

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

ANÁLISIS DE LAS DESCARGAS ELÉCTRICAS **EN EL PRINCIPADO DE ASTURIAS**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

MÁSTER EN TELEDETECCIÓN Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Autor: David Prieto Sisniega

Julio de 2014

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.

Los resultados han sido obtenidos a partir de la información cedida por la Agencia Estatal de Meteorología. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

AGRADECIMIENTOS

Gracias en primer lugar a los docentes y profesionales que han facilitado que yo pueda realizar este trabajo. En primer lugar Manuel Antonio Mora García, mi tutor para este trabajo, por motivar mi creciente interés en este campo y también a Susana del Carmen Fernández Menéndez por su colaboración decisiva para completar el trabajo.

A mis compañeros de Máster, especialmente a Jesús, Eduardo, Guillermo y Miren, porque creo que nos llevamos mucho más que un puñado de conocimientos.

Pero sobre todo gracias a mi familia y a mi pareja porque son quienes se sacrifican para completar mi formación y soportan mis agobios y mis miedos.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1 INTRODUCCIÓN	4
2 OBJETIVOS	5
3 PROCEDIMIENTO	6
3.1 Área de estudio.....	6
3.2 Datos de partida.....	7
3.3 Tratamiento de los datos.....	9
3.4 Análisis y metodología.....	10
4 RESULTADOS	14
4.1 Distribución temporal de las descargas eléctricas.....	14
4.2 Distribución espacial de las descargas eléctricas.....	18
4.3 Número medio de días de tormenta.....	27
4.4 Parámetros eléctricos: Polaridad y Multiplicidad.....	29
4.4.1 Polaridad.....	29
4.4.2 Multiplicidad.....	30
4.5 Actividad eléctrica en relación con la altitud.....	34
4.6 Actividad eléctrica en relación con los usos del suelo.....	39
4.7 Actividad eléctrica en relación con los tipos de suelo.....	43
5 CONCLUSIONES	47
6 BIBLIOGRAFÍA	48

RESUMEN

En este trabajo se estudian las descargas eléctricas de tipo nube-tierra que han tenido lugar en el Principado de Asturias entre el año 2000 y el año 2013 incluido. Esto se ha hecho a través de la información obtenida de la Base de Datos de Rayos (BDRAY) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para hacer dicho estudio se ha recurrido a la consulta de trabajos de otros autores aplicados en otras regiones tanto a nivel nacional como internacional. Los datos en bruto se han tratado previamente de acuerdo a los criterios establecidos por otros autores con el fin de realizar una climatología descriptiva analizando la evolución de la actividad eléctrica en el Principado de Asturias. Además se ha cruzado la información obtenida con información referente a los tipos y usos del suelo en busca de la obtención de alguna relación de la actividad eléctrica con elementos terrestres, tanto naturales como artificiales.

ABSTRACT

In this study, the electrostatic discharge lightning between a cloud and the surface of the earth were studied in the Principality of Asturias. The data were obtained from the national Meteorological Agency (AEMET) Database Ray (BDRAY). We include different literature reviews from national and international authors' who use the same methodology for another regions. The raw data were pre-treated according to the criteria established by other authors in order to perform a descriptive weather by analyzing the evolution of the electrical activity in the Study area. In addition, the soil type and soil uses data were analyzed to see the relationship between electrical activity and both natural and artificial terrestrial elements.

1 INTRODUCCIÓN

Las descargas eléctricas suponen un fenómeno muy común en España, por lo que la actividad eléctrica asociada a ellas, es decir, la descarga de rayos, es un proceso que no se hace desconocido a la población, pero del que sí se tiene un cierto grado de desconocimiento en cuanto a los procesos que los originan, así como al comportamiento de éstos durante el desarrollo de las tormentas.

Las descargas eléctricas son uno de los fenómenos que se producen durante la actividad de una tormenta, a las cuales también aparecen asociados otros fenómenos como la lluvia, el granizo, la nieve y los vientos principalmente. Las tormentas se definen como una *“Descarga brusca de electricidad atmosférica que se manifiesta por un resplandor breve (relámpago) y por un ruido seco o un estruendo sordo (trueno)”* (Organización Meteorológica Mundial (OMM), 1992). La electricidad es una característica normal de la atmósfera. La atmósfera forma parte de un circuito global eléctrico asociado a la Tierra en el que se producen diferentes movimientos de cargas ayudados por procesos dinámicos de convección y de temperatura. Dentro de la atmósfera, la ionosfera tiene un papel protagonista en el circuito global, ya que en ella es donde la atmósfera sufre un aumento destacado de la conductividad eléctrica, en torno a una altitud situada en un intervalo de entre unos 70 y 80 km de altura sobre la superficie. Esta capa es la responsable de que en situaciones de estabilidad y cielo despejado haya siempre una pequeña conductividad eléctrica motivada por los iones que circulan libremente tras haber chocado con rayos cósmicos que, al encontrarse con elementos gaseosos neutros, liberan electrones. La radiación ultravioleta también es un factor de ionización de la atmósfera aunque influye en menor medida. En última instancia puede considerarse también la propia radiación terrestre natural como un factor de efecto muy tenue y únicamente sobre las zonas continentales. Esta corriente es conocida como *“corriente de buen tiempo”* (AEMET) Bajo estas condiciones la Tierra queda cargada negativamente y la atmósfera positivamente, pareciendo el circuito global una especie de gran condensador en el cual las nubes influyen atrapando algunas de estas partículas eléctricas. Por ello las nubes, especialmente los cumulonimbos que se caracterizan por un gran desarrollo vertical, son las principales responsables de la generación de las descargas eléctricas, ya que tienden a la polarización de las cargas y la descarga eléctrica es la manifestación de ese diferencial.

Dentro de las descargas eléctricas, atendiendo a la clasificación de Manuel Mora en su tesis doctoral *“La Actividad tormentosa en Castilla y León”* (Mora, 2012), podemos distinguir cuatro tipos principales como son:

- Descargas intranube: Son aquellas descargas cuyo principio y fin se sitúa en la misma nube.
- Descargas nube-nube: Su origen está en una nube y su fin en otra nube.

- Descargas nube-aire: Su origen está en la nube y su fin en el aire claro.
- Descargas nube-tierra: Las que tienen su origen en la nube y su fin en la superficie terrestre.

En este trabajo analizaremos los rayos nube-tierra ya que es la que a nivel antrópico interesa más por ser un tipo de descarga que interactúa directamente con la superficie terrestre. Las descargas nube-tierra no suponen la mayoría de las descargas ya que, por ejemplo, las descargas nube-nube tienen una proporción muy variable, oscilando entre 3 y 10 descargas por cada descarga nube-tierra. En nuestras latitudes se considera un valor de hasta 5 rayos nube-nube por cada descarga nube-tierra (Mora, 2012). Otros autores cifran este último valor en 3. No se han encontrado referencias en la bibliografía consultada sobre proporciones de los demás tipos de rayos. Nos centramos en este estudio en la primera descarga eléctrica y su localización, aunque es sabido que los rayos pueden tener a su vez varias descargas posteriores no precisamente en la misma ubicación, aunque sí próximas. Este hecho se conoce como multiplicidad del rayo, y puede oscilar entre 1 y 15 réplicas cada rayo.

2 OBJETIVOS

En el presente trabajo se persiguen varios objetivos. En primer lugar, el hecho de que no se haya realizado un estudio sobre este campo de la meteorología en el Principado de Asturias hace necesario que el objetivo principal sea el de alcanzar una primera aproximación al conocimiento de la actividad eléctrica y su evolución que, si bien ya ha sido estudiada en otras regiones de España y de otros países del mundo, es hasta ahora inédito en la región. Aunque sería pretencioso el querer modelizar el comportamiento de las descargas eléctricas debido a las incertidumbres que a día de hoy existen respecto a su génesis y su naturaleza (Mora, 2012), sí que al menos se pretende realizar una pequeña climatología descriptiva de la actividad eléctrica atmosférica en los primeros 14 años del siglo XXI y buscar particularidades en relación a diferentes parámetros como la distribución espacial y temporal a través de diferentes aspectos de carácter físico. El tratamiento y análisis de los datos obtenidos gracias a la AEMET, además, está directamente relacionado con poner en conocimiento el impacto, si lo hubiera, de la actividad eléctrica atmosférica sobre las diferentes actividades que potencialmente se desarrollan según el uso del suelo catalogado, como pueden ser determinadas localizaciones y elementos urbanos e industriales. De la misma manera, la elaboración de la información puede servir de base para posteriores estudios que profundicen en el estudio de la actividad eléctrica o ponerla en relación a otros fenómenos meteorológicos y/o consecuencias de la ocurrencia de éstos.

3 PROCEDIMIENTO

3.1 Área de estudio

La región de estudio para este trabajo es Asturias. El Principado de Asturias es una Comunidad Autónoma de España situada en el norte de la Península Ibérica (Figura 1). Tiene una superficie de 10.602,46 km² y una población total de 1.058.976 personas (Instituto Nacional de Estadística (INE), 2014).

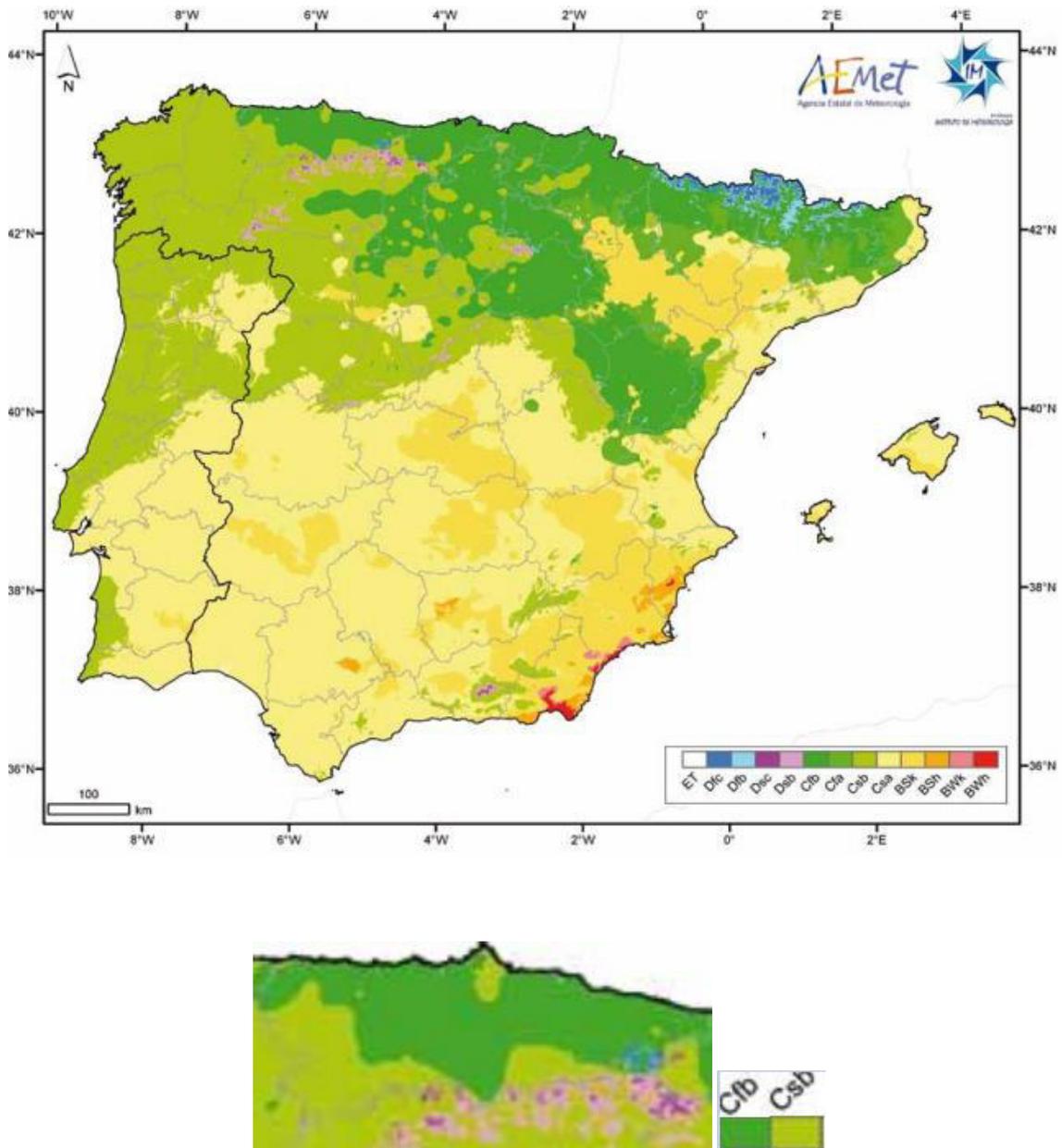


Figura 1: Captura del mapa de climas según la clasificación de Köppen. a) Península Ibérica. b) Detalle sobre el Principado de Asturias. Fuente: Atlas Climático Ibérico. AEMET.

El clima de Asturias se engloba, según de la clasificación climática de Köppen para la Península Ibérica (Atlas Climático Ibérico– AEMET, 2011), dentro de los climas denominados “Cfb” caracterizados por ser climas templados, sin estación seca y con veranos templados. A medida que nos adentramos hacia la Península la región va ganando en continentalidad, siendo más frecuente los veranos más secos, con una clara influencia de la Cordillera Cantábrica. En estas zonas del sur y suroeste el clima es “Csb”, templado con verano seco y templado.

Las precipitaciones anuales superan los 1000 mm, siendo las temperaturas en general suaves (Tabla 1), tanto en verano como en invierno.

