascendentes (*upward leader, UL*), que suben al encuentro de la SL. La conexión entre la SL y la UL se denomina acoplamiento (*attachment*) y suele ocurrir a decenas de metros de altura si el rayo es descendente, o incluso centenares de metros si el rayo es ascendente originado en objetos superficiales elevados [Rakov y Uman, 2003]. De hecho, el acoplamiento es la primera fase de la descarga de retorno (*return stroke, RS*), la cual neutraliza la carga en la SL. La alta corriente del RS eleva la temperatura de canal hasta cerca de 30.000 K y crea un canal de presión del orden de  $10^6$  Pa. La expansión del canal es acompañada por una intensa radiación óptica, relámpago, y por una onda de sonido, trueno.

Ocasionalmente, se forma una segunda guía descendente (*dart leader*), que se ramifica cerca del suelo, originando subdescargas, dando lugar a un rayo con multiplicidad.

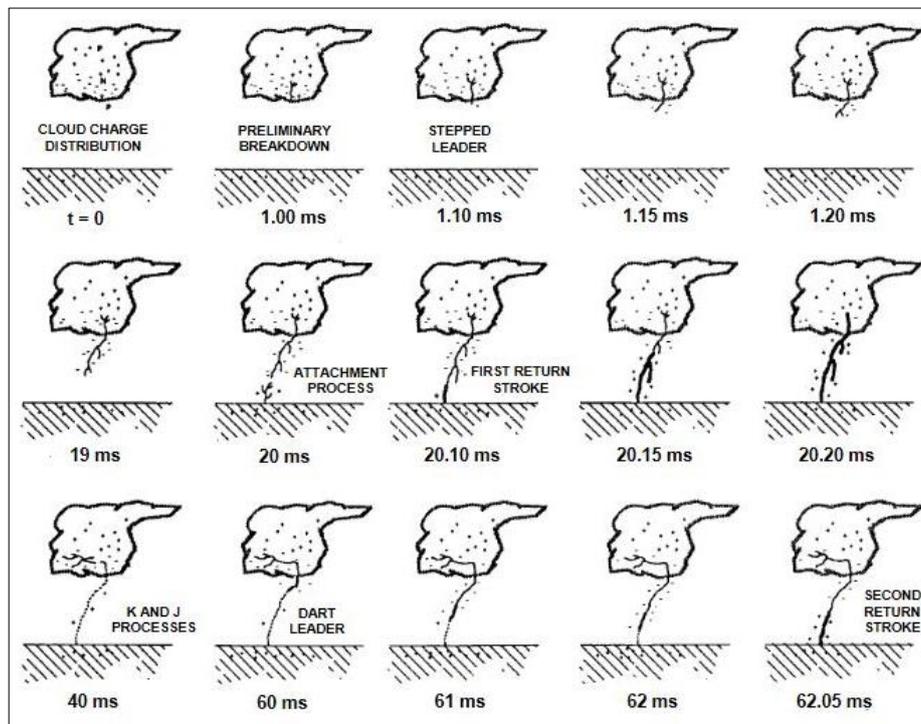


Figura 3. Descarga descendente negativa [Uman, 1987]

### 2.3 Emisiones electromagnéticas

Todos los procesos que se dan en la formación de un rayo emiten energía, cada uno con sus propias características, desde frecuencias de pocos hercios (*long continuing currents*) hasta  $10^{20}$  Hz (*hard X-Ray*) [Rakov, 2008], habiéndose observado también emisiones de rayos gamma [Cummer et al, 2005, 2011]. Las máximas intensidades se registran entre 5 y 10 kHz y disminuyen linealmente con el incremento de frecuencia [Serhan et al., 1980; Weidman et al., 1981; Cummins y Murphy, 2009].

La energía electromagnética emitida por una descarga eléctrica se propaga de forma diferente, dependiendo de su frecuencia. Dentro del espectro radioeléctrico, las muy bajas frecuencias (*Very Low Frequency, VLF*), 3-30 kHz, y las bajas frecuencias (*Low Frequency, LF*), 30-300 kHz, se propagan a través del terreno y por reflexión en la ionosfera. Esto hace que puedan propagarse miles de kilómetros, pero viéndose afectadas por la orografía y la conductividad del terreno, así como por las características de la ionosfera en ese momento. Las medias frecuencias (*Medium Frequency, MF*) y las altas frecuencias (*High Frequency, HF*), 300-3000 kHz y 3-30 MHz, respectivamente, tienen importantes pérdidas de señal más allá de los 100 km, por ello no son de uso habitual en la teledetección de descargas. Por otro lado las muy altas frecuencias (*Very*

High Frequency, VHF), 30-300 MHz, son rápidamente atenuadas en el terreno, por lo que no se propagan a grandes distancias, y además son bloqueadas por objetos en la línea de visión, pero ofrecen la posibilidad de determinar la imagen tridimensional del rayo. Las emisiones de VHF se asocian a las primeras fases de la formación del rayo, mientras que las de VLF se producen continuamente a través del canal. En la figura 4, se representan las formas de propagación de las diferentes frecuencias que son de interés para la teledetección.

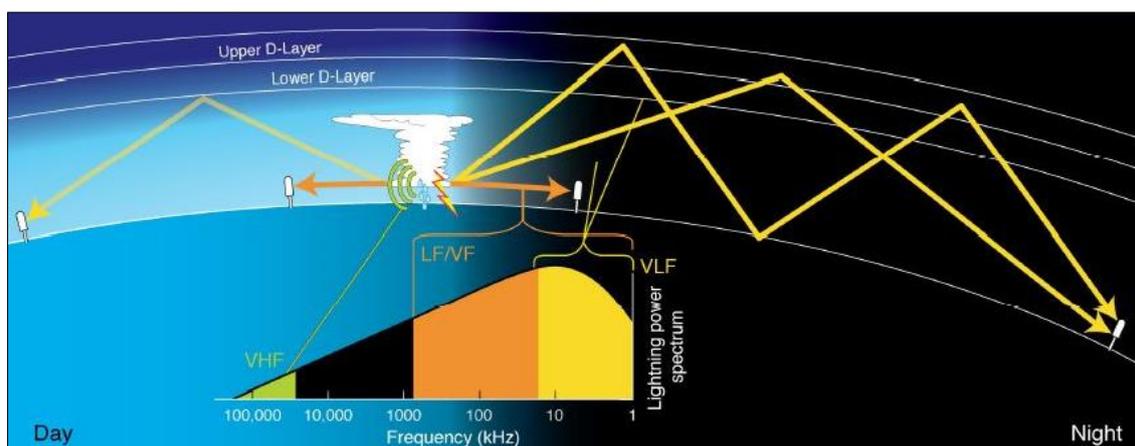


Figura 4. Propagación de las diferentes frecuencias emitidas en una descarga. Tomado de Cummins y Murphy (2009).

Las características de las señales electromagnéticas que quieran ser observadas determinarán el diseño del sistema de detección.

#### 2.4 Sistemas de localización (*Lightning Location System, LLS*)

Para llevar a cabo la geolocalización de rayos se emplean Sistemas de Localización de Descargas, posicionados en tierra (*ground-based*) o a bordo de satélites (*satellite-based*). Los LLS posicionados en tierra, como el considerado en el presente trabajo, disponen de una red de sensores electromagnéticos, cuatro o cinco como mínimo, y un procesador central. Estos sensores pueden detectar desde ELF hasta ultra alta frecuencias (*Ultra High Frequency, UHF*). Cada sensor mide la señal electromagnética producida por una descarga eléctrica y envía información acerca de la onda captada al procesador central. Una vez que una descarga es medida en varias estaciones, el procesador central, mediante una o varias técnicas, estima la localización del rayo. Dependiendo de la distancia entre los sensores se pueden diferenciar cuatro tipos de redes [Nag *et al.*, 2015]:

- Sensores muy próximos (*VHF Mapping*), separados entre decenas y centenares de metros. Operan a VHF, entre 30 y 300 MHz.
- Sensores próximos (*short-range*), separados decenas de kilómetros. Operan a VHF, entre 30 y 300 MHz.

- Sensores a media distancia (*medium-range*). Línea base entre 150 y 400 km, y frecuencias empleadas entre ELF y HF. Es el caso del sistema de AEMET.
- Sensores distantes (*long-range*), con separaciones entre decenas y miles de kilómetros. Operan en VLF y LF, de 3 a 300 KHz.

Las características descritas en el apartado 2.5 de las ondas VLF y LF hacen que esta parte del espectro radioeléctrico sea idónea para sistemas de detección de larga y media distancia.

## 2.5 Técnicas utilizadas

Las dos técnicas más utilizadas para la geolocalización de descargas eléctricas en LLS basados en tierra son:

### 2.5.1 Tiempo de llegada (*Time Of Arrival, TOA*)

La señal emitida por el rayo se propaga a la velocidad de la luz en todas direcciones, siendo detectada por cada sensor en instantes diferentes, dependiendo de la distancia entre la fuente y el sensor. Tomando los tiempos de retardo para dos sensores se define una hipérbola de posibles ubicaciones, y su intersección con hipérbolas de otras parejas de sensores, determina la ubicación óptima del rayo. Esta técnica requiere la perfecta sincronización de los sensores, mediante el uso de GPS, y al menos tres sensores, aunque suele requerirse al menos un cuarto sensor, ya que con tres sensores suelen darse incertidumbres, y un quinto para medir la altura de la descarga.

### 2.5.2 Radiogoniómetro (*Direction Finding, DF*)

Los sensores que emplean esta técnica están formados por dos antenas magnéticas de cuadro, colocadas verticalmente y ortogonales entre sí, orientadas norte-sur y este-oeste, y otra antena plana horizontal que determina la polaridad del rayo CG [Kridler et al, 1976, 1980]. El campo magnético radiado por un rayo induce una corriente detectada en las antenas de cuadro. El voltaje medido de la señal está asociado a la fuerza del campo magnético generado mediante el coseno del ángulo entre el cuadro de la antena y la dirección del rayo. Comparando los voltajes de las dos antenas se puede determinar una dirección para el rayo, y la tercera antena horizontal resuelve la ambigüedad del sentido.

Esta técnica permite discriminar rayos CG de otro tipo de rayos gracias a su firma espectral [Malan, 1963] (Figura 5). Cuando la guía líder alcanza el suelo, se produce la descarga de retorno, produciendo un acusado incremento del voltaje, lo cual distingue a los rayos CG de otras

fuentes. Así, el procesamiento electrónico se diseña para responder solo ante las firmas espectrales de las descargas de retorno de rayos CG.