Mes	T	TM	Tm	R	H	DR	DN	DT	DF	DH	DD	I
Enero	8.0	11.7	4.2	85	76	10	1	1	5	3	4	117
Febrero	8.8	12.8	4.8	85	75	11	1	1	5	2	3	117
Marzo	10.0	14.4	5.6	82	75	11	1	1	6	1	3	147
Abril	10.6	14.9	6.3	109	77	13	0	2	8	0	2	152
Mayo	13.3	17.6	9.1	94	79	12	0	3	10	0	2	158
Junio	16.1	20.3	11.9	53	80	8	0	2	11	0	2	168
Julio	18.3	22.4	14.1	52	80	8	0	3	12	0	3	174
Agosto	18.7	22.8	14.5	55	81	8	0	3	12	0	3	171
Septiembre	17.3	21.7	12.9	64	79	8	0	2	11	0	3	154
Octubre	14.0	18.1	10.0	98	79	11	0	1	9	0	2	134
Noviembre	10.8	14.6	7.1	101	78	11	0	1	7	0	3	114
Diciembre	9.0	12.5	5.5	96	76	11	0	1	5	2	3	105
Año	12.9	17.0	8.8	973	78	122	5	20	100	8	33	1711

Legenda

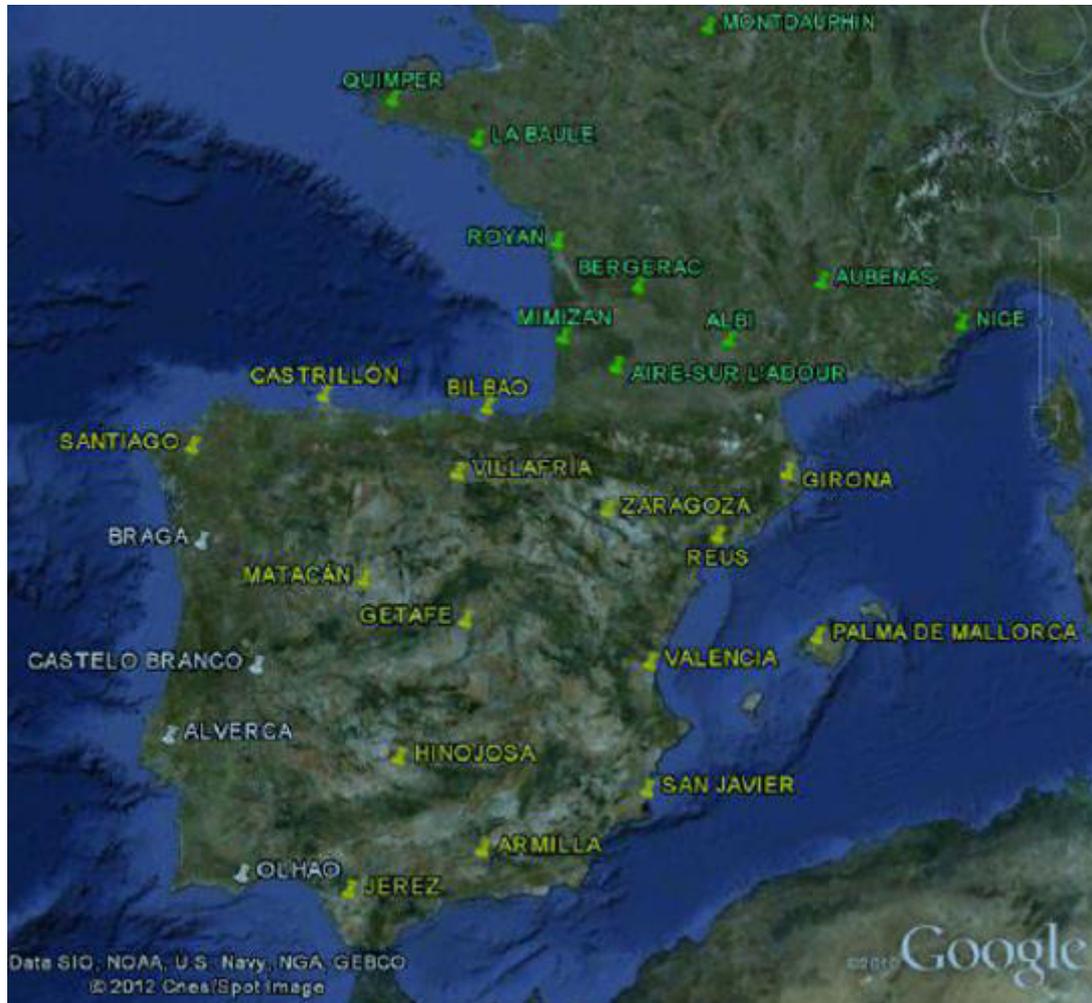
- T Temperatura media mensual/anual (°C)
- TM Media mensual/anual de las temperaturas máximas diarias (°C)
- Tm Media mensual/anual de las temperaturas mínimas diarias (°C)
- R Precipitación mensual/anual media (mm)
- H Humedad relativa media (%)
- DR Número medio mensual/anual de días de precipitación superior o igual a 1 mm
- DN Número medio mensual/anual de días de nieve
- DT Número medio mensual/anual de días de tormenta
- DF Número medio mensual/anual de días de niebla
- DH Número medio mensual/anual de días de helada
- DD Número medio mensual/anual de días despejados
- I Número medio mensual/anual de horas de sol

Tabla 1: Valores climatológicos normales en el Principado de Asturias (1972-2000). Fuente: AEMET.

3.2 Datos de partida

Para la realización de este análisis, se han utilizado datos pertenecientes a la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) que provienen de su Red de Detección de Rayos (REDRA). REDRA está compuesta por veinte equipos de detectores de descargas eléctricas distribuidos por el territorio español, incluyendo las Islas Baleares y las Islas Canarias. La cobertura (y por tanto la fiabilidad) es ampliada además por la información que le aporta la red de detectores portuguesa con cuatro dispositivos, así como la red francesa que da información a la AEMET a través de otros diez dispositivos (Figura 2).

Estos dispositivos consisten en unos sensores capaces de detectar la radiación electromagnética de las descargas eléctricas, enviando los datos a otro subsistema de la red que los interpreta y, de esta manera, sitúa en el espacio y en el tiempo las descargas y nos da a conocer sus características físicas.



Figuras 2: Distribución de los detectores de los rayos recibidos en AEMET de las redes española (amarillo), portuguesa (azul) y francesa (verde). a) Península Ibérica y las Islas Baleares. b) Islas Canarias. Fuente: Mora (2012).

Los datos vienen recogidos en un formato “.csv” fácilmente legibles por cualquier programa de hoja de cálculo. Los parámetros que proporciona son varios, de los cuales los que vamos a manejar son:

- Parámetros físicos:
 - Polaridad e intensidad de descarga: Aporta información sobre la polaridad de la descarga así como su intensidad. La polaridad indica si la transferencia de cargas de un rayo es positiva o negativa. La intensidad de descarga se mide en kiloamperios (kA).
 - Multiplicidad: Hace referencia al número de veces en el cual la descarga eléctrica se replica.
 - Orden Descarga: Nos dice numéricamente el orden de descarga del rayo.

- Parámetros de localización:
 - Hora UTC (Universal Time Coordinated): Disponemos de la hora estimada a la cual se produjo la detección del rayo con precisión de segundos. En España la hora tenemos la franja horaria UTC+1 y en el periodo de verano, UTC+2.
 - Año
 - Coordenadas Latitud/Longitud con el geoide WGS84 (World Geodetic System): Sitúan la descarga en el espacio con un datum. Son fundamentales para su utilización posterior en el Sistema de Información Geográfica (SIG).

- Parámetros referentes a la fiabilidad del dato de localización:
 - Elipse de error: Dato definido por los semiejes menor y mayor de la elipse que encierra la región en la que ha habido una descarga eléctrica. Estos semiejes están medidos en km.
 - Chi²: Con la información de localización de los diferentes sensores, se realiza un proceso de localización por ajuste de mínimos cuadrados, siendo la mejor localización la que minimiza la función chi² de Pearson. Los valores entre 0 y 3 se consideran óptimos, entre 3 y 10 aceptables y los superiores a 10 pierden fiabilidad.

3.3 Tratamiento de los datos

Con los datos en bruto es difícil realizar un análisis válido y comparable con otros estudios en regiones en los que ya han sido filtrados. Por ello, primeramente, se ha seleccionado de la base de datos solamente la primera descarga de cada rayo, pues el

resto son réplicas del primero. Este primer rayo tiene asignado en la base de datos su valor de multiplicidad, que oscila entre 1 y 14 réplicas.

En segundo lugar se ha realizado un filtrado de calidad de los datos que se considera apto para el estudio de las descargas en el Principado de Asturias. Este filtrado sigue el mismo criterio que los que utilizan Álvarez et al. (2011) y Mora (2012) para sus estudios sobre Aragón y Castilla-León, respectivamente. Los criterios son:

- Chi^2 menor de 10.
- Semieje menor de la elipse de error inferior a 3 kilómetros
- Semieje mayor de la elipse de error inferior a 6 kilómetros

Con este filtrado para el periodo desde el año 2000 hasta el año 2013 incluido, se registraron en la región de estudio 94.749 rayos. Con esta base de datos filtrada analizamos la distribución temporal de los rayos, su distribución espacial, la polaridad, la multiplicidad y la relación de los rayos con respecto a la altitud.

Posteriormente se realiza un segundo filtrado de los datos en el cual se consideran sólo aquellos de alta calidad y mayor precisión. Tras esta depuración la base de datos queda reducida a 56.020 rayos con los criterios:

- Chi^2 menor que 3
- Semieje menor de la elipse de error inferior a 0,5 kilómetros
- Semieje mayor de la elipse de error inferior a 1 kilómetro

Con esta base de datos depurada analizamos la relación de los rayos con la tipología de los suelos y sus usos. Los resultados presentados en las diferentes figuras que representan el Principado de Asturias están a una escala 1:1.000.000. El motivo de escoger esta escala es el de mejorar la visualización y no el de darle una validez cartográfica, ya que, con un tamaño mínimo de información (píxel) de 1 km de resolución espacial la escala máxima a la que podría representarse (aplicando el límite de percepción visual de 0,2 mm) sería de 1:5.000.000.

3.4 Análisis y metodología

Los análisis que se realizarán y la metodología que se empleará en cada uno de ellos son los siguientes:

a) Distribución temporal de los rayos

Utilizando herramientas estadísticas de Excel se estudia la distribución temporal (periodo 2000-2013) de la actividad eléctrica agrupada por años, meses y horas (tiempo universal coordinado o Universal Time Coordinated (UTC)) para ver si existen particularidades en la evolución de la actividad eléctrica en diferentes escalas de tiempo.

Con ello se pretende conocer, si las hubiera, pautas de comportamiento de las descargas eléctricas comparando con otras regiones.

b) Distribución espacial de los rayos

Con el empleo de un SIG (ArcGIS 10.1) se analiza la densidad media de rayos sobre la superficie del Principado de Asturias para el periodo 2000-2013. La densidad es la relación entre el número de eventos por la superficie en la que se han producido. Para ello se divide la región y su entorno en cuadrículas de diferentes tamaños que tienen un valor de densidad asignado a cada uno. El motivo de la elaboración de varios mapas de densidad a diferentes resoluciones de cuadrícula se debe al hecho de poder comparar con otros estudios que utilizan esas determinadas resoluciones. La gran mayoría de las climatologías descriptivas de rayos a nivel mundial realizan los cálculos a una resolución de 20 x 20 km por lo que se ha elegido esa resolución como una de las aptas. Por otro lado, se elige la resolución de 4 x 4 km para aumentar la precisión del dato y además, este tamaño coincide con el tamaño habitual de algunas tormentas severas y con la distancia aproximada a la cual es audible un trueno. En este sentido, una tercera resolución de cuadrícula de 1x1 km parece apropiada para la localización de alguna singularidad notable.

Con esta resolución precisa también se analiza la densidad media para cada mes en el periodo de estudio, buscando ver la evolución de la actividad eléctrica durante las diferentes estaciones del año.

c) Número medio de días de tormenta

Como se ha dicho anteriormente, la actividad eléctrica es una de las manifestaciones físicas del desarrollo de las tormentas. Además de conocer dónde se han producido los eventos (rayos) en el terreno, se agrupan con respecto a la fecha en la que se produjeron. Por ello igualmente se divide el terreno en cuadrículas con resolución 4x4 km y se realiza un conteo del número de días de tormenta por cada cuadrícula filtrando los datos con un gestor de base de datos (Access). Este dato se divide entre el número de años de estudio para obtener un valor medio y se añade al SIG para su representación. En este caso el interés se centra en el número de días de tormenta sobre cada cuadrícula independientemente de que haya habido mayor o menor actividad eléctrica en cada día de ocurrencia. Por ello es suficiente tomar en cuenta el primer rayo de cada fecha de la base de datos. Cada cuadrícula representará el número medio de días de tormenta.

d) Parámetros eléctricos: Polaridad y multiplicidad

La polaridad y la multiplicidad son los parámetros eléctricos que definen los rayos. Con estos datos se han calculado los promedios anuales de polaridad a través de la medición de la intensidad media anual, el cual nos indica la polaridad por su signo negativo o positivo. También aparecen en el análisis los promedios anuales de multiplicidad, para ver el número medio de réplicas anuales, y fiabilidad del dato, para comprobar si existe alguna evolución positiva o negativa en cuanto a la localización de los eventos. Además se ha analizado la distribución mensual de cada uno de ellos y se han generado un mapa de densidad de resolución 4x4 km que representa la multiplicidad media de los rayos en el Principado de Asturias.

e) Actividad eléctrica en relación con la altitud

Para estudiar con detenimiento la relación entre los rayos y la altitud, se ha asignado a cada evento de nuestra base de datos la altitud a la que descargó el rayo con un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) raster de 25 m de resolución espacial (tamaño de la unidad mínima de información o píxel) obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN). Tras ello se ha dividido tanto el MDE como los rayos en rangos de altitud de 150 m y se ha calculado el área de cada uno de esos intervalos, obteniendo la densidad media anual para cada intervalo dividiendo entre el número de años de la serie objeto de estudio. Para desligar la densidad media anual de la dimensión del área de cada intervalo, se ha ponderado la densidad por el área total y el número de rayos totales. Esto es, dividir el valor de densidad media anual de cada intervalo de altura por el número de rayos totales y multiplicar después por el área total del Principado de Asturias. Las áreas con valores mayores a 1 serán las que muestren predisposición a ser impactadas por los rayos.

f) Actividad eléctrica en relación con los usos del suelo

La transferencia de energía en la superficie terrestre puede verse condicionada por el tipo de superficie que la cubre debido a las diferentes características de cada una como el albedo, el coeficiente de fricción, la humedad o la capacidad calorífica (Chagnon y Semonin, 1979). Previamente a este estudio ya ha habido alguna investigación en la que se quiere comprobar si hay alguna relación entre la caída de rayos y los usos del suelo (Mora, 2012). Se ha procedido de igual manera con el Principado de Asturias, utilizando el mapa Corine Land Cover de 2006 descargado del IGN. El "programa Corine" comenzó en 1985 en la Unión Europea buscando el objetivo de ser *"un proyecto experimental para la recopilación, la coordinación y la homogenización de la información sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales en la Comunidad"* – IGN. Es, por tanto, un mapa representativo a escala europea y es desde 1995 responsabilidad de la Agencia Europea del Medio Ambiente. Su objetivo es *"obtener una base de datos*

europea de ocupación del suelo a escala 1:100.000, útil para el análisis territorial y la gestión de políticas europeas”- IGN.

Con este mapa, se ha separado la información en diferentes capas con las distintas zonas de usos de suelo según la propia clasificación CORINE y se ha procedido tal y como se hizo en el apartado anterior, es decir, calculando la densidad para cada uso y ponderándola después por el área total y los rayos totales para ver la predisposición a recibir descargas en cada uso, sin estar cada una condicionada por su diferente extensión. Los valores por encima de 1 indican predisposición a la caída de rayos.

g) Actividad eléctrica en relación con los tipos de suelo

Tal y como ocurre con los usos del suelo, el estudio de la actividad eléctrica en relación a los tipos de suelo es algo novedoso ya que no se han encontrado referencias bibliográficas más allá del estudio de la actividad eléctrica en Castilla-León (Mora, 2012). Para proceder en este ámbito, antes de poder empezar se ha tenido que crear un mapa de tipos de suelo para el Principado de Asturias. La elaboración de este mapa se ha realizado gracias al conocimiento y colaboración decisiva de Susana del Carmen Fernández Menéndez, doctora en Geología y profesora titular de la Universidad de Oviedo y docente en la asignatura “Aplicaciones SIG en Geología” del Máster en Teledetección y Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Oviedo. A partir del mapa de las grandes unidades litológicas del Principado de Asturias, aplicando una serie de criterios se ha obtenido dicho mapa. Puede verse en el documento anejo.

Una vez obtenido el mapa, se procede de igual manera que con los usos del suelo, extrayendo cada tipo de suelo para calcular las densidades y ponderándolas después por el área y los rayos totales y con la altitud media.

4 RESULTADOS

4.1 Distribución temporal de los rayos

Según se ha explicado en el apartado anterior, se procede ahora a comentar la distribución temporal de las descargas eléctricas mostrada en la Figura 3. Para su elaboración recordemos que se ha usado la base de datos de 94.749 rayos totales entre 2000-2013.

El primer rasgo a destacar es la elevada variabilidad interanual de estos fenómenos ya que su distribución a lo largo de los años es muy diversa. El máximo absoluto se registra en el año 2006 con 13.267 rayos. Solamente los años 2001, 2004 y 2006 superan los 10.000 eventos registrados. El mínimo lo encontramos en el año 2010 con apenas 1.644 rayos. Los años 2000, 2009 y 2013 superan por poco los 2.000 eventos. Esta fuerte variabilidad está en relación directa con la propia variabilidad del clima y las características intrínsecas del propio fenómeno tormentoso, que requiere condiciones muy específicas a variedad de escalas (microfísica de nubes hasta condiciones sinópticas ambientales).

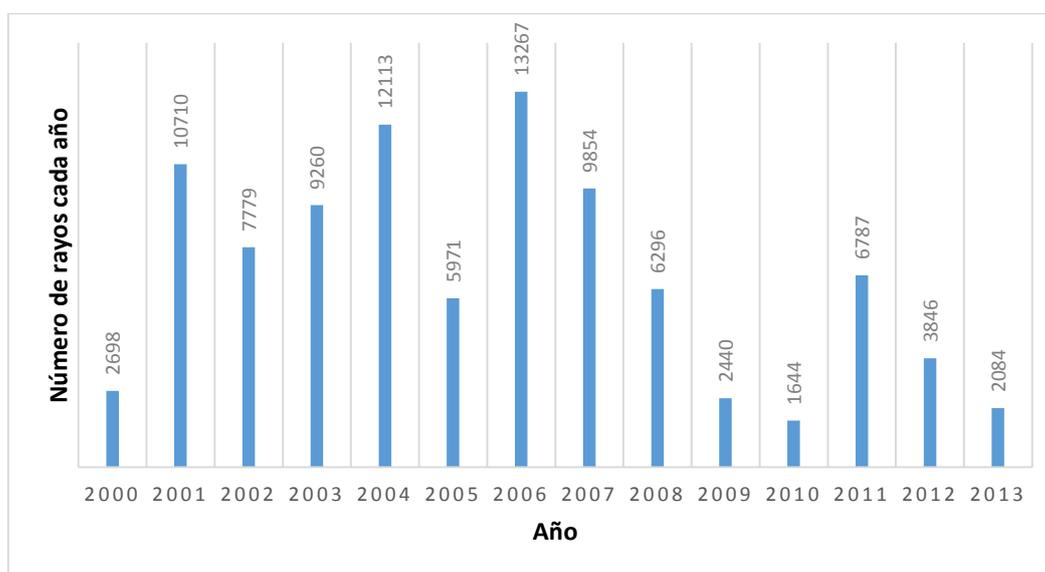


Figura 3: Distribución anual del número de rayos en el Principado de Asturias entre 2000-2013.

En el análisis de la distribución de las descargas eléctricas por meses (Figura 4) para el mismo periodo, observamos que la actividad máxima se concentra en los meses más cálidos del año, entre mayo y septiembre. Estos 5 meses concentran el 71% de todos los rayos registrados (94.749) en el periodo 2000-2013. El máximo absoluto se concentra en el mes de junio seguido muy de cerca por agosto. Los años que tienen su máximo en junio son 2003, 2004, 2005, 2007 y 2009. Los mínimos se registran en los meses más fríos del año, sobre todo entre noviembre y marzo. Octubre y abril, aunque también

tienen poco peso en la distribución, son los que marcan el periodo de transición entre la época cálida y fría. Esta distribución mensual es similar a la obtenida en otros estudios realizados a nivel peninsular o regional (Castilla y León), y pone de manifiesto la importancia del calentamiento solar en la actividad convectiva, siendo los meses de mayor insolación los que registran un mayor número de rayos. Sin embargo, en el caso del Principado de Asturias es significativo que exista una actividad tormentosa notable en los meses más fríos, debido a la entrada de masas de aire polares y árticas muy frías que se calientan en niveles bajos en su desplazamiento hacia el sur y dan lugar a tormentas que, desde el mar, penetran en el interior, a la vez que se van debilitando, por lo que en otras zonas adyacentes como Castilla y León esta actividad convectiva invernal es poco frecuente.

Respecto a la particular distribución por meses, hay que tener en cuenta que la actividad eléctrica tiene un carácter fuertemente episódico. Según otros estudios similares realizados en la Península Ibérica y a nivel europeo, una característica común es la existencia de días singulares de intensa actividad eléctrica, de forma que un porcentaje muy elevado de los rayos totales anuales se producen en pocos días (En Castilla y León más de la mitad de los rayos anuales se producen en tan sólo 10 días). Por ello, el máximo de cada año se puede producir en junio, julio, agosto e incluso en mayo, dependiendo de las condiciones atmosféricas. Por tanto, ya puede observarse a simple vista una primera relación entre las temperaturas y la ocurrencia del fenómeno eléctrico.

Teniendo en cuenta la situación geográfica del Principado de Asturias y su apertura al Mar Cantábrico, se puede explicar el máximo en junio debido a que a las altas temperaturas que se registran en este mes se une la entrada de borrascas que penetran aún en esta época, cuando la alta presión característica de la zona de las Islas Azores no se ha consolidado, como sí lo hace una vez entrada la estación de verano, haciéndose más difícil la entrada de borrascas en la zona de estudio.

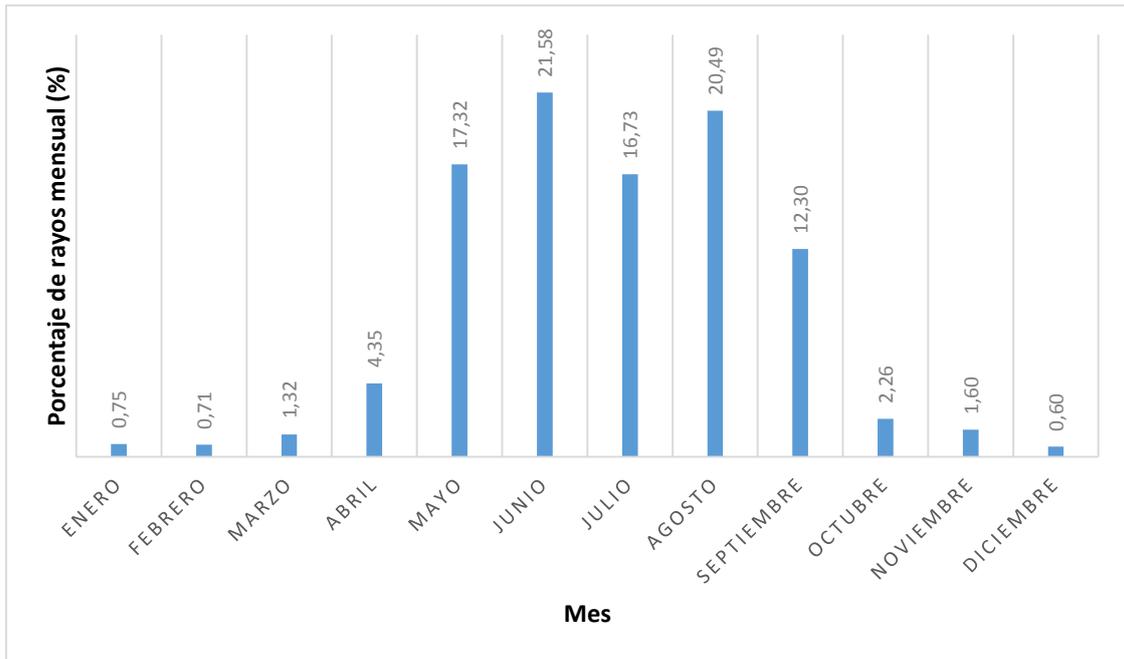


Figura 4: Distribución mensual de los rayos en el Principado de Asturias entre 2000-2013.

Profundizando en los meses de mayor actividad de las descargas eléctricas, observamos su distribución por cada año en la Figura 5 y Tabla 1.

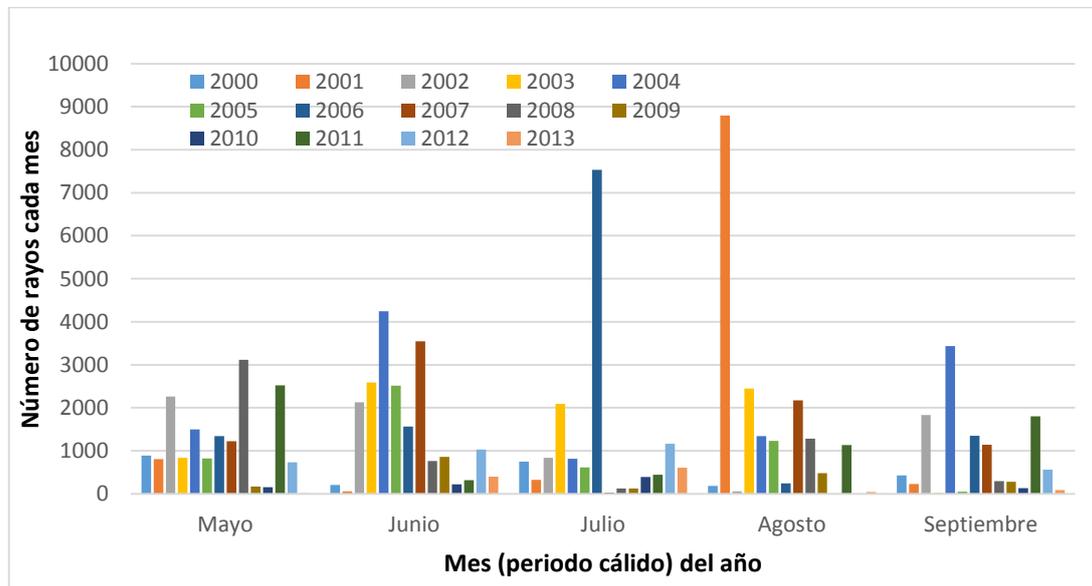


Figura 5: Rayos totales durante el periodo cálido (mayo-septiembre) en el Principado de Asturias entre 2000-2013.

Año	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre
2000	890	204	746	188	431
2001	808	59	324	8796	231
2002	2260	2131	836	55	1832
2003	841	2588	2091	2446	19
2004	1497	4243	813	1343	3434
2005	826	2515	614	1232	51
2006	1341	1563	7536	243	1350
2007	1227	3550	30	2171	1140
2008	3116	764	125	1280	293
2009	173	863	125	484	282
2010	152	220	392	3	136
2011	2522	317	441	1133	1805
2012	737	1032	1168	1	567
2013	16	400	607	43	85
TOTALES	16406	20449	15848	19418	11656

Tabla 1: Rayos totales para cada mes en el Principado de Asturias en 2000-2013.