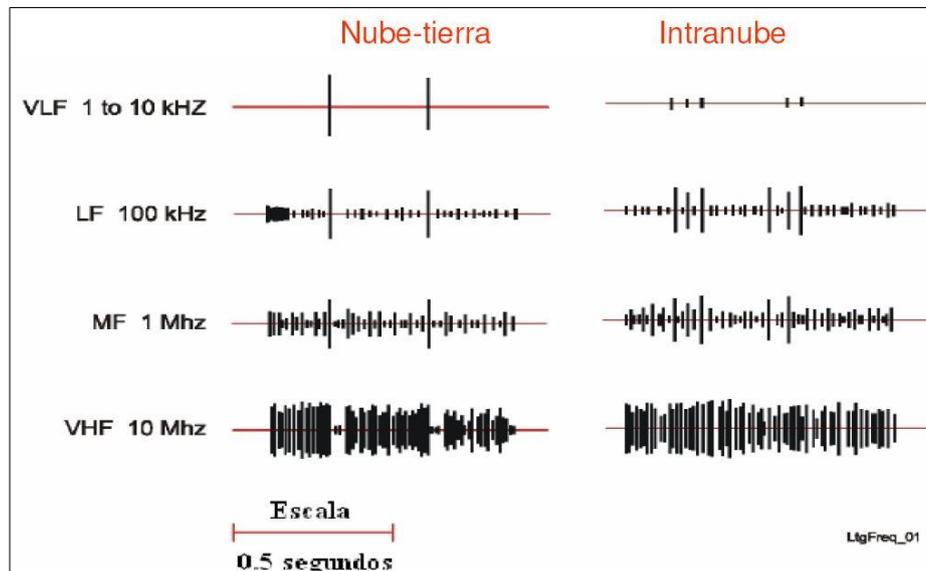


Figura 5. Firmas espectrales de descargas nube-tierra e intranube. Tomado de Malan (1963).

### 2.5 3 Combinación de TOA y DF

Los sensores modernos utilizan una combinación de estas dos técnicas, intentando aprovechar las ventajas de ambas. Con DF, un mínimo de dos sensores puede proporcionar la posición de una descarga, pero el error en la localización es mucho mayor cerca de la línea de unión de las dos estaciones. En las zonas donde los vectores de dirección de las estaciones se intersectan con mayor ángulo, el error es menor [Nag et al., 2015]. Además, el error está sujeto al incremento de la distancia entre los sensores y la localización, al tratarse de errores de ángulo.

Con TOA se requieren más sensores para determinar una posición, pero los errores son independientes de la distancia dentro de la red y, generalmente, más pequeños que los producidos por la utilización solo de DF. Con la combinación de ambas técnicas se pueden geolocalizar descargas con solo dos sensores y beneficiarse del menor error de posición dentro de la red del TOA, a pesar de que hay mayores errores en el borde de la red. Esta técnica es la empleada por los sensores de la red de AEMET, Vaisala IMPACT y Vaisala LS7000.

### 2.6 Rendimiento de un LLS

La eficacia de un LLS se determina por su capacidad para detectar, localizar e informar de diversos aspectos de las descargas. Para caracterizar el rendimiento se utilizan varios factores, dos de los más empleados son:

### 2.6.1 Eficiencia de la detección (*Detection Efficiency, DE*).

Es la capacidad de una red para detectar descargas eléctricas, y se expresa como un porcentaje de las descargas registradas por el sistema. Si la señal no pasa determinadas comprobaciones de consistencia o si no llega al umbral de detección del sensor, no queda registrada. Además, las localizaciones no se calculan si la descarga detectada por varios sensores no puede ser correlacionada, o si el resultado no es consistente.

Se puede referir a diferentes tipos de rayos, o descargas, y varía dependiendo de la región. De esta forma, un LLS puede tener diferentes DE para varios tipos de descargas y su DE no es homogéneo en toda la zona de detección.

### 2.6.2 Precisión en la localización (*Location Accuracy, LA*).

Es una media de lo bien que el sistema posiciona una descarga individual. Así, cuando se lee que un LLS tiene una LA de 500 m para descargas nube-tierra, quiere decir que la media del error cometido en la localización de una descarga nube-tierra es de 500 m. Hay varios factores que influyen en la LA de un LLS que opera con VLF y LF, como es el caso del sistema de AEMET:

- Errores asociados a los sensores, tanto de instrumentación, cableado, comunicaciones, como de errores en los observables, tiempo para TOA y ángulo para DF.
- Características del territorio en el que se asienta, como líneas de costa, orografía abrupta o límites administrativos, entre otros. Las elevaciones y la conductividad del terreno provocan retrasos en la llegada y atenuación de la señal. Estas variaciones pueden ser minimizadas aplicando correcciones locales específicas a los tiempos de llegada medidos [Cooray, 1987; Cummins et al., 2010; Honma et al., 2013].
- Disposición geométrica de la red. Los bordes de estas redes son zonas especialmente sensibles si la disposición geométrica entre los sensores no es adecuada, decayendo la LA rápidamente fuera de sus límites [Nag et al., 2014]
- La propagación por reflexión en la ionosfera, condicionado por aspectos meteorológicos y astronómicos.

Estos factores provocan que la LA no sea homogénea en toda la zona de operación del sistema.

### 2.6.3 Fiabilidad de la localización: elipse de error y $X^2$ (chi-cuadrado) reducido.

Asumiendo que la distribución de los errores en ángulo y tiempo es gaussiana, los LLS calculan una elipse de confianza del 50 %, para cada descarga detectada. Hay un 50 % de probabilidades de encontrar la descarga real dentro de esta elipse. Se determina en función del

número y posición relativa de los sensores que intervienen en la localización, además de la desviación estándar de las medidas de tiempo y ángulo para cada uno de los sensores.

La elipse de confianza, o de error, se centra en el punto calculado, y los parámetros usados para describirla son tres: la longitud del semieje mayor y su orientación, y la excentricidad o el semieje menor. Las elipses pueden ser calculadas para cualquier nivel de probabilidad deseado, escalando los semiejes de la elipse del 50 %, según la siguiente expresión (Ecuación 1):

$$FE = \frac{\sqrt{-2 \ln(1-P)}}{1.177} \quad (1)$$

Donde FE es el factor de escala y P la probabilidad deseada, expresada en números enteros (0 a 1). Las probabilidades usadas habitualmente son 90 %, con FE de 1.82, y 99 %, con FE de 2.57. La longitud del semieje mayor de la elipse de 50 % se utiliza de forma habitual para realizar análisis estadísticos, e inferir la LA de los sistemas de detección, en un proceso de autovalidación. Para estas autoevaluaciones también se utiliza el número de sensores que registran cada descarga, (*number of sensors reporting*, NSR).

El valor de chi-cuadrado ( $X^2$ ) reducido es un parámetro estadístico normalizado que evalúa la calidad total de la localización en el espacio y el tiempo de cada descarga, la expresión usada para su cálculo puede verse en la Ecuación 2:

$$X^2 = \frac{\sum_{j=1}^n \left[ \frac{(m_j - m_j^*)^2}{e_j^2} \right]}{x} \quad (2)$$

Donde  $n$  es el nº total de medidas,  $j$  es el índice de la medida,  $m_j$  es la medida,  $m_j^*$  es el valor calculado basado en la localización óptima,  $e_j$  es la desviación estándar y  $x$ , los grados de libertad (número de medidas menos el número de parámetros calculados). Valores de  $X^2$  por encima de 10 no se consideran aceptables, entre 3 y 10 son aceptados, y por debajo de 3 se consideran óptimos.

## 2.7 Evaluación a partir de datos reales contrastados (*Ground-Truth*, GT)

Aunque existen numerosos modelos teóricos para evaluar el rendimiento de un LLS, al final se requieren datos reales contrastados (GT) para verificar el verdadero comportamiento del sistema. Esos datos suelen incluir medidas de tiempo, posición y pico de intensidad, de descargas sobre una determinada región [Cramer y Cummins, 2014; Pavanello et al., 2009; Schulz et al., 2013]. Habitualmente, esos datos se obtienen de torres instrumentadas al efecto, elevadas sobre el terreno circundante, o son provocadas por lanzamiento de cohetes [Nag et

al., 2015]. En los últimos años, las cámaras de alta velocidad, situadas estratégicamente, están proporcionando datos que, además, permiten estudiar otros parámetros de las descargas, como su completo desarrollo o su intrincada morfología [Ishii et al., 2014; Schulz et al., 2012].

La DE de las descargas nube-tierra de un LLS solo puede ser validada utilizando estos métodos de contraste y es el único modo de comprobar la estimación realizada para el pico de intensidad. Sin embargo, estos estudios, solo son válidos para la región cercana a la torre, problema que se agrava si se espera que el rendimiento del sistema varíe mucho de una región a otra [Diendofer et al., 2000; Diendofer, 2010; Romero et al., 2011]. Esta limitación puede ser minimizada para un área extensa si se dispone de datos contrastados para varias estructuras altas no instrumentadas y diseminadas por esa región.

Por otro lado, cuando una descarga impacta en un objeto metálico alto, como una antena de comunicación o un aerogenerador, la parte baja del canal hasta tierra de la descarga es reemplazada por un conductor vertical metálico, a través del cual pasa la corriente de la descarga de retorno. Por ello, las emisiones electromagnéticas pueden ser bastante diferentes de las descargas que impactan en el terreno [Pavanello et al., 2007a, 2007b; Pichler et al., 2010] y se espera que el campo radiado sea mayor, y por lo tanto, más fácilmente localizables por el sistema. Así, es de esperar, que estos eventos presenten una mayor LA que las descargas naturales. [Pavanello et al., 2007a, 2007b, Bermúdez et al., 2007].

### 3. OBJETIVOS

La finalidad del presente trabajo es evaluar la precisión en la localización de descargas eléctricas nube-tierra de la Red de Detección de Rayos (REDRA) de la AEMET. Para ello se dispone de datos de impactos reales (*ground-truth*, GT), situados en el noroeste de la Península Ibérica, que serán cotejados con la base de datos del sistema.

Para la consecución de este objetivo global, se establecen varios objetivos secundarios que permiten caracterizar el comportamiento de una red:

- Estimar la eficacia en la detección (*Detection Efficiency*, DE) y la precisión en la localización (*Location Accuracy*, LA) a partir de datos GT.
- Realizar un mapa de error, en función del LA calculado, para el noroeste peninsular, al tratarse de una zona de borde de la red de detección. En estas zonas, los sistemas de detección presentan comportamientos más heterogéneos que en el interior de la red.
- Estudiar las correlaciones entre las variables obtenidas de la base de datos de rayos (BDRAY).
- Comprobar la posible influencia de la orografía en la detección y en la precisión (LA).

## 4. PROCEDIMIENTO

### 4.1 Materiales y Datos

#### 4.1.1 Sistema de detección AEMET

La Red de Detección de Rayos (REDRA) de la AEMET comenzó su actividad en 1992, contando con 14 radiogoniómetros (sensores magnéticos direccionales), ubicados en la península Ibérica, a excepción de uno, situado en Palma de Mallorca. Durante los 24 años de su existencia la red ha ido evolucionando, incorporándose nuevos sensores y sustituyendo otros, además de contar con la colaboración de las redes de países vecinos.

Actualmente, REDRA está compuesta por 38 sensores, 20 españoles, 14 franceses y 4 portugueses [AEMET, 2012], cuya ubicación, exceptuando los situados en las islas Canarias (que son 6), se puede observar en la Figura 6.



Figura 6. Distribución geográfica de la red de sensores disponibles para REDRA.

Se trata de una red de sensores a media distancia, basada en la detección de VLF y LF. Tanto los sensores como el software usado son de la compañía Vaisala. Son 16 sensores IMPACT, modelos ES y ESP, y 22 sensores LS, modelos 7000, 7001, y 8000. Según las especificaciones técnicas del sensor LS7001, para descargas nube-tierra, su eficacia de detección es mayor del 90 %, precisión media de localización 250-500 m, base de línea nominal entre 15 y 350 km y un

rango de frecuencias entre 1 y 350 kHz. La generación anterior de sensores IMPACT, modelo ESP, tendría una eficacia del 80-85% y una precisión media de 500 m. Sin embargo, este rendimiento del sistema se da en circunstancias ideales para los sensores.

Todos los modelos utilizan una combinación de las técnicas TOA y DF. La información que adquieren es enviada a un procesador central, Vaisala LP2000, que se encarga de hacer los cálculos y de almacenarlos en la base de datos.

#### 4.1.2 Base de Datos de Rayos (BDRAY)

En la Base de Datos de Rayos, BDRAY, se almacena la información registrada. Mediante un formulario de petición de búsqueda, o mediante una aplicación llamada *Expertise*, descrita en el apartado 4.1.3, se accede a la información. Algunas de las variables que ofrece el sistema son:

##### Parámetros físicos:

- Polaridad: positiva o negativa, indica la transferencia de carga.
- Intensidad: Intensidad del campo eléctrico detectado, en kiloamperios (kA).
- Multiplicidad: número de descargas asociadas al rayo.
- Número de orden: en el caso de multiplicidad el orden de las descargas.

##### Parámetros de localización:

- Año, Mes, Hora UTC (*Coordinated Universal Time*): localización temporal hasta el nanosegundo. Para obtener el huso horario CET (*Central European Time*), utilizado en la España peninsular, las correcciones serán UTC+1, durante el invierno, y UTC+2 en el periodo estival.
- Latitud y Longitud (o): Coordenadas geográficas con geoide *World Geodetic System 84* (WGS84). EPSG 4326.
- Número de sensores (*Number of Reporting Sensors*, NSR): separada en dos variables, número de sensores que detectaron la descarga y número de ellos que participaron en las soluciones.
- Distancia (km) y acimut (°): longitud de la línea que une el punto solicitado en el formulario y la ubicación de la descarga predicha por el sistema, así como el acimut de dicha línea.

##### Parámetros de fiabilidad de la localización:

- Semiejes elipse de error (km): para la elipse de 50 %.
- Acimut del eje mayor de la elipse (°): para la elipse de 50 %.
- $X^2$ : descrita en el apartado 2.6.

#### 4.1.3 Datos reales contrastados

Los datos necesarios para la realización de un trabajo de evaluación de un LLS mediante GT suelen proceder de construcciones en las que, de una forma u otra, se tiene constancia de que ha impactado una descarga eléctrica. Se ha de conocer la ubicación geográfica del punto, lo cual es posible gracias a que dichas construcciones son fácilmente localizables en ortofotografías. Además, se requiere conocer la fecha y hora a la que se produjo el evento, con el fin de correlacionar, lo más exactamente posible, el dato real con el obtenido de la BDRAY. Sin duda, este es el parámetro que más condiciona la calidad del dato, ya que resulta muy difícil obtenerlo con precisión y porque durante un episodio tormentoso pueden darse varias descargas en un intervalo de tiempo muy corto, lo cual dificulta hallar la correspondencia en la BDRAY.

Estructuras altas (EA). Datos cedidos por Cellnex, empresa encargada del mantenimiento de antenas de comunicación, provenientes de incidencias relacionadas con descargas eléctricas en las instalaciones que gestionan. Sin embargo, esto no significa que el impacto se produjera en la propia antena, pudo darse en algún punto próximo del tendido eléctrico, y causar la avería por derivación de corriente. Esta circunstancia añade la dificultad de poder extraer la población adecuada. Se conoce la ubicación de la estructura en WGS84 y la fecha y hora de los eventos. Un total de 216 incidencias, localizadas en 175 puntos.

Punto a punto (PAP). Durante el desarrollo del presente trabajo, se procedió a buscar, en las hemerotecas *on line* de numerosos medios de comunicación, y en diferentes buscadores de internet, noticias relacionadas con eventos de descargas eléctricas. Estas noticias suelen estar asociadas a daños producidos por rayos en estructuras que sobresalen del terreno, como son torres y espadañas de iglesias, edificios altos o antenas de comunicación, lo cual facilita la geolocalización exacta de los puntos. Para dar la mayor validez posible al dato, se tuvo en cuenta que la fecha y hora del evento fuera dada al menos por dos fuentes, y que hubiese fotografías de los daños causados en las estructuras. De esta forma se recolectaron 15 puntos, 11 de los cuales encontraron correspondencia en la BDRAY, distribuidos desde las Islas Baleares en el Este, hasta Galicia en el Oeste, y desde el Norte peninsular, hasta el Sur. Finalmente, estos datos fueron descartados para la realización de este estudio, dada su dispersión espacial y su bajo número, a la espera de completar una cantidad significativa de ellos.

#### 4.1.4 Software.

El software utilizado ha sido, *Google Earth 7.1.5.1557*, *ArcGIS 10.3*, Programa de Aplicaciones Geodésicas del Instituto Geográfico Nacional v1.3, *Office 2013*, *R v3.0.1*, *R Commander v2.0-0*, *BDRAY*, *Expertise*. Esta última aplicación, utilizada en la AEMET y desarrollada por la empresa francesa *Météorage*, ofrece la información extraída de forma gráfica, en archivo kmz. Dibuja las elipses de error asociadas a cada registro, así como la polaridad de la descarga, y, mediante código de colores, ubica temporalmente el dato (Figura 7). También devuelve la información solicitada de forma textual, en formato pdf y txt. Todos los formatos de archivos nombrados son descargables.

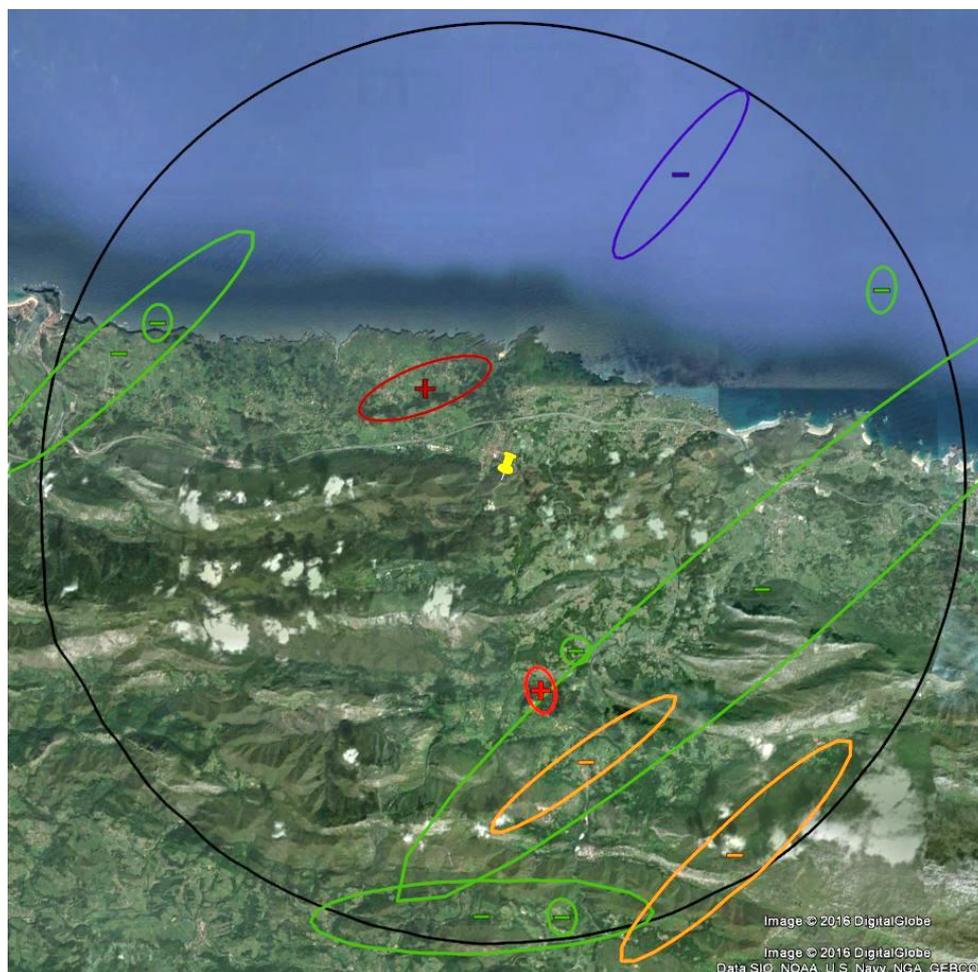


Figura 7. Aspecto gráfico de un archivo kmz generado por *Expertise*. Los colores de las elipses de error denotan acotación temporal. Chincheta amarilla: coordenadas introducidas para la búsqueda. Círculo negro: radio solicitado.

## 4.2 Ámbito de estudio

Los datos se ubican en el noroeste de la Península Ibérica (Figura 8), abarcando, en longitud, desde los 9.274 ° W de Fisterra, en Galicia, hasta los 3.179 ° W de Otañes, en Cantabria. En cuanto a la latitud, se observan puntos desde los 41.884 ° N, en Lobios, sur de Galicia, hasta los 43.760 ° N, en Vicedo, al norte de Galicia. En coordenadas, los puntos se encuentran repartidos entre los husos 29 y 30 UTM, banda T. Temporalmente, se distribuyen desde el año 2011 hasta el año 2016.

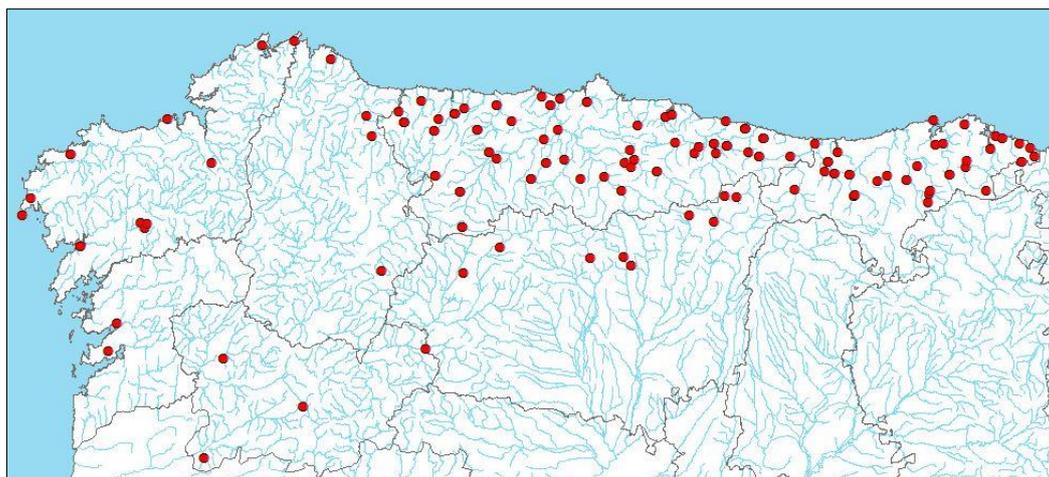


Figura 8. Distribución geográfica de los 216 puntos estudiados.

## 4.3 Metodología

Se introduce la información de cada descarga, latitud, longitud, fecha y hora, en la aplicación *Expertise*, estableciéndose los siguientes parámetros de búsqueda:

- Restricción espacial: se estableció inicialmente un radio de 5 km alrededor de los puntos conocidos, pero al encontrarse errores cercanos a esta cifra, se amplió el radio a 10 km.
- Restricción temporal: se tuvieron en cuenta solo las descargas eléctricas registradas 24 horas antes de la fecha y hora consignada en cada dato.