En el análisis de la distribución temporal de los rayos, aunque siempre tendemos a racionalizar y caracterizar la casuística y fenomenología, no existe una certeza absoluta de las razones del registro de los eventos en cada mes, sino que también hemos de tener en cuenta el carácter aleatorio de la ocurrencia de estos fenómenos. En parte debido a los fenómenos meteorológicos que los producen.

Otro aspecto a estudiar es la distribución horaria de las descargas eléctricas (Figura 6 y Tabla 2). El máximo se encuentra a las 15 horas UTC y el mínimo a las 0 horas y a las 9 horas UTC. Esto coincide con los resultados de otros estudios similares (Mora, 2012), que ponen de manifiesto la importancia del ciclo solar diurno en la intensidad de la actividad eléctrica (mayor número de rayos coincidiendo con las temperaturas más altas en superficie y mínimo coincidiendo con las horas nocturnas) aunque, debido al efecto episódico anteriormente mencionado, los datos de horas nocturnas son poco representativos. Con respecto a la distribución horaria separando los rayos negativos de los positivos, ésta se representa también en la Figura 6 por medio de diferentes colores (azul y rojo, respectivamente) y numéricamente en la Tabla 2.

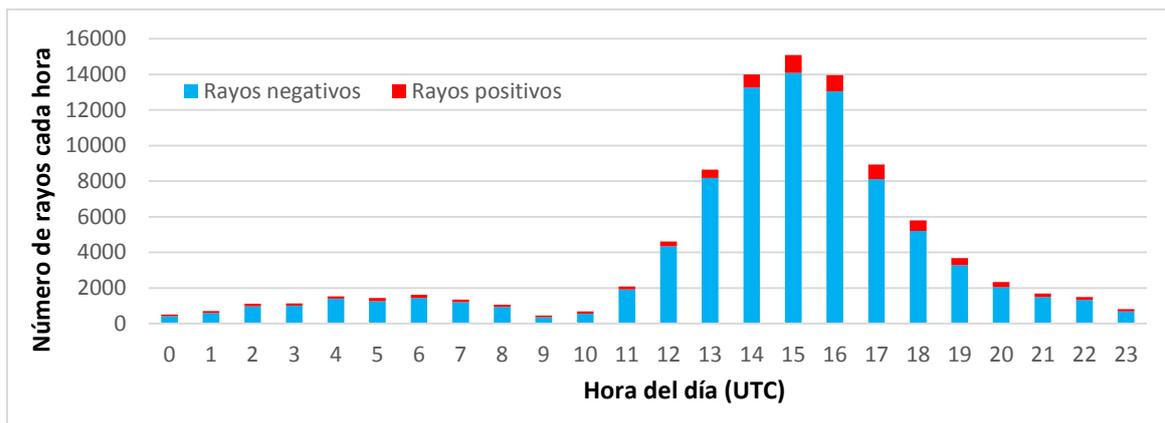


Figura 6: Distribución horaria de los rayos en el Principado de Asturias (2000-2013).

Hora	Rayos negativos	Rayos Positivos
0	422	83
1	604	107
2	976	136
3	1003	141
4	1404	129
5	1266	166
6	1448	170
7	1214	142
8	939	124
9	371	87
10	570	120
11	1925	158
12	4348	266
13	8175	469
14	13266	722
15	14076	1003
16	13048	907
17	8110	822
18	5212	595
19	3280	407
20	2050	283
21	1502	191
22	1337	156
23	688	131
TOTALES	87234	7515

Tabla 2: Rayos totales para cada franja horaria (hora UTC) en el Principado de Asturias en 2000-2013.

4.2 Distribución espacial de los rayos

El valor medio de la densidad de rayos (número de rayos dividido por superficie) anual para el Principado de Asturias en los 14 años (2000-2013) es de 0,64 rayos anuales por km², algo mayor que los 0,50 rayos anuales por km² de media en Castilla-León para el periodo 2000-2010 (Mora, 2012). En un primer análisis de la densidad de rayos en el Principado de Asturias, dividiendo nuestro área de estudio en cuadrículas de 20 x 20 km (Figura 7), observamos valores mínimos de 0,1 rayos anuales por cada cuadrícula (400km²) concentrado mayormente en la franja norte costera y en los primeros kilómetros mar adentro. El máximo valor que hallamos se mueve en torno a 1,1 rayos anuales por cuadrícula en la zona suroeste de Asturias caracterizada por la presencia de la Cordillera Cantábrica. Concretamente las zonas de mayor actividad eléctrica por superficie parecen ser la zona del Parque Natural de Somiedo, así como Muniellos. La cuenca del Narcea, en general, destaca por una densidad relativamente alta.

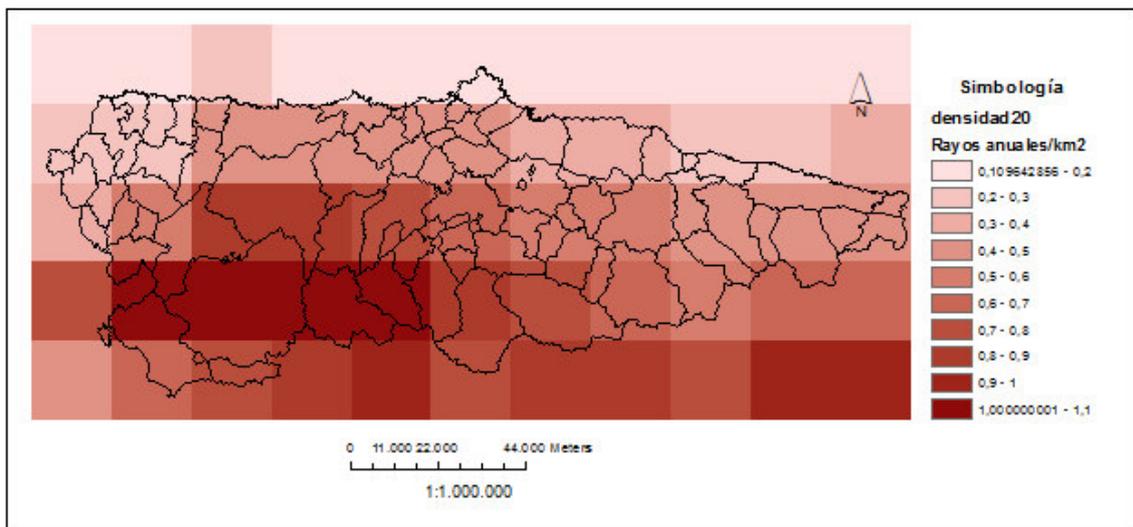


Figura 7: Distribución espacial (cuadrícula de 20x20 km) de la densidad media anual de rayos en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013.

Aunque los posteriores análisis a resoluciones más precisas nos dirán con más detalle los lugares donde los valores de densidad son altos, sí podemos observar ya que hay una relación bastante directa de la concentración de los rayos con la altitud, de manera que en las zonas de mayor altitud los valores van aumentando, mientras que en las zonas más llanas, las densidades son más bajas.

En comparación con otras regiones de toda Europa, se localizan valores de densidad que pueden considerarse próximos a los localizados en este trabajo, como los del País Vasco (Areitio et al., 2001), con densidades máximas entre 4 y 5 rayos anuales/km². En Austria

se han registrado valores de densidad media anual que van desde los 0,5 a los 4 (Schulz et al., 2005) o valores medios entre 0.1 y 1,1 rayos anuales/km² en Estonia (Enno, 2011).

En una resolución de 4x4 km (Figura 8) empezamos a observar las zonas montañosas más acotadas en las que la densidad tiene valores altos, así como alguna pequeña singularidad en zonas menos abruptas con picos de valores no demasiado altos. Aún con todo ello, la distribución general de la densidad de rayos sobre el Principado de Asturias guarda relación con la altura.

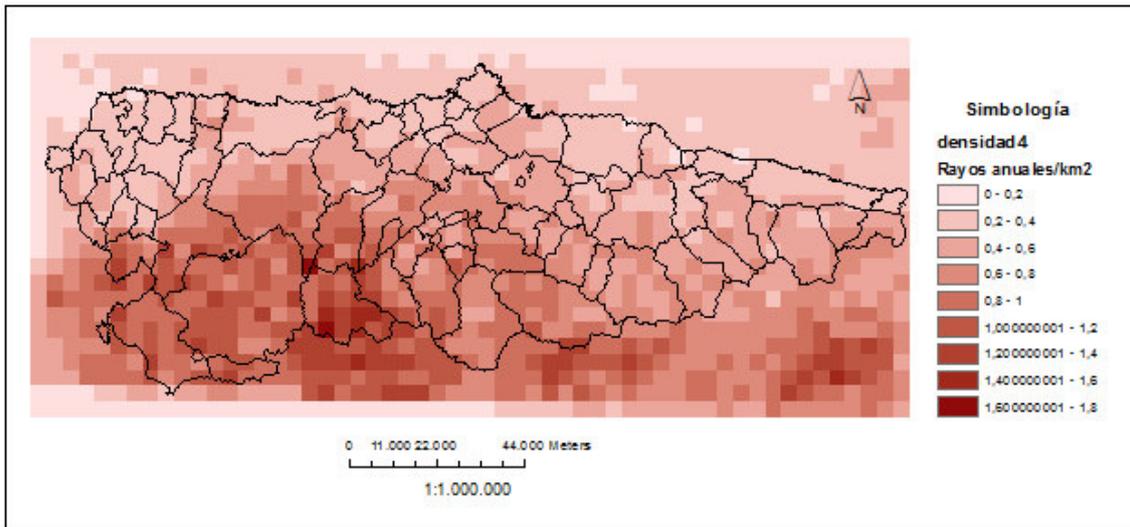


Figura 8: Distribución espacial (cuadrícula de 4x4 km) de la densidad media anual de rayos en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013.

Para conocer la distribución de los rayos de forma más precisa, con objeto de ubicar las zonas con mayor densidad de rayos, empleamos una resolución de 1x1 km (Figura 9). Esta figura es una aproximación, pues con los parámetros de filtrado de la base de datos, la fiabilidad a esta resolución es demasiado reducida, pero puede servir de forma orientativa.

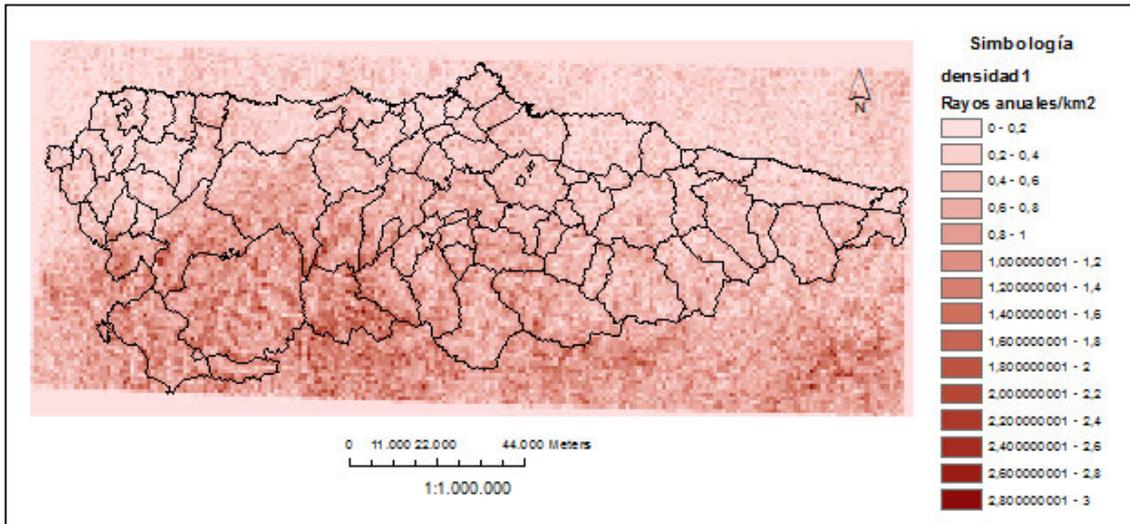


Figura 9: Distribución espacial (cuadrícula de 1x1 km) de la densidad media anual de rayos en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013.

A partir de esta resolución se localizan singularidades evidentes. Ejemplo de ello son lugares con valores de más de 2 rayos anuales/km² y otros lugares no tan destacables por sus valores de densidad pero sí por mostrar valores relativamente altos con respecto a los valores en lugares vecinos. En todos ellos, cruzando la información con mapas físicos, fotos e imágenes desde satélite, se localizan lugares que potencialmente pueden ser reclamo para la descarga eléctrica, como son algunos parques eólicos provistos de aerogeneradores y lugares con antenas grandes. Algunos de éstos podrían ser el Cordal de Berrucedo, el Corral de Porcabezas y la Sierra de los Vientos, en los que está corroborada la presencia de aerogeneradores eléctricos. Estos mismos hechos han sido puestos de manifiesto por Mora (2012) en la región de Castilla y León. Las antenas de comunicaciones ya de por sí se ubican en zonas elevadas, por lo que a su propia altura y estructura metálica es necesario sumar la elevación del terreno. Respecto a los aerogeneradores, entre las posibles causas de este incremento de rayos podrían estar la propia estructura del molino o aerogenerador como punto singular que destaca sobre una zona ya de por sí elevada y con fuerte derivación a tierra o la turbulencia o carga por frotamiento generada por el rozamiento de las palas.

La zonificación de la densidad por las unidades administrativas (concejos) en las que se divide el principado de Asturias (Figura 10) confirma que el suroeste de la Comunidad Autónoma es la zona que posee la mayor densidad anual.

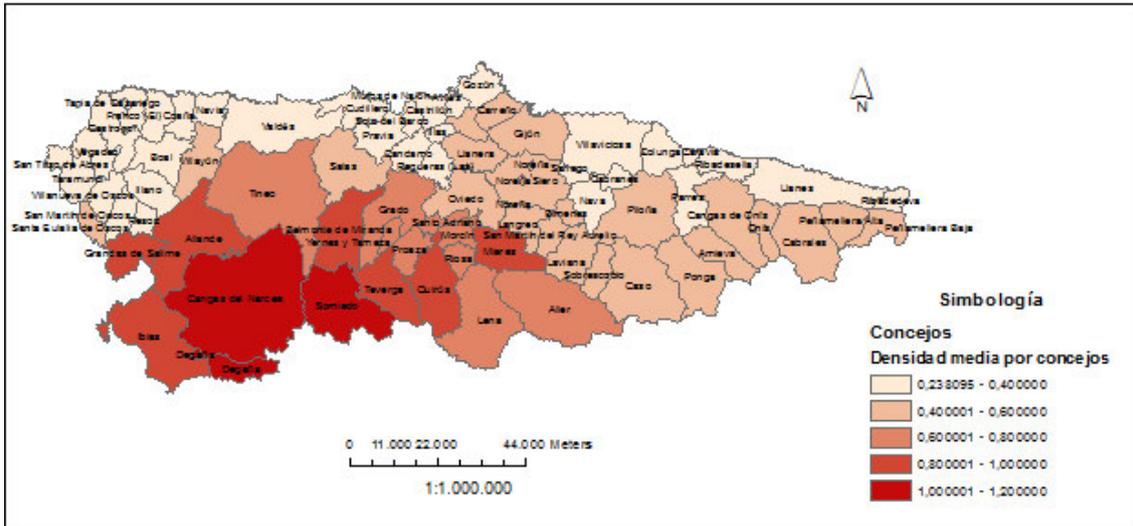
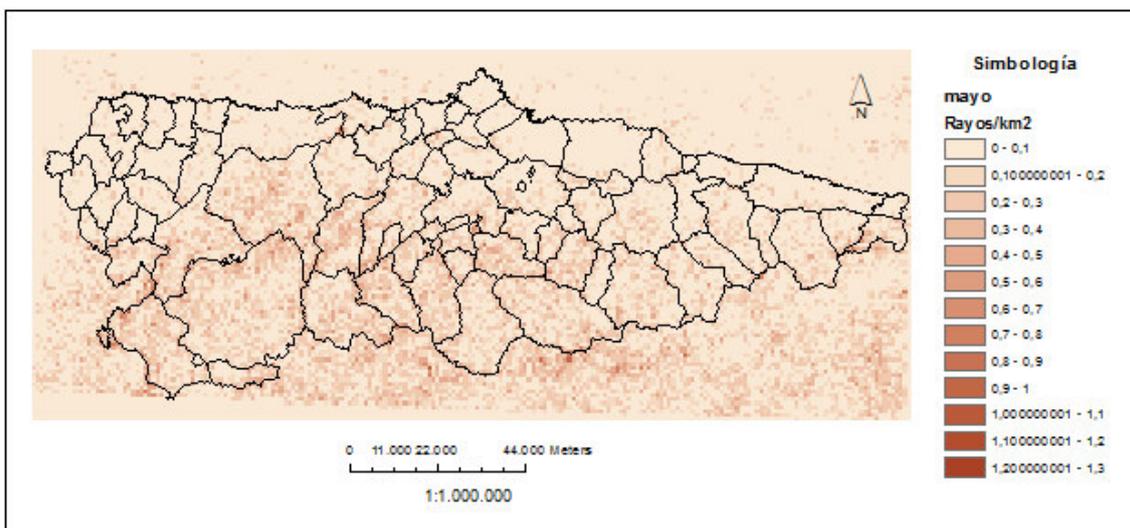
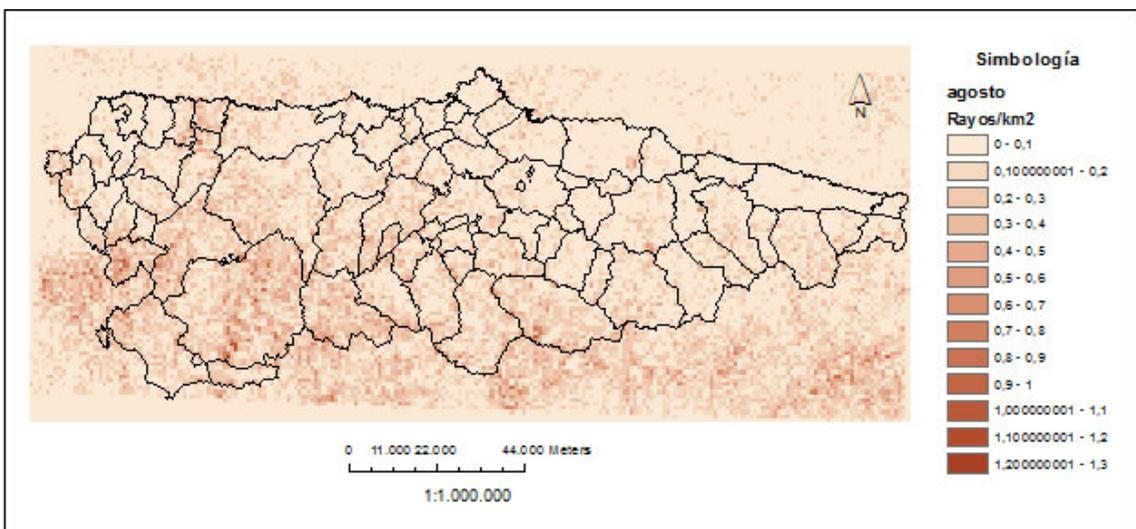
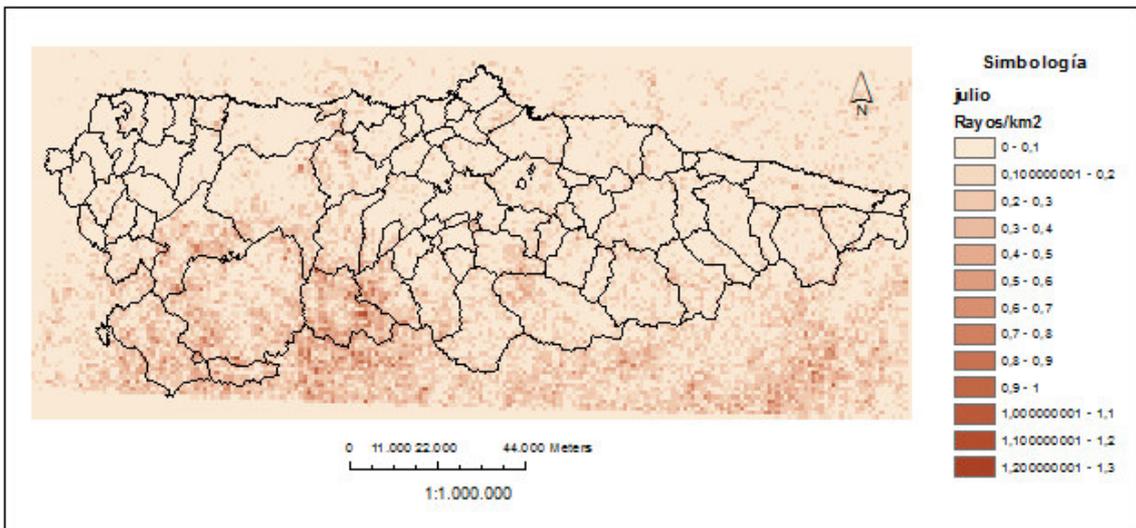
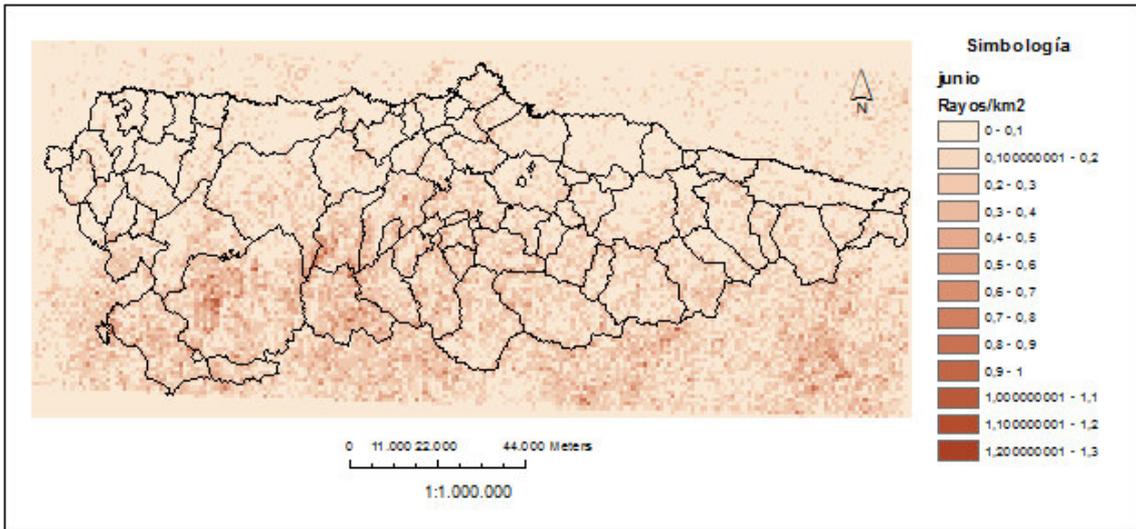


Figura 10: Distribución espacial (cuadrícula de 1x1 km) de la densidad media anual de rayos en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013 zonificada por concejos.

Analizando la densidad de rayos en los meses del año en una resolución de píxel 1 x 1 km se observan varias particularidades, entre las que destacan principalmente dos:

En primer lugar, los valores más elevados se concentran en los meses de mayor irradiación solar (Figuras 11a-11e) y, por tanto, temperaturas más elevadas, a los que ya nos hemos referido anteriormente, que son el grupo que engloba de mayo a septiembre. Este periodo es el único que registra para cada mes valores por encima de 1 rayo anual/km² salvo en el caso de septiembre que roza ese valor con un máximo de 0,85 rayos anuales/km². La máxima densidad absoluta la encontramos en el mes de agosto con un valor de 1,21 rayos anuales/km².





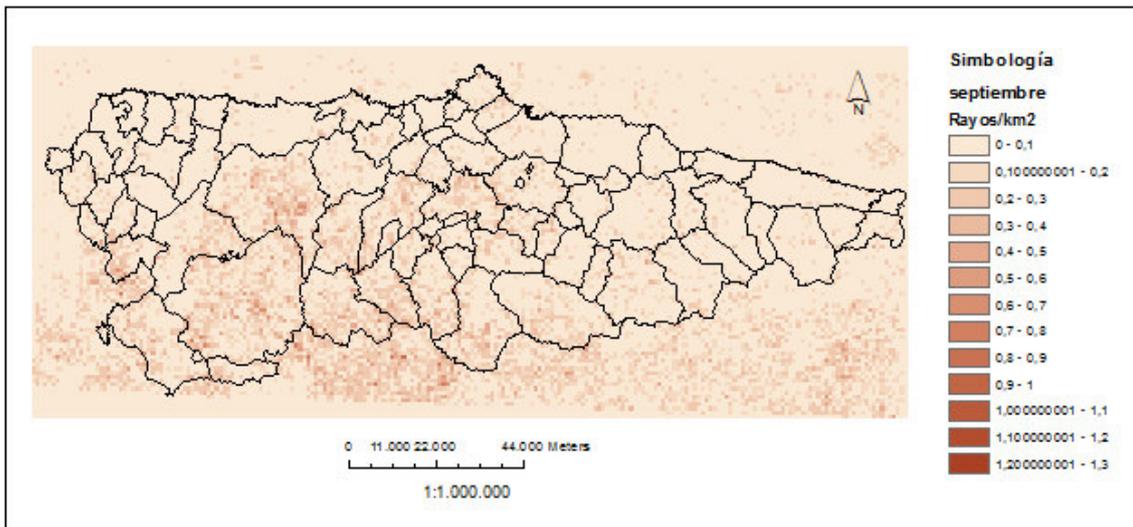
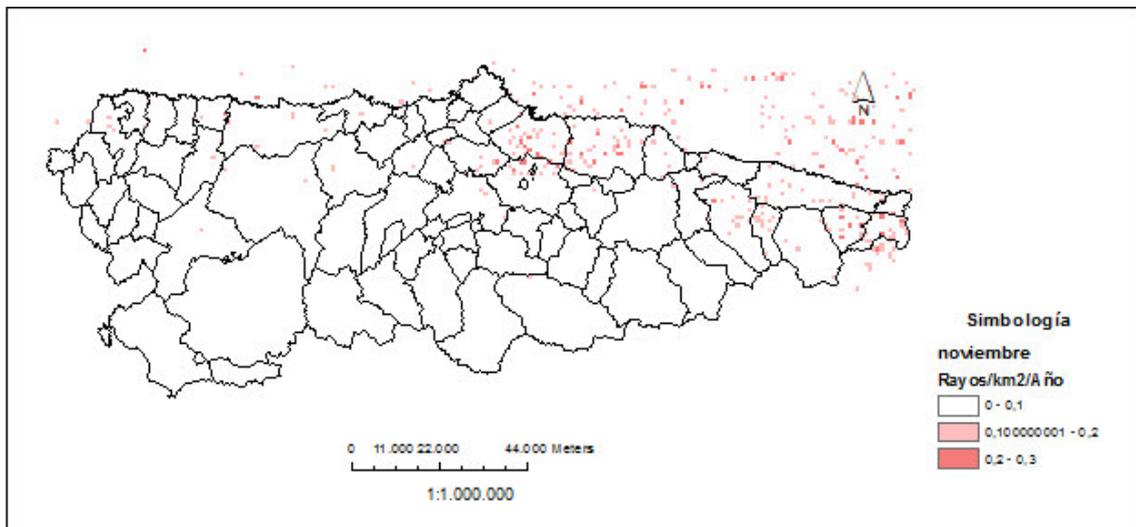


Figura 11: Densidad mensual media en la época de mayor irradiancia solar en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013. a) Mayo. b) Junio. c) Julio. d) Agosto. e) Septiembre.