Una vez obtenida la lista de registros, y dada la precisión temporal de los datos, se selecciona el más cercano al punto tomado. Haciendo uso del Programa de Aplicaciones Geodésicas del Instituto Geográfico Nacional se transforman las coordenadas geográficas, tanto de las estructuras como de los puntos extraídos de la base de datos, a coordenadas UTM. A efectos prácticos, se han considerado equivalentes las coordenadas geográficas WGS84 a las geográficas ETRS89. Se resta el valor real de las coordenadas X e Y, a sus correspondientes X, Y del valor calculado por el sistema, y se obtienen los errores para todos los puntos en ambos ejes, lo cual permite calcular el error total de localización, con precisión métrica.

A cada descarga se le asocian sus valores de error, y con la finalidad de explorar y comprender mejor los datos obtenidos, se analizan estadísticamente con el software de libre distribución R, y el paquete R *Commander*.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Distribución espacial y temporal

Para las 216 incidencias iniciales en las *Estructuras Altas* (EA) se ha hallado correspondencia para 152 en la BDRAY, en 106 localidades diferentes. Su distribución geográfica, así como el número de datos disponible en cada ubicación se puede observar en la Figura 8. En Galicia son 19 puntos en 17 ubicaciones, en Asturias y Cantabria 124 puntos en 81 sitios y en León 9 puntos en 8 localizaciones.

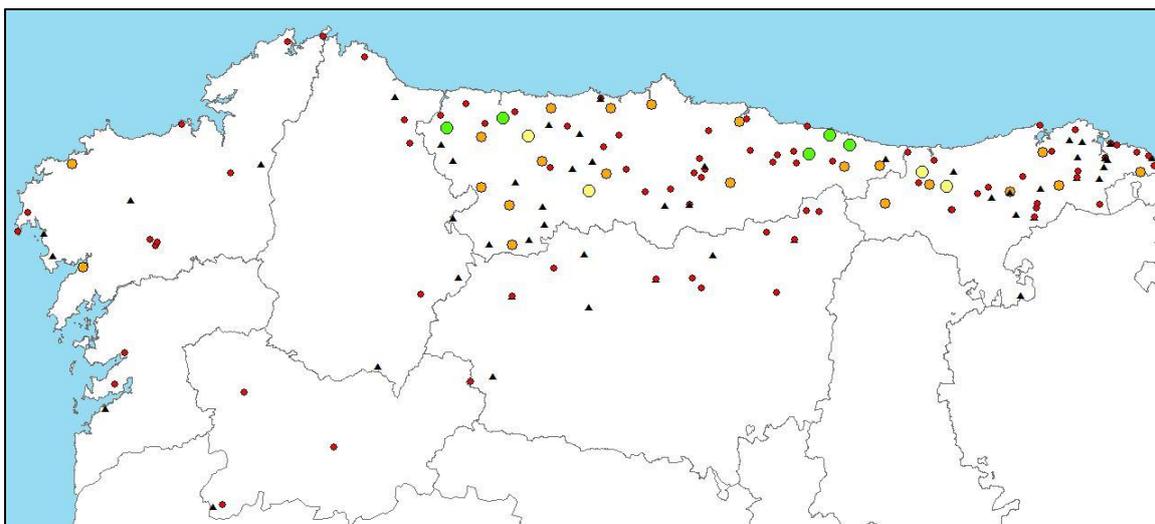


Fig. 8. Círculos: Ubicación de los puntos correlacionados y número de medidas en cada uno expresados con colores: Verde= 4; Amarillo=3; Naranja=2 y Rojo=1. Triángulos negros: puntos sin correspondencia en la BDRAY.

Se aprecia una clara concentración de puntos en Asturias y en Cantabria, dispersándose el número de muestras en Galicia y en el norte de León. En la Figura 9 se puede observar el histograma de los datos en función del año, y en la Figura 10, su histograma en función de los meses del año. Hay una clara heterogeneidad en la distribución temporal, tanto anual, con casi el 40 % de los datos en 2015, como mensual, la mayoría se agrupan en enero y febrero, casi el 70 %.

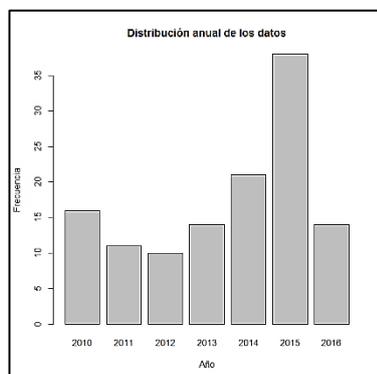


Figura 9. Distribución anual de los datos.

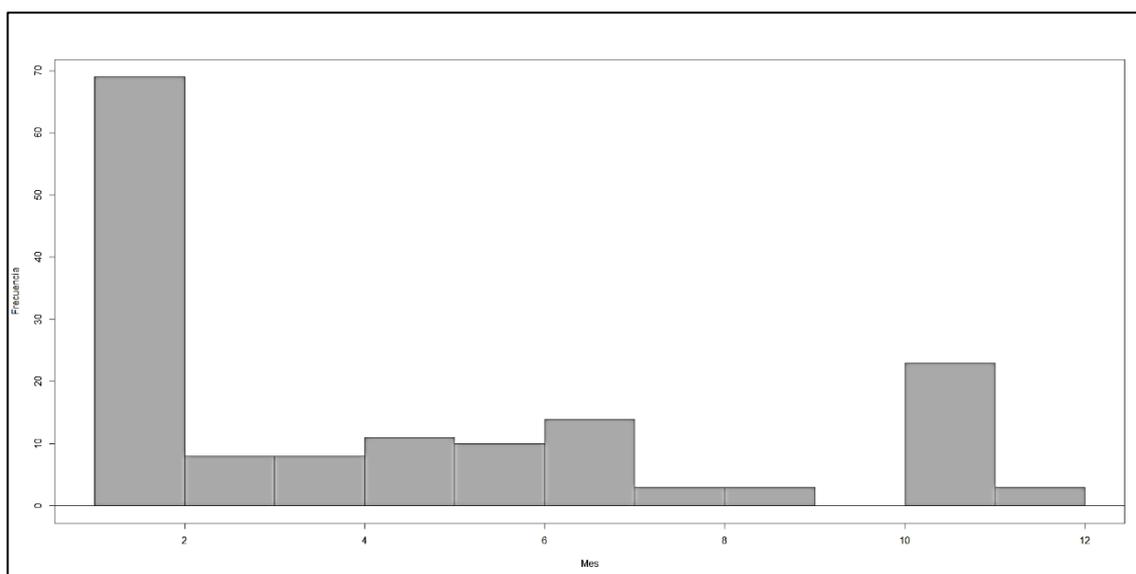


Figura 10. Distribución por meses de las medidas.

## 5.2 Naturaleza y polaridad de las descargas

De los 152 puntos obtenidos, 63 corresponden a descargas positivas, con una media de amplitud de 95.5 kA, un mínimo de 10.2 kA y un máximo de 429.1 kA. Respecto a las 89 descargas negativas restantes, tienen una media de -53.2 kA, un máximo de intensidad de -453.8 kA y un mínimo de intensidad de -5.1. El porcentaje de descargas negativas es inferior al esperado del 90 %, *grosso modo*, calculado por Rakov y Uman (2003). Esto parece indicar que al tratarse, en general, de puntos elevados, podría favorecer su proximidad al núcleo de carga positiva inferior de la nube cumulonimbo según el modelo tripolar, actuando como mecanismo de disparo de descargas positivas. Por otro lado, se confirma la mayor intensidad en general de las descargas positivas frente a las negativas, y por tanto con mayores daños a infraestructuras.

## 5.3 Eficacia en la detección (DE)

El porcentaje de eventos correlacionados, el 70%, ofrece una visión general de la DE del sistema, si bien este dato ha de tomarse con cautela dada la extensión geográfica abarcada, el número de puntos disponibles y la heterogeneidad en su distribución.

Se aprecia mayor incidencia de no detección en el cuadrante suroccidental de Asturias, llegando a mínimos del 27 % (n=7) en el entorno de Somiedo y Belmonte, y otras en las que aumenta hasta el 87%, (n=30) entre las longitudes de Llanes y Cabezón de la Sal.

La DE de un LLS moderno de medio rango, como el estudiado, se encuentra entre 70% y 90% para las descargas [Nag et al., 2015]

#### 5.4 Precisión de localización (LA)

La variable calculada del error (R) presenta una distribución asimétrica (Figura 11), con una larga cola hacia la derecha, curtosis de 4.42 y sesgo de 1.42. La LA media es de 2.313 m, pero con una mediana de 1.595 m y una desviación estándar de 2.172 m. Histogramas parecidos pueden verse en Mata et al. (2014) y Schulz (2012), Gaisberg Tower. Sin embargo, en esta se aprecia un repunte de frecuencia en el entorno de los 7.000 m, que podría deberse a dos grupos de población diferentes dentro de la muestra. La media de R es muy elevada y su extraña

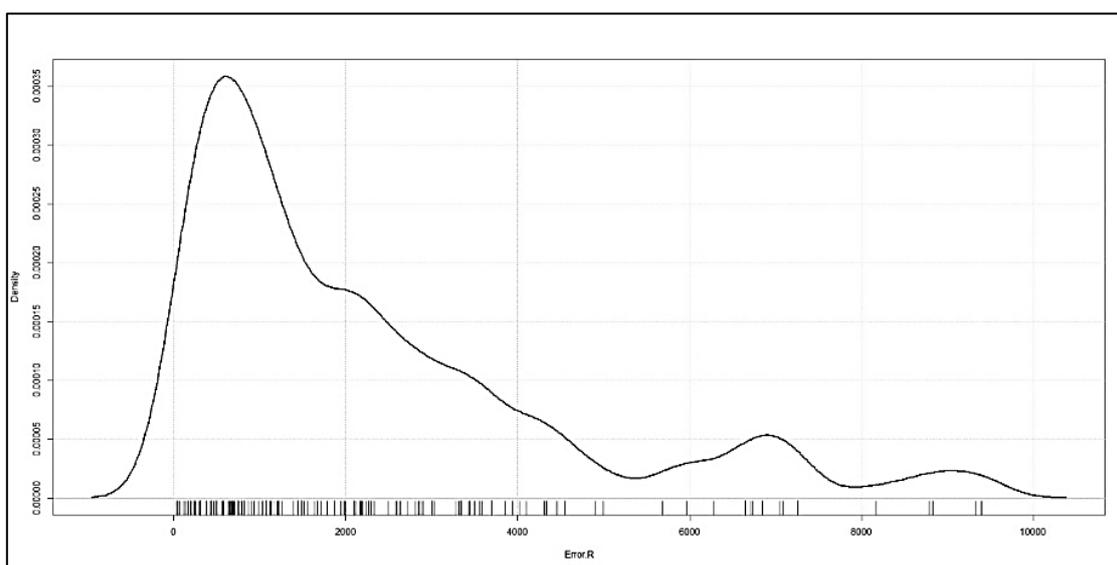


Figura 11. Estimación de densidad no paramétrica, función gaussiana, para la variable R.

distribución, a partir de los 5.000 m, vuelve a hacer dudar de la idoneidad del conjunto de los datos. En la Tabla 1 se desglosan algunos estadísticos calculados para el conjunto de datos.

Tabla 1. Estadísticos de los errores en el conjunto de la población.

Datos totales	Error X	Error Abs. X	Error Y	Error Abs. Y	Error R
Min.	-7060	1	-6520	13	34
Mediana	-26	699	-28	691	1595
Media	-352	1334	143	1375	2313
Max.	6253	7060	8930	8930	9396
STD	2254	1716	2208	1679	2172

Como análisis inicial se dibujan los diagramas de dispersión del Error R frente a las variables que aporta el sistema. Los primeros diagramas estudiados son los que ofrecen la variación de R con el año y el mes (Figura 11).

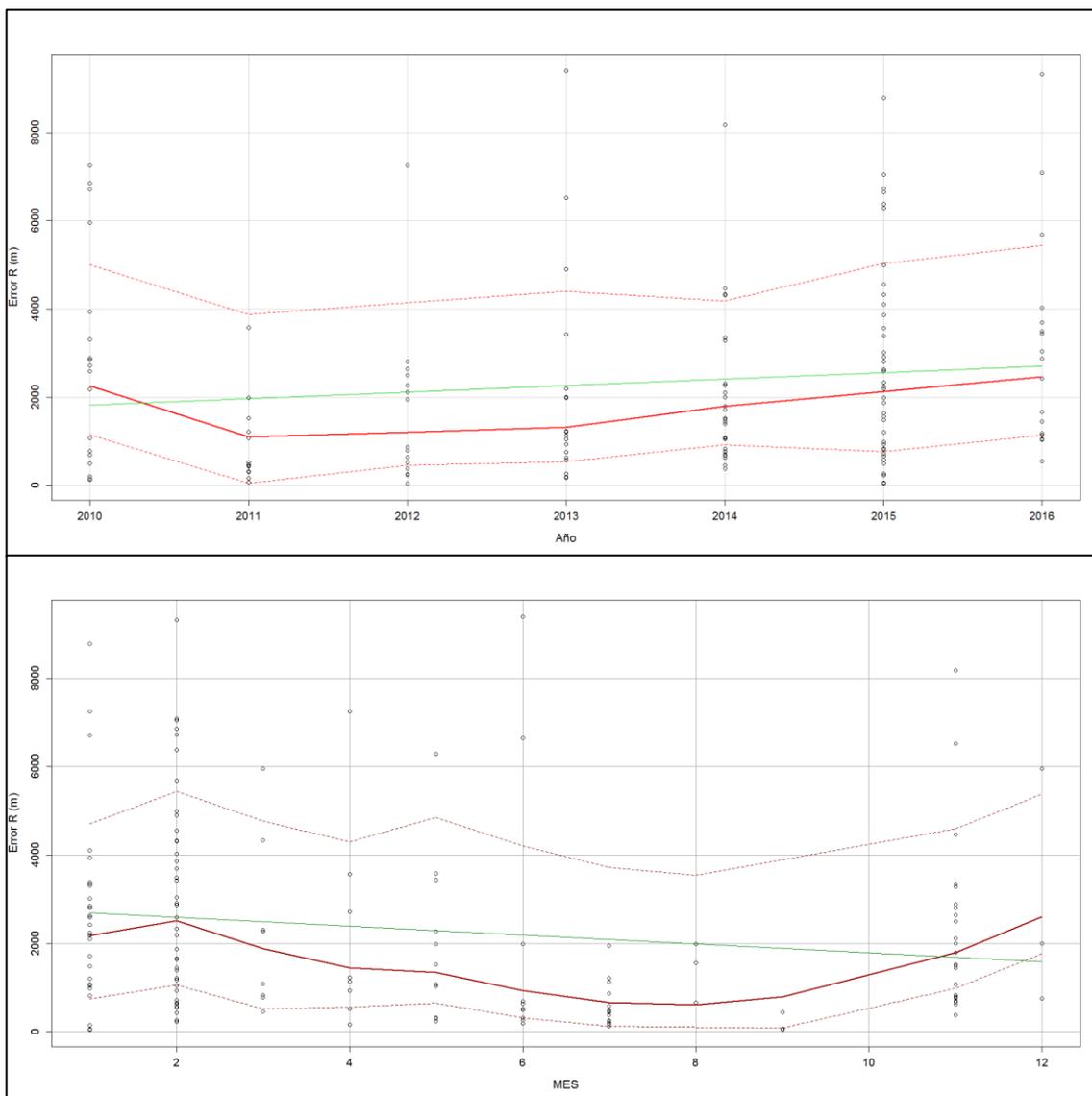


Figura 11. Diagramas de dispersión para el error R en el eje x frente, (a) año y (b) mes

Se observa en la Figura 11a un aumento anual del error desde el año 2011, hasta la actualidad, en la que la media se sitúa en 2.250 m. aproximadamente. A lo largo del año (Figura 11b), destaca un descenso en los meses estivales. La media de febrero sobrepasa los 2.100 m, mientras que en julio desciende por debajo de 1.000 m. Son resultados no esperados, muy cambiantes que solo pueden explicarse con la marcada heterogeneidad de los datos, con una distribución muy desigual en los diferentes meses (Figura 10), siendo por tanto una población muy escasa para realizar análisis estacionales. Esta peculiaridad se tendrá en cuenta en sucesivos análisis.

La variación de R con la latitud y la longitud se aprecia en la Figura 12.

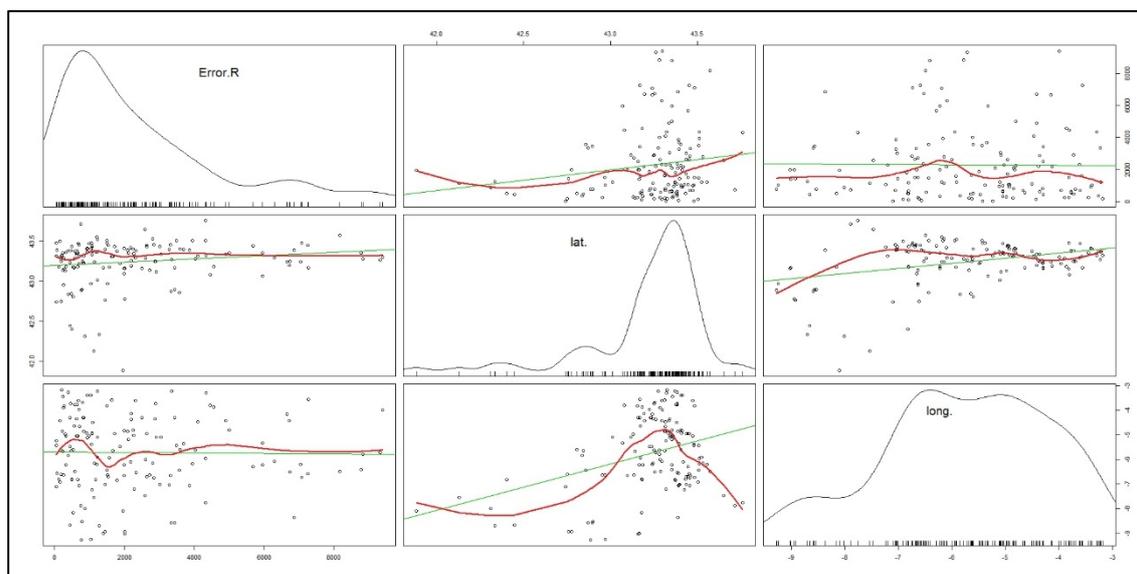


Figura 12. Diagramas de dispersión para las variables R, Latitud y Longitud.

Se aprecia en la Figura 12 (panel superior central) aumento generalizado de R de Sur a Norte, además de variaciones locales alrededor de los 43.25 °N, vertiente norte de la Cordillera Cantábrica. De Oeste a Este (Figura 12, panel superior derecho), la media de R se mantiene constante, un poco por encima de los 2.000 m, y se aprecian fluctuaciones que dan una media máxima alrededor de los -6.1 °W, y una mínima en el entorno de los -5.1 °W. Como se puede observar en las densidades de los puntos, éstos no se encuentran distribuidos espacialmente de forma uniforme: al norte de los 43 °N se ubican el 85 % y al este de los -7.3 ° E, el 87 %.

Esta distribución geográfica heterogénea, junto con la tendencia de la disminución del error hacia el Sur, hace sospechar que las medias de error son diferentes a un lado y otro de la cordillera. Por ello, para ser estudiados aparte, se han filtrado los datos atendiendo a las

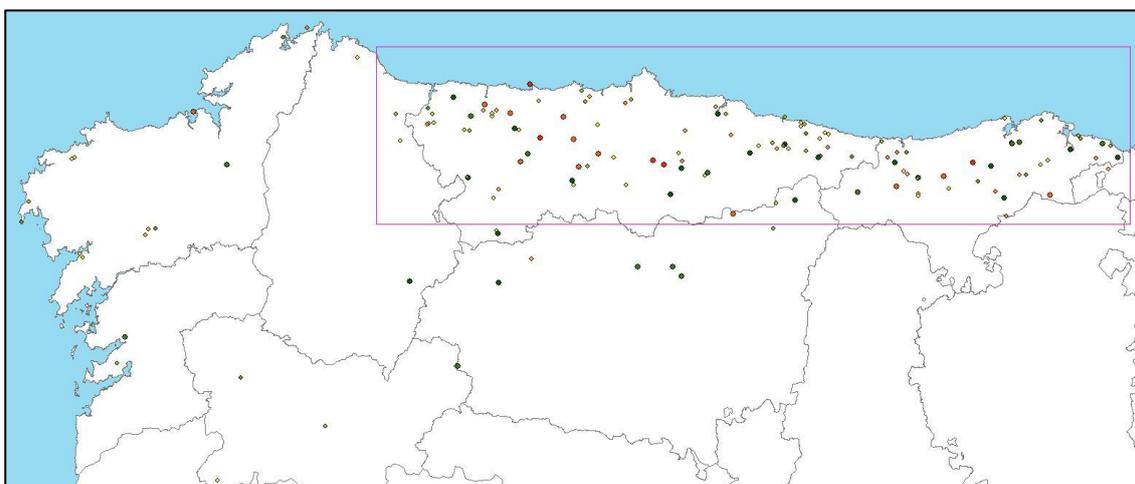


Figura 13. Distribución geográfica de los puntos y subconjunto obtenido con el filtrado espacial. Los colores representan el error, valores bajos en tonos verdes y altos en tonos rojos.

coordenadas anteriores, y se ha obtenido una cuadrícula de trabajo de 330 km de largo y 65 km de ancho (Figura 13).

La distribución de frecuencias de R del conjunto filtrado (AC) se muestra muy parecida a la anterior (Figura 11), y los diagramas de dispersión obtenidos se pueden observar en la Figura 14. La variación latitudinal de R se muestra más estable que con el conjunto completo de datos (Figura 14, panel superior medio), mientras que longitudinalmente, se observa un descenso general de la media, antes enmascarado, hacia el Este (Figura 14, panel superior derecho). Destaca un pico, a  $-6^{\circ}\text{W}$ , que alcanza los 3.000 m de media, para luego descender a un valle de 1.800 m situado a  $-5^{\circ}\text{W}$ . La media de R en AC es de 2.469 m, 156 m más que la del total de datos, la mediana se sitúa en 1.827 m y la desviación estándar es 2.265 m.