Los meses de menor densidad de rayos son los de menor irradiancia solar (Figuras 12a-12d), destacando sobre todo noviembre, diciembre, enero y febrero con valores máximos que no llegan a los 0,3 rayos anuales/km². Diciembre tiene una densidad anual mínima de 0,21 rayos anuales/km² mientras que noviembre, enero y febrero registran un valor máximo de 0,28 rayos anuales/km².



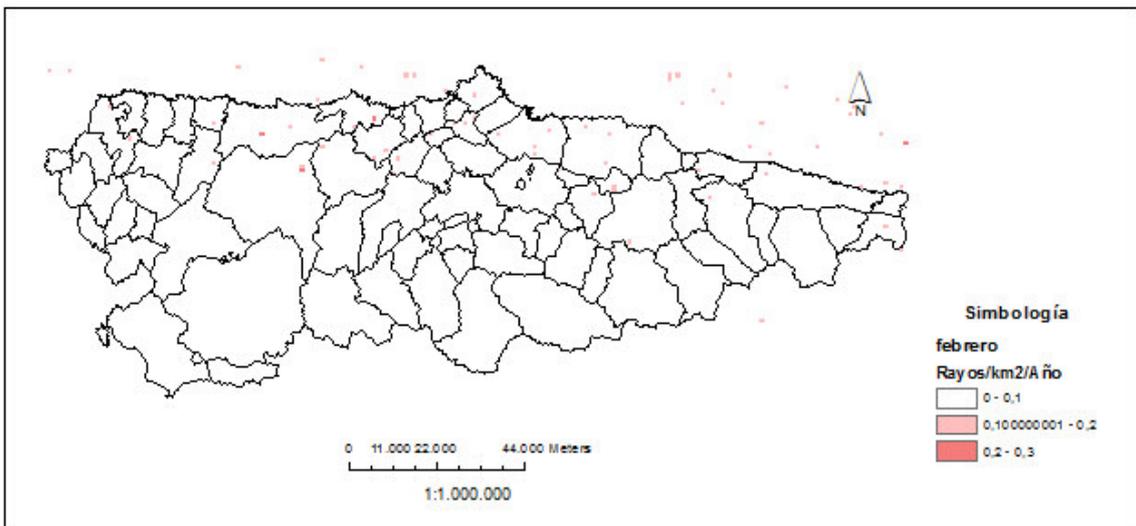
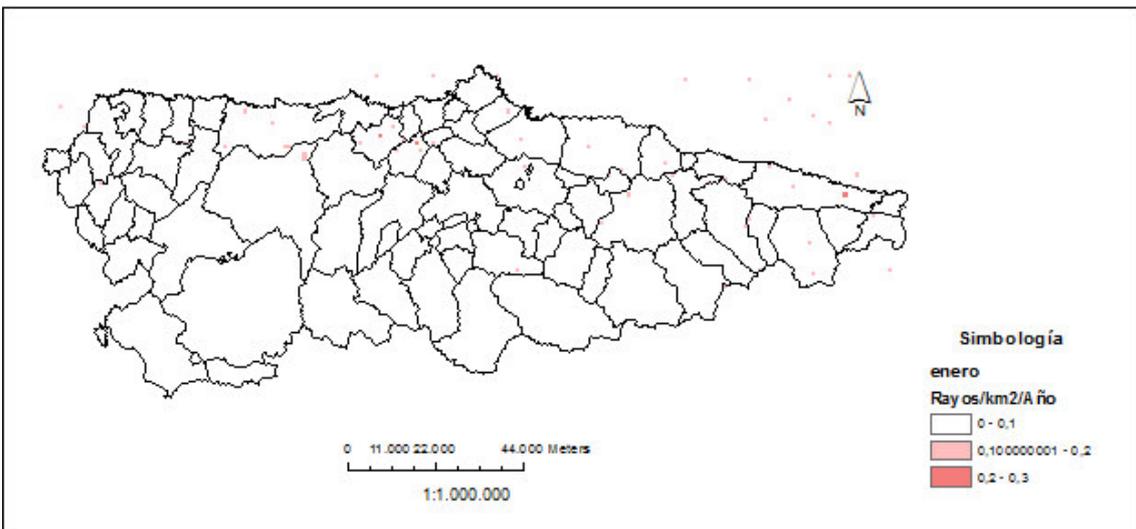
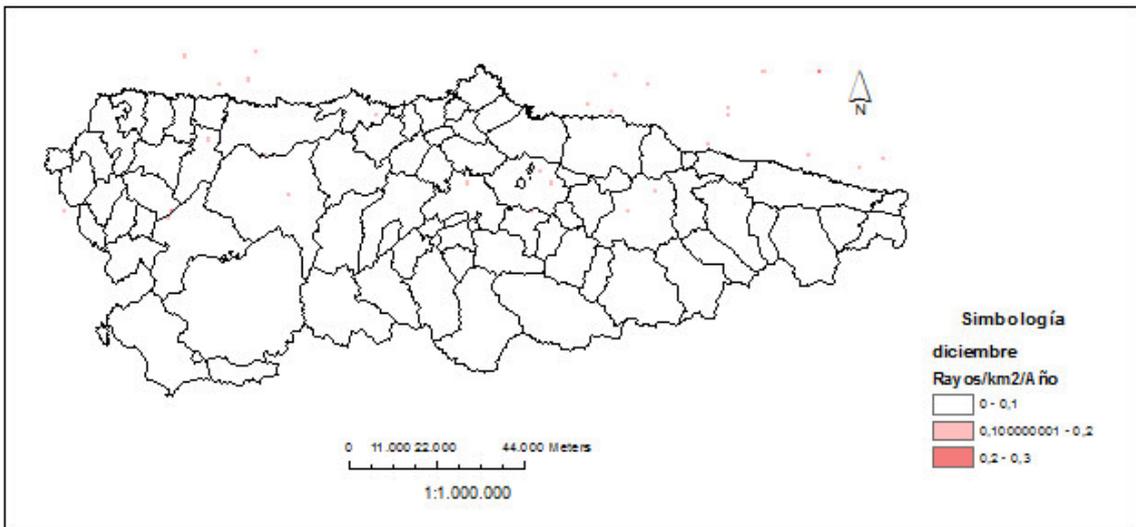


Figura 12: Densidad mensual media en la época de menor irradiación solar en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013. a) Noviembre. b) Diciembre. c) Enero. d) Febrero.

Los meses de abril y octubre marcan una época de transición entre las épocas de verano e invierno pues son meses propios de las estaciones intermedias (Figuras 13a-13b).

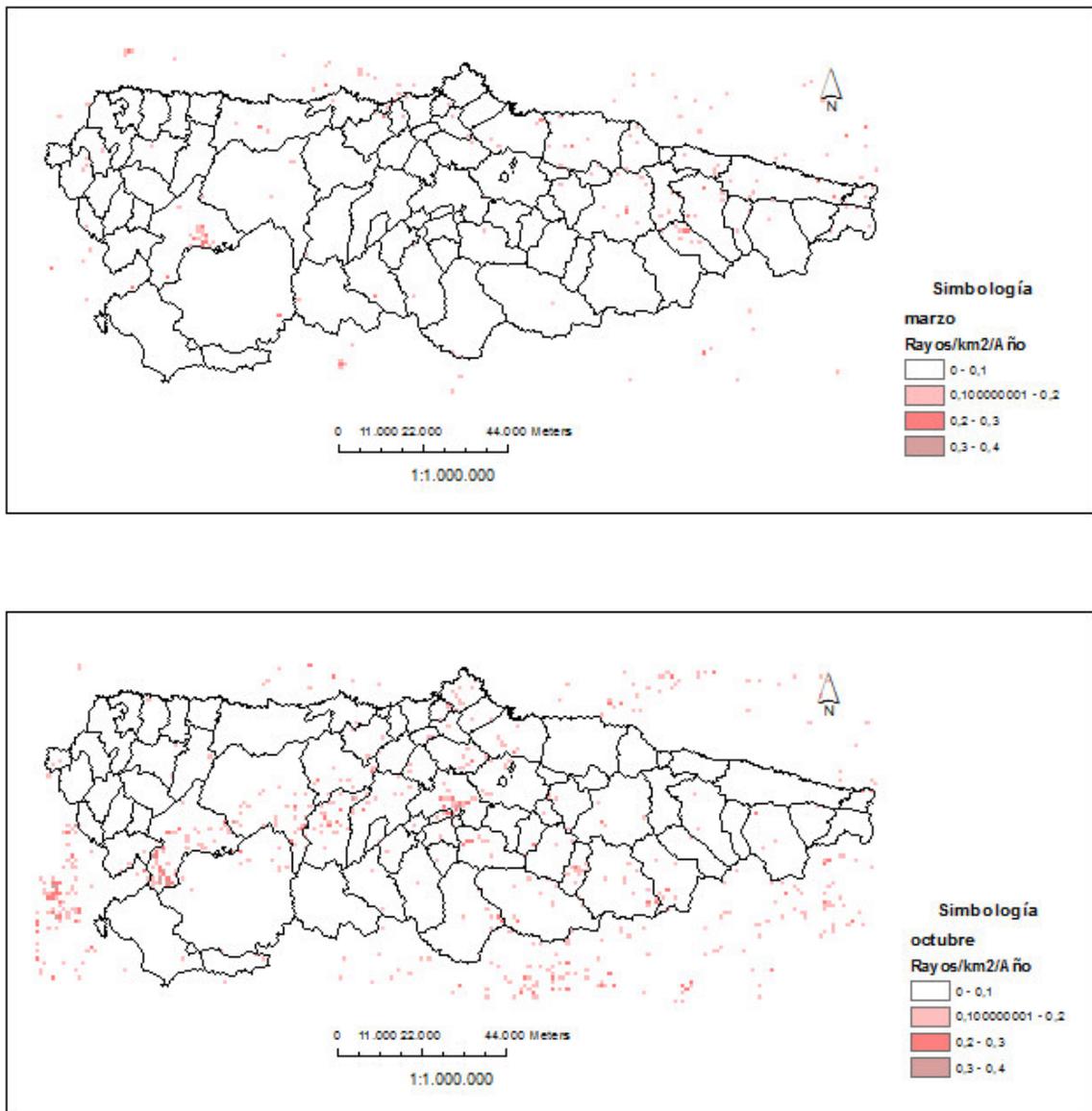


Figura 13: Densidad mensual media en la época de transición estacional verano-invierno en el Principado de Asturias para el periodo 2000-2013. a) Marzo. b) Octubre.

En segundo lugar, tal y como muestran las figuras anteriores (Figuras 11-13), observamos una distribución de las zonas de mayor densidad que es opuesta entre los meses de mayor y menor irradiación solar. Si bien en los primeros la actividad tormentosa tiene valores de densidad altos en la zona sur de la Cordillera Cantábrica, en los segundos la actividad mayor se localiza en la franja costera y en torno al Mar Cantábrico. En general, la convección estival se produce principalmente en zonas montañosas y se desplaza hacia la costa, en la mayoría de las ocasiones sin alcanzarla.

Sin embargo, en los meses invernales la convección marítima, con flujo del norte, afecta sobre todo a la costa y en escasas ocasiones continúa hacia el interior y la montaña.

4.3 Número medio de días de tormenta

El número de días totales de tormenta se ha calculado utilizando la base de datos de 94749 rayos. Se ha realizado un conteo del número de días por cuadrícula y se ha dividido por el número de años de estudio.

En los 14 años de intervalo de estudio (2000-2013) es de 893 días. Por tanto, tenemos una media de 63,79 días de tormenta anuales, significativamente inferior al valor obtenido para la región de Castilla y León, de 103 días (Mora, 2012). La cuadrícula 4x4 km ha sido la seleccionada para el cálculo de la densidad media anual de días de tormenta (días de tormenta anuales/km²) ya que parece la más apropiada de las resoluciones utilizadas para el Principado de Asturias pues las tormentas suelen tener un tamaño medio muy parecido al de esta resolución. Además esta cuadrícula permite observar con cierto nivel de detalle de forma aproximada la actividad eléctrica en determinados lugares y localizaciones para buscar alguna particularidad. El valor medio de número de días de tormenta obtenido para el Principado de Asturias ha sido de 3,34 días/km². La distribución espacial (Figura 14) muestra unos máximos de 6 días anuales/km² que se dan en la mitad sur y suroeste de la región, caracterizada por la presencia de la Cordillera Cantábrica, es decir, la zona más montañosa de nuestra área de estudio. Mención especial a las zonas de Somiedo y Muniellos, en donde los valores de 4 y 5 días de densidad media anual son frecuentes. En el concejo de Aller parece que hay valores máximos de 6 días de densidad media anual. Los mínimos se localizan mayoritariamente en el noroeste y algunas zonas cercanas al municipio de Avilés. Observamos cómo existe cierta compensación entre las tormentas invernales y estivales, de forma que existe menos contraste entre la costa y la montaña, dando un perfil mucho más suavizado con respecto a la densidad de rayos.

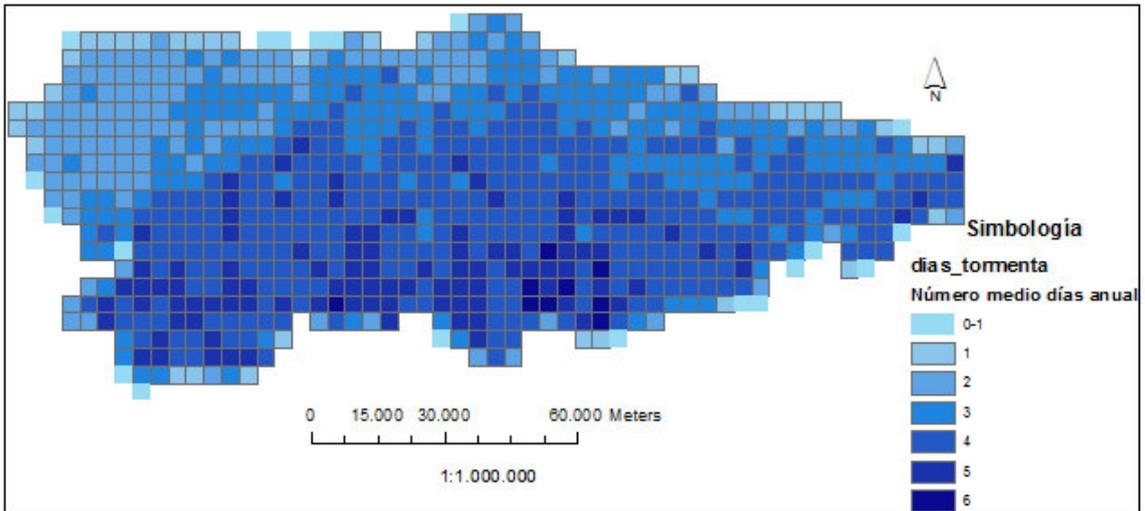


Figura 14: Número medio de días de tormenta anual por cuadrícula a resolución 4x4 kilómetros (2000-2013).

La representación de esta variable por concejos (Figura 15) confirma la distribución anteriormente comentada. El municipio de Aller es el que mayor actividad presenta en lo que a días de tormenta se refiere, seguido de Somiedo y Teverga. Mención también para el concejo de Ribadedeva en donde también encontramos un valor alto.

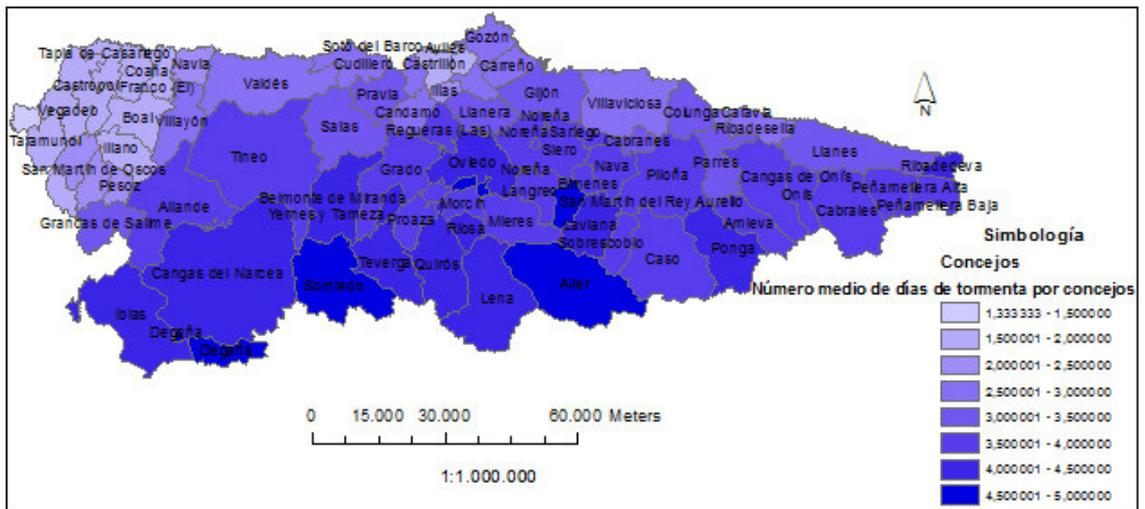


Figura 15: Representación por concejos del número medio de días de tormenta anual en el Principado de Asturias (2000-2013).

4.4 Parámetros eléctricos: Polaridad y Multiplicidad

4.4.1 Polaridad

El porcentaje de rayos positivos respecto al total de rayos es de un 7,93%, algo por debajo de otras medias como el 9% para el total de la Península Ibérica (Rivas et al., 2005), pero por encima de otras regiones mundiales como el 6,2% en Estados Unidos para el periodo 2001-2009 (Orville et al., 2011), valor que sólo tiene en cuenta los rayos con intensidad mayor de 15 kiloamperios (kA), ya que considera los valores inferiores a 15 kA como rayos nube-nube. Filtrando nuestros datos como en este estudio mencionado obtenemos que el 4,98% de los rayos positivos sobre el total de los rayos (positivos y negativos) tiene una intensidad mayor de 15 kA.

En el resumen anual de los datos (Tabla 3) se observan valores anuales de intensidad media dispares tanto en rayos negativos como en positivos. Esto no tiene por qué ser destacable, ya que en la actividad eléctrica atmosférica, ya desde la génesis del rayo sigue habiendo muchas incertidumbres (Mora, 2012). La intensidad de descarga es, por lo general, más alta en los rayos positivos que en los negativos, aspecto que coincide con los resultados de los estudios en Castilla-León y otras regiones del mundo y que, generalmente, aunque los rayos positivos se dan en una baja proporción respecto del total de rayos caídos, son más violentos en intensidad. Por otro lado, llama la atención el progresivo descenso, a lo largo del periodo estudiado (2000-2013), del valor de Chi^2 tanto en los rayos positivos como negativos. Se debe, fundamentalmente, a la mejora en los equipos de detección de la Red de Detección de Rayos (REDRA), que han ido incorporando nuevos sensores con mayor precisión. El cambio más importante se produce entre los años 2000 y 2001, coincidente con el periodo de sustitución de los sensores antiguos a lo largo del año 2000. A partir de 2001 los valores de Chi^2 se mantienen más o menos constantes, con una tendencia a disminuir, probablemente debido a la incorporación de nuevos sensores en la red.

Año	RAYOS NEGATIVOS			RAYOS POSITIVOS		
	Intensidad media	Multiplicidad media	Chi2 media	Intensidad media	Multiplicidad media	Chi2 media
2000	27,7	1,4	4,0	49,3	1,0	3,7
2001	21,3	2,5	1,5	23,6	1,3	2,6
2002	23,2	2,0	1,7	41,5	1,1	2,3
2003	26,8	1,9	1,4	48,8	1,1	2,5
2004	16,1	2,0	1,6	32,1	1,1	2,1
2005	17,9	1,9	1,6	40,1	1,1	1,9
2006	17,1	2,2	1,6	24,4	1,1	2,0
2007	16,1	2,0	1,6	36,8	1,1	1,9

2008	19,8	1,9	1,6	46,3	1,1	2,2
2009	25,5	1,8	1,5	52,8	1,2	2,2
2010	30,6	1,7	1,4	45,5	1,1	1,9
2011	19,8	2,0	1,0	36,5	1,1	1,6
2012	24,0	2,2	0,8	44,7	1,1	1,5
2013	34,0	2,0	1,3	67,5	1,1	1,8

Tabla 3: Resumen anual (2000-2013) de la intensidad de pico de la primera descarga en el Principado de Asturias: intensidad media, multiplicidad y valor de χ^2 de la localización de los rayos según su polaridad.

4.4.2 Multiplicidad

Para todo el Principado de Asturias encontramos un valor medio de multiplicidad de 2 a lo largo del periodo de estudio. En la base de datos hay registros de valores entre 1 y 15 de los cuales más de la mitad de los rayos caídos entre el año 2000 y el 2013 en nuestra área de estudio, en concreto el 56,2%, tienen un valor de multiplicidad igual a 1, valor muy parecido al 53% para el total de la Península Ibérica (Rivas et al, 2005) y al 58% de Castilla-León (Mora, 2012). El 21,3% tiene una multiplicidad de valor 2. Solamente a partir del valor de multiplicidad 7 hasta el 15 que tenemos en nuestra base de datos, no superan ninguno de ellos el 0,9%, sumando tan solo un 2,4% del total. Se observa la tendencia a que las descargas eléctricas tengan una multiplicidad de 1, disminuyendo de forma progresiva la observación de multiplicidades mayores (Figura 16)

Distinguiendo estos valores por polaridades (ver colores en la Figura 16 y Tabla 4), obtenemos una media del valor de multiplicidad de 2,04 para los rayos negativos y de 1,13 para los rayos positivos, valores muy próximos a los 2 y 1,1 para el total de la Península Ibérica (Rivas et al., 2005) y también casi idénticos a los obtenidos en Castilla-León de 2,08 y 1,15 (Mora, 2012). La predominancia en el valor de multiplicidad 1 también es una característica propia en ambos tipos de rayo, con un 53,3% en los rayos negativos y un 89,43% en los rayos positivos. No existe bibliografía para justificar este comportamiento. Dentro de los complejos procesos microfísicos que dan lugar a la génesis de una descarga, la multiplicidad es un factor de creciente complejidad, al menos para valores superiores a 2.

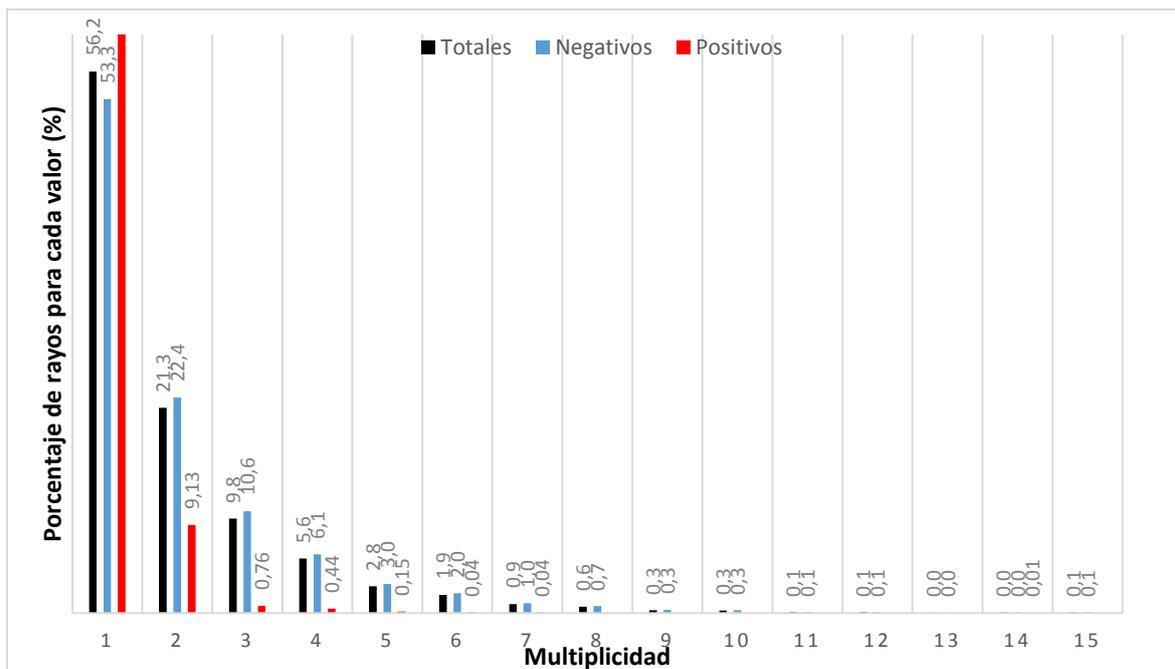


Figura 16: Gráfico con el porcentaje de los rayos totales, negativos y positivos para cada valor de multiplicidad en el Principado de Asturias (2000-2013).

Multiplicidad	Rayos	% TOTALES	% NEGATIVOS	% POSITIVOS
1	53235	56,2	53,3	89,43
2	20184	21,3	22,4	9,13
3	9276	9,8	10,6	0,76
4	5350	5,6	6,1	0,44
5	2640	2,8	3,0	0,15
6	1775	1,9	2,0	0,04
7	883	0,9	1,0	0,04
8	614	0,6	0,7	0
9	274	0,3	0,3	0
10	241	0,3	0,3	0
11	80	0,1	0,1	0
12	79	0,1	0,1	0
13	25	0,0	0,0	0
14	43	0,0	0,0	0,01
15	50	0,1	0,1	0
TOTAL	94749	2,4	100	100

Tabla 4: Valores de multiplicidad por polaridades en el Principado de Asturias (20000-2013).

La distribución mensual de la multiplicidad (Figura 17 y Tabla 5) nos indica un progresivo aumento de ésta a partir de abril, coincidiendo con el inicio del periodo cálido del año. El máximo se alcanza en agosto tanto en rayos totales, con un valor de 2,2 de multiplicidad, como distinguiendo la polaridad en negativos y positivos (2,28 y 1,26,

respectivamente). Los rayos negativos muestran un máximo de multiplicidad en verano y un mínimo en invierno, coincidiendo estos resultados con los publicados por Orville y Huffines (2001) para los EE.UU. y los publicados por Pinto et al. (2003) para Brasil. Cabe destacar en este punto una pequeña diferenciación con la región en Castilla-León, que presenta algunas fluctuaciones mensuales y menor amplitud anual. Orville y Huffines (2001) sugieren sobre este aspecto que *“el gran volumen que presenta una nube puede relacionarse con un aumento en la multiplicidad”*. De este modo es posible que el aumento en la multiplicidad que se observa en verano venga asociado con el mayor volumen gaseoso que presentan las nubes en esta estación climática.