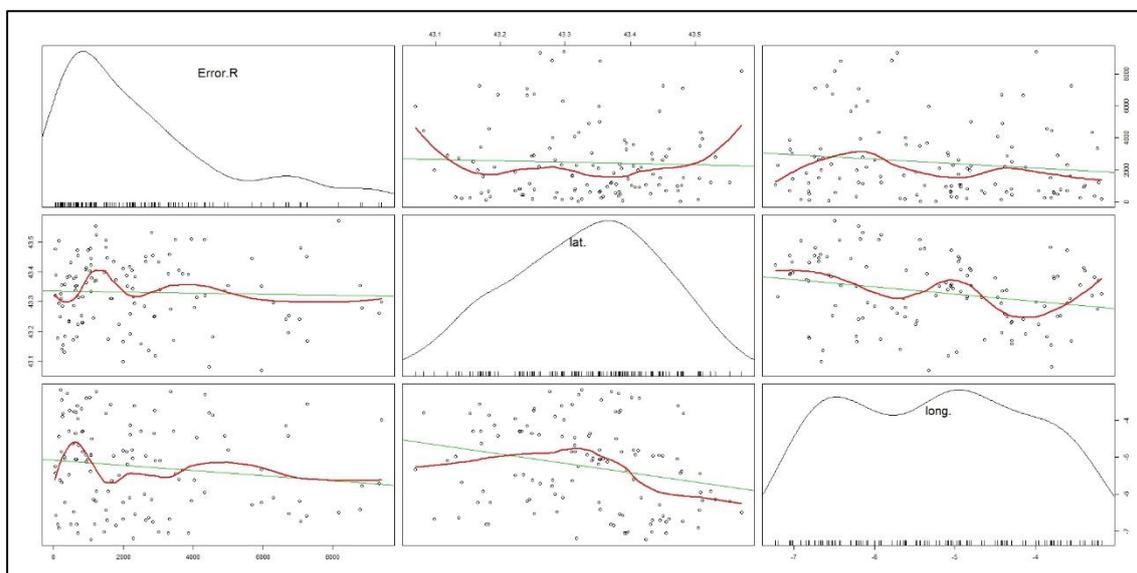


Figura 14. Diagramas de dispersión para las variables R, Latitud y Longitud, en el subconjunto A.

El siguiente conjunto de variables analizadas, ya dentro de AC, con diagramas de dispersión (Figura 15) son las que hacen referencia al número de sensores (NS) que han participado en la predicción, factor fundamental para un buen cálculo de la localización. Se advierte una clara relación entre R y NS, descendiendo el error medio con el incremento de sensores implicados (Figura 15, panel central derecho). Además, algo ya esperable, es el aumento de sensores a medida que la intensidad de la descarga crece, considerada en valor absoluto (Figura 15, panel inferior izquierdo).

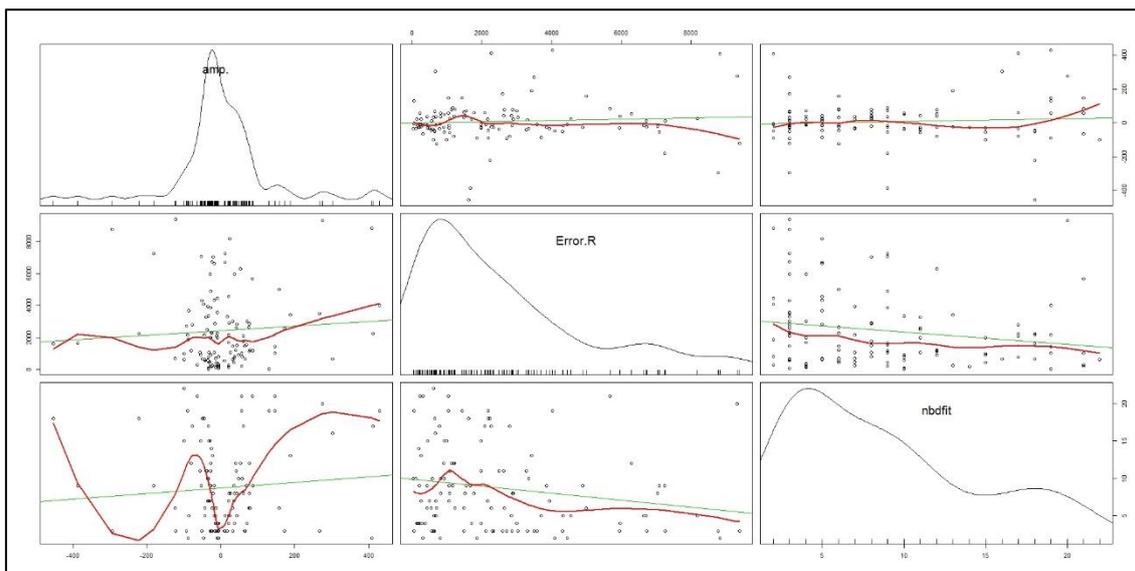


Figura 15. Diagramas de dispersión para las variables R, Amplitud y NS, en el subconjunto A.

Se supone que el número de sensores que entran en juego dependerá de la posición geográfica del evento. Para comprobar esta suposición se enfrenta NS con la latitud y la longitud (Figura 17). El máximo, mencionado anteriormente, en R, alrededor de los  $-6^{\circ}\text{E}$ , se corresponde con un descenso en NS, y el mínimo encontrado a  $-5^{\circ}\text{E}$ , con un ascenso en la media de NS. Asimismo, se observa un aumento de NS hacia el Este (Figura 17, panel inferior central).

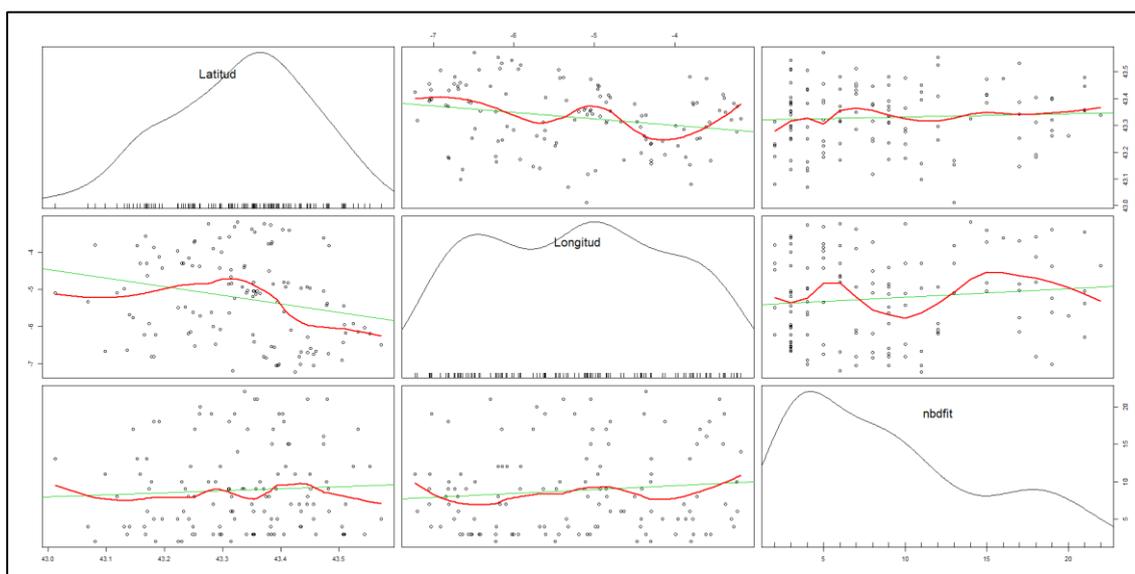


Figura 17. Diagramas de dispersión para las variables Latitud, Longitud y NS, en el subconjunto A.

Por último, considerando la variación estacional detectada en el conjunto total de datos y la relación directa entre NS y R, se cruzan estas tres variables para obtener la Figura 18. En ella se pone de manifiesto que también hay un aumento de NS en los meses estivales (Figura 18, panel inferior central).

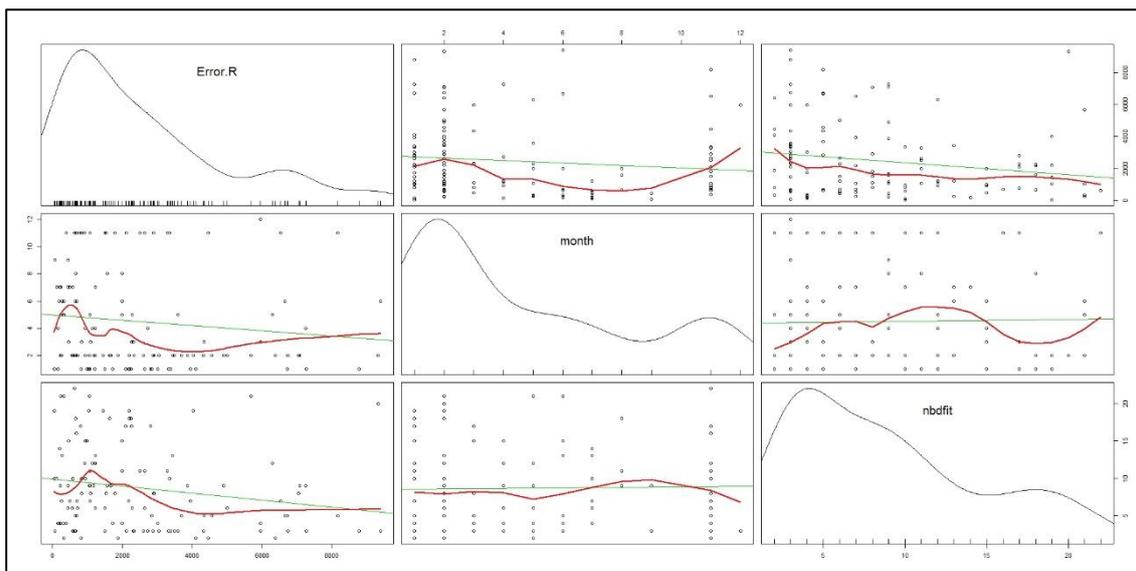


Figura 18. Diagramas de dispersión para las variables R, Mes y NS, en el subconjunto AC.

A pesar de haberse comprobado las relaciones entre número de sensores implicados en el cálculo y el error cometido y de haber atisbado pequeñas variaciones en el número de sensores con la longitud, este conjunto de datos no ofrece la consistencia necesaria para realizar un análisis fiable del error en el norte de España. La suposición de que la mayoría de incidencias de partida habían tenido lugar directamente en las antenas de comunicación no tiene suficientes garantías para considerarse verdadera en todos los eventos.

Con el fin de refinar los datos, hasta ahora evitado para no perder número de medidas, se procede a filtrarlos según los siguientes criterios:

- La distribución de R (Figura 11), con el repunte antes mencionado en los 7000 m, hace pensar que pudieran estar superponiéndose dos poblaciones distintas, quizás una de ellas correspondiente a las descargas por derivación en las instalaciones. Los errores encontrados son mucho más elevados de los esperados, para descargas sobre EA, con lo que se toma la decisión de reducir las medidas a aquellas que no superen los 5000 metros de error
- Se filtran también los datos calculados por solo dos sensores. Como se mencionó en el apartado 2.5.3, dos sensores pueden posicionar una descarga mediante DF, pero con poca fiabilidad si se produce en la línea que los une. Como, lamentablemente, no se tiene la información de que sensores participaron en cada descarga se opta por filtrarlos.
- Procedimiento habitual en los estudios sobre descargas es desechar los datos con una  $X^2$  por encima de 10 o por encima de 3, si se quiere disponer para el análisis solo con los que el sistema ha considerado óptimos. Se filtran los datos con una  $X^2$  mayor de 3.

- Por último, otro procedimiento estándar para refinar, durante un estudio, la ingente cantidad de datos que registra un LLS, es seleccionar las descargas con valores de semieje mayor de la elipse por debajo de un umbral. En este caso se toma 3 Km.

Se realizan los filtros anteriores al total del conjunto de datos,  $n=152$ , y se obtienen 102 puntos. Dentro de la cuadrícula de trabajo definida en la página 25, se ubican 85 de esos puntos, cuyas estadísticas se pueden ver en la Tabla 2. Su distribución geográfica se muestra en la Figura 19 y la distribución de R en la Figura 20,

Tabla 2. Estadísticos de los errores en el conjunto filtrado para AC.

Datos filtrados	Error X	Error Abs. X	Error Y	Error Abs. Y	Error R
Min.	-4419	1	-4699	15	34
Mediana	-24	646	-25	629	1080
Media	-61	974	-55	934	1481
Max.	3775	4419	4747	4747	4994
STD	1372	962	1335	949	1204

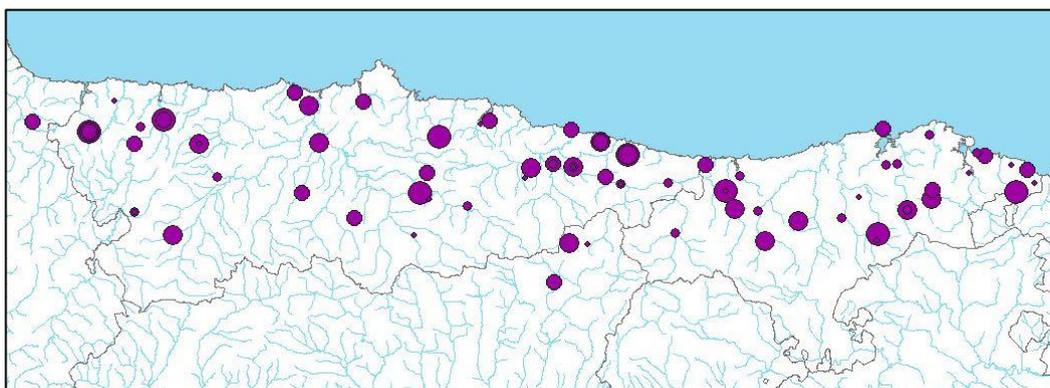


Figura 19. Distribución geográfica de los puntos filtrados en Asturias y Cantabria. Tamaño en función de R.

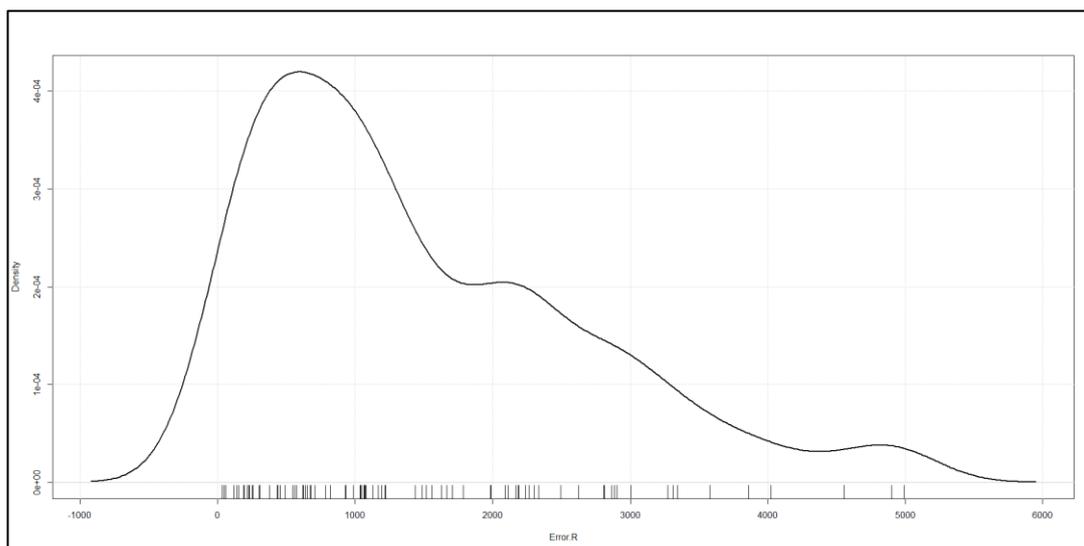


Figura 11. Estimación de densidad no paramétrica, función gaussiana, para R. Conjunto filtrado.

Después del intenso filtro aplicado a los datos, la media en Asturias y Cantabria descendiendo hasta los 1.481 m, aún muy lejos de los 500 m de media que se suponen. Se comprueban los diagramas de dispersión de R con la longitud latitud (Figura 21) con ánimo de compararla a la población AC. En la Figura 20 se aprecia una disminución del error hacia el E, así como el mismo valle entre  $-6^{\circ}\text{W}$  y  $-5^{\circ}\text{W}$  (Figura 14, panel superior derecho).

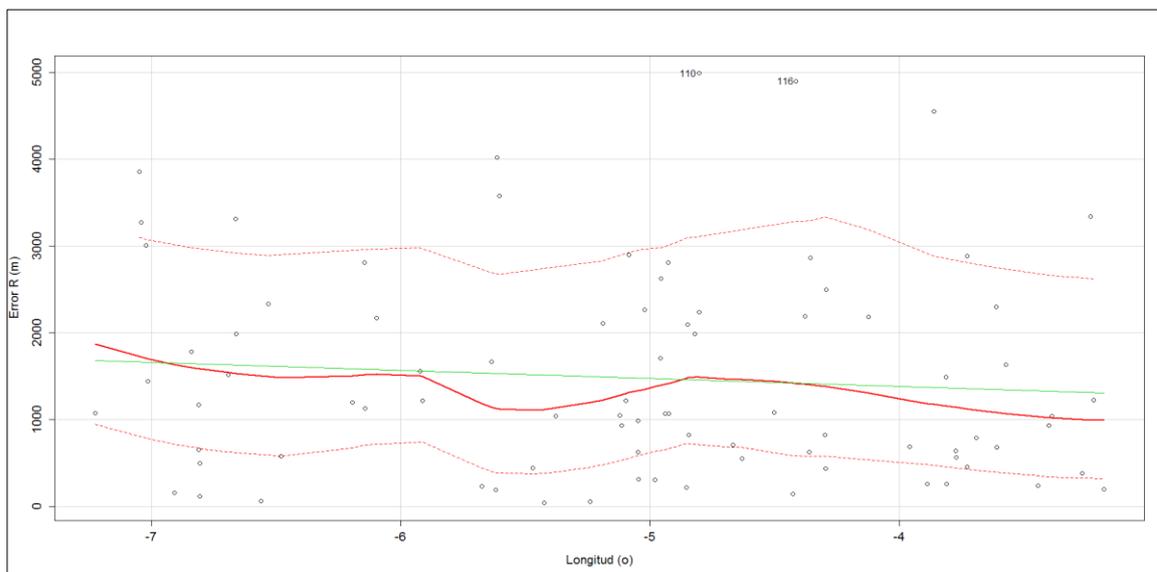


Figura 20. Diagrama de dispersión para las variables R y Longitud, en el subconjunto filtrado.

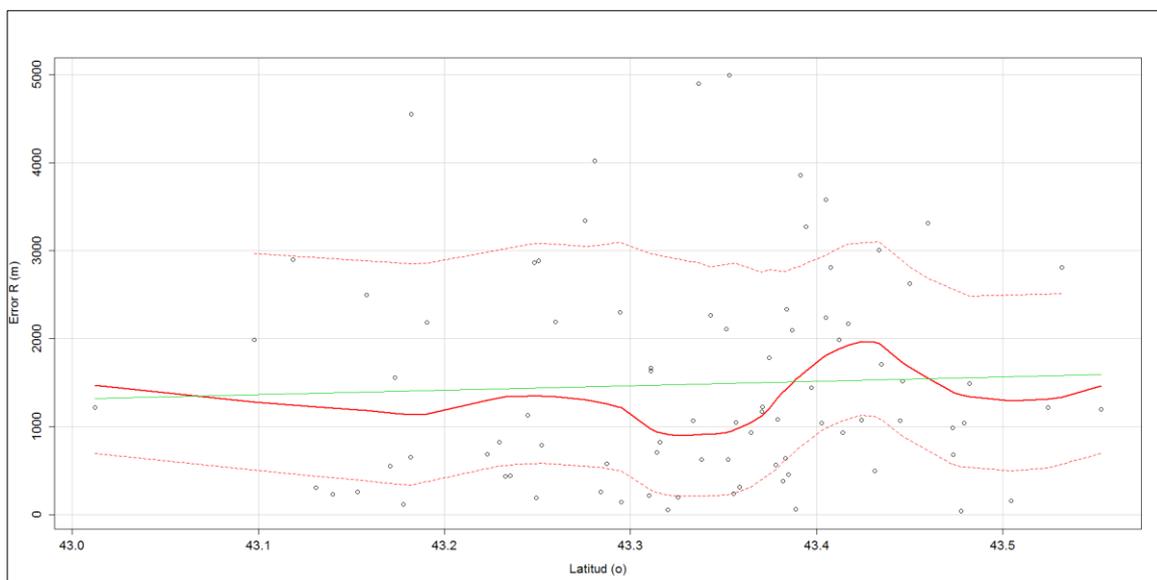


Figura 20. Diagrama de dispersión para las variables R y Latitud, en el subconjunto filtrado.

## 5.5 Elipses de error

Se ha computado el número de elipses de error en las que está contenido el punto real, para diferentes porcentajes de la elipse, desde 50 hasta 99 %, en intervalos de 5 %, excepto el último de ellos. Esto es posible gracias a la Ecuación 1, con la que se puede escalar la elipse para obtener el porcentaje deseado de probabilidad. Este análisis permite la validación de la elipse de error calculada por el sistema y su representación gráfica se aprecia en la figura 21.

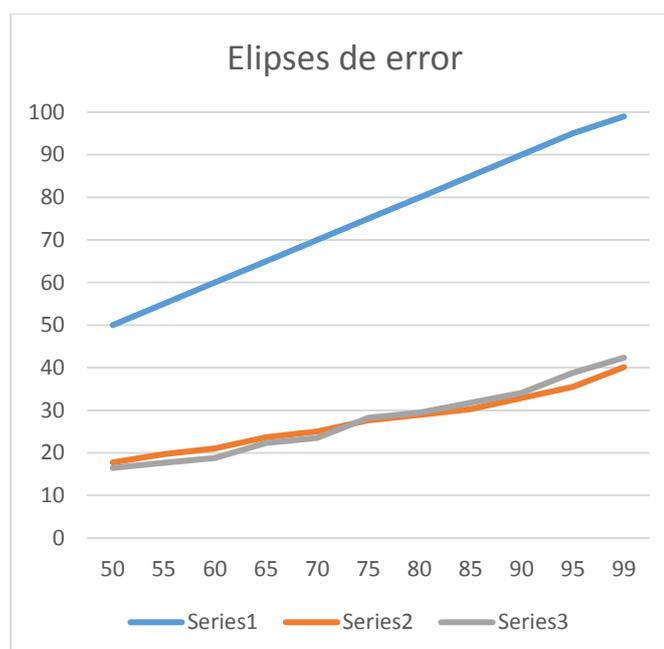


Figura 21. Porcentaje de las elipses que contienen la localización de la estructura. Azul=Línea teórica, Naranja=Conjunto de todos los datos, Gris=Conjunto Filtrado

El rendimiento del sistema se encuentra por debajo de la línea teórica, mostrando un 21 % de aciertos para la elipse de 50 % y un porcentaje de 40 para la elipse de 99 %. Los datos filtrados no muestran mejor comportamiento. Durante la realización de este análisis se observó que la orientación de la elipse es fundamental a la hora de ir escalándola hasta incluir el punto de la antena correspondiente, además de la longitud del semieje mayor. En bastantes puntos la antena se encontraba en la dirección del semieje menor de la elipse, con lo que las sucesivas ampliaciones de la elipse no alcanzaban la antena, cosa que si hubiera ocurrido de estar más alineadas la dirección del error y la de la elipse. La zona estudiada se encuentra en el borde de la red, y separada del interior de la misma por la Cordillera Cantábrica, un ente geográfico con marcada orientación Este-Oeste. Esto podría provocar que los sensores situados al sur de la cordillera participaran en menos ocasiones en los cálculos de localización, y los situados a lo largo de la costa cantábrica, supuestamente más activos, al estar colocados linealmente (Castrillón, Bilbao) introdujeran un error en el acimut de la elipse de error.

## **6. CONCLUSIONES**

Debido a la singularidad de los datos de partida (escaso número, fiabilidad, heterogeneidad) resulta difícil obtener resultados concluyentes, pero los análisis llevados a cabo son una aproximación inicial a la evaluación del rendimiento de la red de detección de rayos en la región.

Se aprecia una ligera tendencia de la LA a disminuir hacia el Este, a lo largo de Asturias y Cantabria. Este descenso se observa en los dos conjuntos de datos analizados, AC y los procedentes del filtrado. Es probable que se relacione con el aumento, también hacia el Este del número medio de sensores que participan en la localización.

La Cordillera Cantábrica, situada al sur, podría producir una zona de difícil detección para los sensores meridionales, haciendo que los situados en Bilbao y Castrillón adquieran un protagonismo poco deseado, ya que se encuentran alineados en el borde de la red, y esto puede dar lugar a mayores errores cuando operan solos.

El análisis de las elipses de confianza, indica que la red se encuentra por debajo del rendimiento ideal, tanto con los datos en bruto, como con el subconjunto filtrado. Un aspecto fundamental para posteriores análisis sería conocer los sensores específicos que intervienen en la localización de las descargas.

La metodología empleada se considera de aplicación en posteriores estudios.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

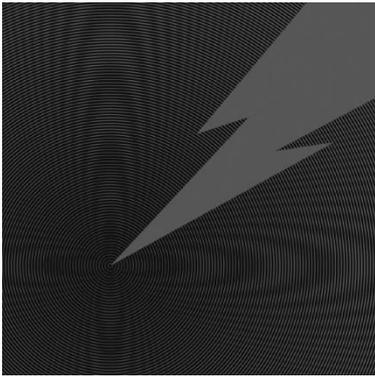
- Bermudez, J. L., F. Rachidi, W. Janischewskyj, V. Shostak, M. Rubinstein, D. Pavanello, A. M. Hussein, J. S. Chang, and M. Paolone (2007), Determination of lightning currents from far electromagnetic fields: Effect of a strike object, *J. Electrostat.*, 65, 289–295.
- Boccipio, D.J., Cummins, K.L., Christian, H.J., Goodman, S. J. (2001). *Combined satellite and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning ratio over the continental United States. Mon. Wea. Rev.* 129, 108-122.
- Cooray, V. (1987), Effects of propagation on the return stroke radiation fields, *Radio Sci.*, 22(5), 757–768.
- Cramer, J. A., and K. L. Cummins (2014), Evaluating location accuracy of lightning location networks using tall towers, in 23rd International Lightning Detection Conference & 5th International Lightning Meteorology Conference, Vaisala Inc., Tucson, Ariz.
- Cummer, S. A., G. Lu, M. S. Briggs, V. Connaughton, S. Xiong, G. J. Fishman, and J. R. Dwyer (2011). *The lightning–TGF relationship on microsecond timescales*, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L14810.
- Cummer, S. A., Y. Zhai, W. Hu, D. M. Smith, L. I. Lopez, and M. A. Stanley (2005). *Measurements and implications of the relationship between lightning and terrestrial gamma ray flashes*, *Geophys. Res. Lett.*, 32, L08811.
- Cummins, K. L., M. J. Murphy, J. A. Cramer, W. Scheftic, N. Demetriades, and A. Nag (2010), Location accuracy improvements using propagation corrections: a case study of the U.S. National Lightning Detection Network, 21st Intl. Lightning Detection Conf., Orlando, Fla.
- Cummins, K., and M. Murphy (2009). *An overview of lightning locating systems: History, techniques, and data uses, with an in-depth look at the US NLDN*, *IEEE Trans. Electromag. Compat.*, 51(3), 499–518.
- Diendorfer, G. (2010), LLS performance validation using lightning to towers, in 21st International Lightning Detection Conference & 3rd International Lightning Meteorology Conference, Orlando, Fla.
- Diendorfer, G., W. Schulz, and M. Mair (2000b), Evaluation of a LLS based on lightning strikes to an instrumented tower, in 16th International Lightning Detection Conference, Tucson, Ariz.
- Honma, N., K. L. Cummins, M. J. Murphy, A. E. Pifer, and T. S. Rogers (2013), Improved lightning locations in the Tohoku Region of Japan using propagation and waveform onset corrections, *IEEJ Trans. Power Energy*, 133(2), 195–202.
- Ishii, M., M. Saito, T. Miki, D. Tanaka, T. Shindo, A. Asakawa, H. Motoyama, Y. Suzuhigashi, H. Taguchi, (2014) "Observation of lightning at Tokyo Skytree", *Proc. Of 23rd Int. Lightning Detection Conference (ILDC)*, Tucson, U.S.A.
- Krider, E. P., R. C. Noggle, and M. A. Uman (1976). *A gated, wideband magnetic direction finder for lightning return strokes*, *J. Appl. Meteorol.*, 15(3), 301–306.
- Malan, D. (1963). *Physics of Lightning*, 1st ed., English Univ. Press, London.
- Mata, C. T., J. D. Hill, A. G. Mata, and K. L. Cummins (2014), Evaluation of the performance characteristics of CGLSS and NLDN based on two years of ground-truth data from launch complex 39B, Kennedy Space Center, Florida, in 23rd International Lightning Detection Conference & 5th International Lightning Meteorology Conference, *Vaisala Inc., Tucson, Ariz.*

- Nag, A., M. J. Murphy, W. Schulz, and K. L. Cummins (2015) *Lightning locating systems: Insights on characteristics and validation techniques*, Earth and Space Science, 2, 65–93.
- Pavanello, D., et al. (2007a), On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures: 2. Experiment and model validation, J. Geophys. Res., 112, D13101.
- Pavanello, D., F. Rachidi, M. Rubinstein, J. Bermudez, W. Janischewskyj, V. Shostak, C. Nucci, A. Hussein, and J. Chang (2007b), On return stroke currents and remote electromagnetic fields associated with lightning strikes to tall structures: 1. Computational models, J. Geophys. Res.,
- Pavanello, D., F. Rachidi, W. Janischewskyj, M. Rubinstein, V. Shostak, C. A. Nucci, K. L. Cummins, A. M. Hussein, and J. S. Chang (2009), On the current peak estimates provided by lightning detection networks for lightning return strokes to tall towers, IEEE Trans. Electromagn. Compat., 51(3), 453–458.
- Pichler, H., G. Diendorfer, and M. Mair (2010), Some parameters of correlated current and radiated field pulses from lightning to the Gaisberg Tower, IEEJ Trans. Electr. Electr. Eng., 5(1), 8–13.
- Rakov, V. A. (2008). *Lightning electromagnetic environment: From continuing-current fields to X-rays*, in Intl. Conf. on Grounding and Earthing & 3rd Intl. Conf. on Lightning Phys. and Effects, Florianopolis, Brazil.
- Rakov, V. A., and M. A. Uman, (2003). *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, 687 pp.
- Romero, C., M. Paolone, F. Rachidi, M. Rubinstein, A. Rubinstein, G. Diendorfer, W. Schulz, M. Bernardi, and C. A. Nucci (2011), Preliminary comparison of data from the santis tower and the euclid lightning location system, XIth International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Fortaleza, Brazil, 3–7 Oct.
- Schulz, W., C. Vergeiner, H. Pichler, G. Diendorfer, and S. Packet (2012), Validation of the Austrian Lightning Location System ALDIS for negative flashes, in Proc. CIGRE Symposium.
- Schulz, W., H. Pichler, G. Diendorfer, C. Vergeiner, and S. Pack (2013), Validation of detection of positive flashes by the Austrian Lightning Location System (ALDIS), in 12th Intl. Symposium on Lightning Protection (XII SIPDA), paper 2.2, Belo Horizonte, Brazil.
- Serhan, G., M. Uman, D. Childers, and Y. Lin (1980). *The RF spectra of first and subsequent lightning return strokes in the 1-to 200-km range*, Radio Sci., 15(6), 1089–1094.
- Simpson, B., and Robinson, F. (1941). *Atmospheric Electricity*, 2nd Ed. Methuen, London.
- Simpson, G. and Scrase, F.J. (1937). *The Distribution of Electricity in the Thunderclouds*, Proc. R. Soc. London Ser. A, 161: 309-352.
- Uman, M.A. (1969). *The Earth and its Atmosphere as a Leaky Spherical Capacitor*, Am. J. Phys., 42, 1033-1035.
- Weidman, C., E. Krider, and M. Uman (1981). *Lightning amplitude spectra in the interval from 100 kHz to 20 MHz*, Geophys. Res. Lett., 8(8), 931–934.
- Williams, e. R. (1989). *The Tripole Structure of Thunderstorms*, J. Geophys. Res., 94(D11), 13,151–13,167.
- Vocabulario Meteorológico Internacional, OMM - Nº 182.
-

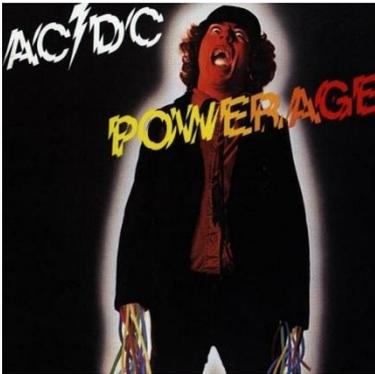
AEMET, Curso de Generación y explotación de productos de radiodetección Plan Anual de Formación de la AEMET, Madrid, 1-4 octubre 2012.

*Encyclopedia Britannica*

*Para María "Black Lightning", y*



*para Dani "Powerage",*



*sin ellos, ni rayos, ni centollos,  
sin ellos no hay nada.*