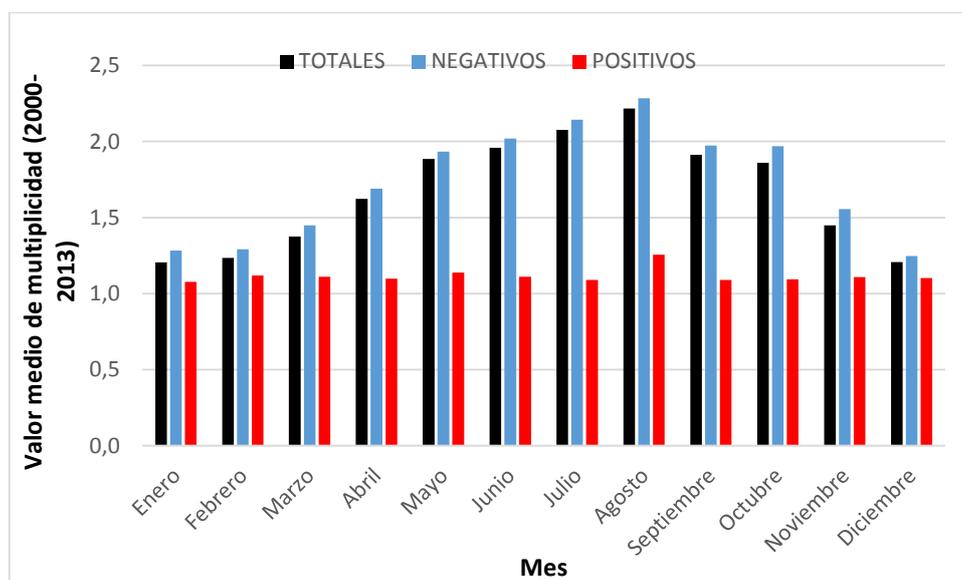


Figura 17: Distribución mensual de la multiplicidad de los rayos totales (y negativos y positivos) en el Principado de Asturias (2000-2013).

MULTIPLICIDAD MENSUAL			
	TOTALES	NEGATIVOS	POSITIVOS
Enero	1,2	1,28	1,08
Febrero	1,2	1,29	1,12
Marzo	1,4	1,45	1,11
Abril	1,6	1,69	1,10
Mayo	1,9	1,93	1,14
Junio	2,0	2,02	1,11
Julio	2,1	2,14	1,09
Agosto	2,2	2,28	1,26
Septiembre	1,9	1,97	1,09
Octubre	1,9	1,97	1,09
Noviembre	1,4	1,56	1,11
Diciembre	1,2	1,25	1,10

Tabla 5: Valores de multiplicidad media mensual en el Principado de Asturias (2000-2013).

En la distribución horaria (Figura 18) observamos variaciones mínimas en la multiplicidad de rayos positivos, y respecto a los rayos negativos, un máximo de multiplicidad a las 19 horas UTC y un mínimo entre las 9 y las 10 horas UTC, para lo que no encontramos una justificación teórica.

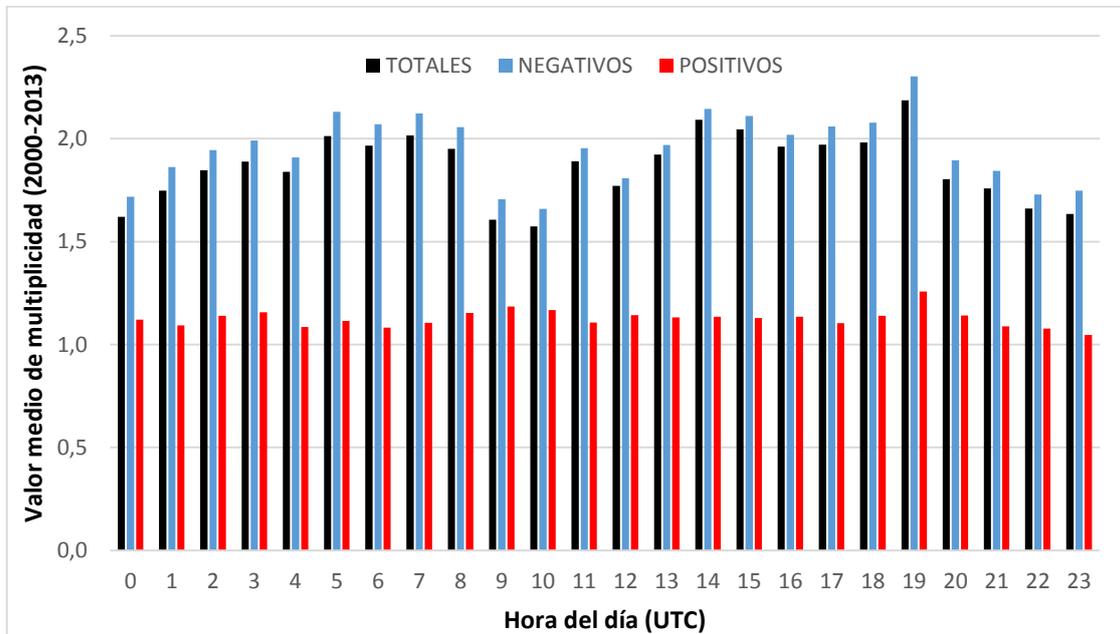


Figura 18: Valores medios de multiplicidad según hora UTC para los rayos totales, negativos y positivos en el Principado de Asturias (2000-2013).

Espacialmente, analizamos la multiplicidad realizando un mapa de densidad a partir del campo que refleja el valor de multiplicidad en la base de datos. Este análisis se ha realizado a una resolución de celda con tamaño 4x4 km que consideramos apropiada teniendo en cuenta la extensión del Principado de Asturias así como el tamaño medio aproximado de una tormenta (Figura 19).

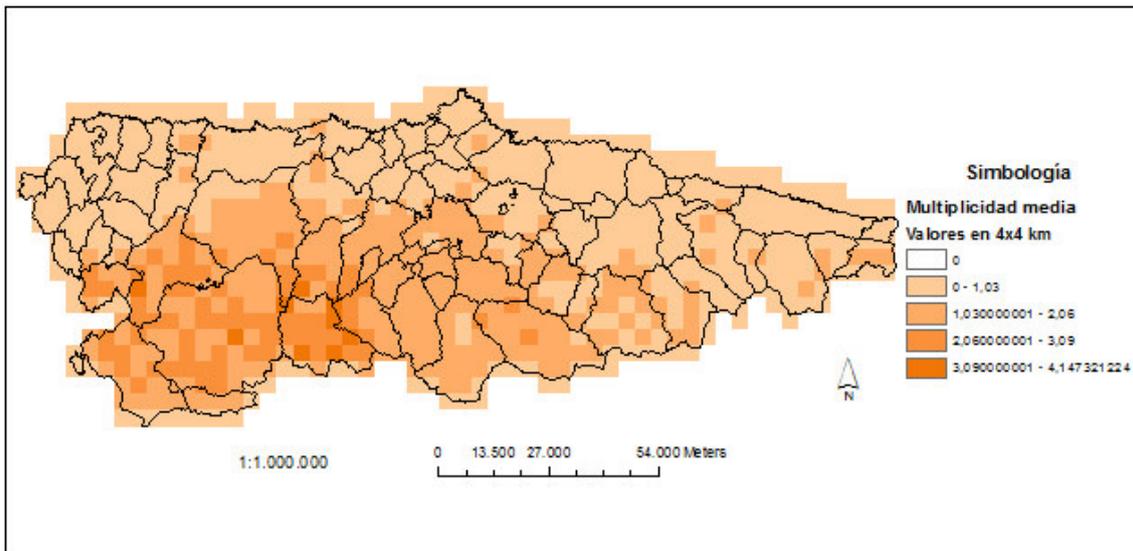


Figura 19: Mapa de densidad según valores de multiplicidad en el Principado de Asturias (2000-2013).

Como ocurre en el análisis de densidad realizado en la sección 4.2 de este trabajo, los valores más altos se localizan en el suroeste de la Comunidad Autónoma, siendo Somiedo y Cangas del Narcea los concejos más destacados. Parece pues que, en las zonas de mayor altitud, la actividad eléctrica, además de ser mayor en cuanto a la concentración de rayos, tiene una tendencia mayor a que los rayos se repliquen un mayor número de veces.

4.5 Actividad eléctrica en relación con la altitud

La densidad de rayos por rango de altitud (Figura 20 y Tabla 6) indica un aumento de la densidad con la altitud hasta casi los 2.000 m, en donde sufre un descenso. Este hecho coincide con los resultados obtenidos en Castilla y León (Mora, 2012).

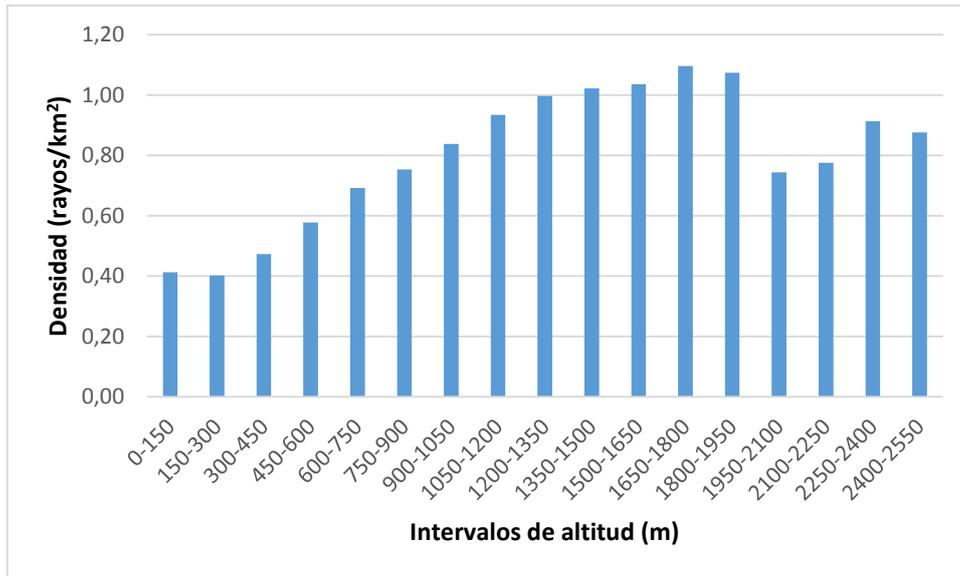


Figura 20: Gráfico de densidad por intervalos de altitud de los rayos en el Principado de Asturias (2000-2013).

INTERVALOS DE ALTURA	DENSIDAD MEDIA ANUAL (RAYOS/KM²)
0-150	0,41
150-300	0,40
300-450	0,47
450-600	0,58
600-750	0,69
750-900	0,75
900-1050	0,84
1050-1200	0,93
1200-1350	1,00
1350-1500	1,02
1500-1650	1,04
1650-1800	1,10
1800-1950	1,07
1950-2100	0,74
2100-2250	0,78
2250-2400	0,91
2400-2550	0,88

Tabla 6: Densidad media anual según intervalos de altura.

La ponderación de la densidad por el área y los rayos totales (Figura 21 y Tabla 7), nos enseña una predisposición del terreno elevado a la recepción de descargas, sobre todo

desde los 500 m aproximadamente en adelante, con un valor máximo de predisposición en torno a los 1.800 metros de altitud.

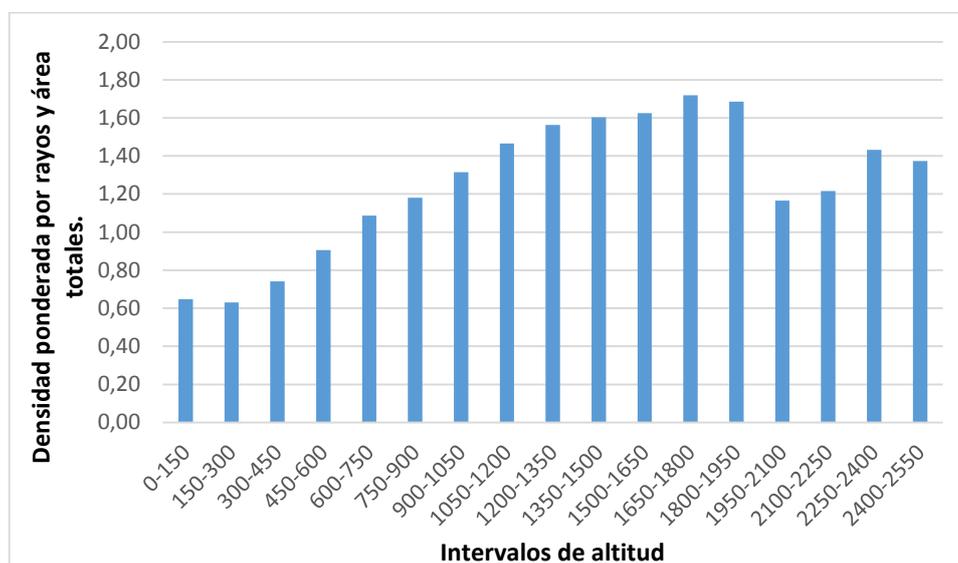


Figura 21: Gráfico de densidad por intervalos de altitud de los rayos, ponderada por el área y los rayos totales en el Principado de Asturias (2000-2013).

<u>INTERVALOS DE ALTURA</u>	<u>DENSIDAD MEDIA ANUAL PONDERADA (RAYOS/KM²)</u>
0-150	0,65
150-300	0,63
300-450	0,74
450-600	0,91
600-750	1,09
750-900	1,18
900-1050	1,31
1050-1200	1,47
1200-1350	1,56
1350-1500	1,60
1500-1650	1,62
1650-1800	1,72
1800-1950	1,68
1950-2100	1,17
2100-2250	1,22
2250-2400	1,43
2400-2550	1,37

Tabla 7: Densidad media anual según intervalos de altura, ponderada por el área y los rayos totales.

El cálculo de la altitud media de las zonas donde impactan los rayos para cada mes de nuestro periodo de estudio (Figura 22) da como resultado que, en los meses más calurosos, que son los de actividad mayor, los rayos caen a altitudes mayores que en los meses más fríos, habiendo diferencias de entre 400 y 500 m. Esto corrobora lo afirmado anteriormente, y es que la convección estival se produce en el interior montañoso fundamentalmente, mientras la convección invernal viene ya organizada desde el mar y afecta fundamentalmente a la costa, de escasa altitud, perdiendo intensidad conforme nos adentramos en el interior y aumenta la altitud.

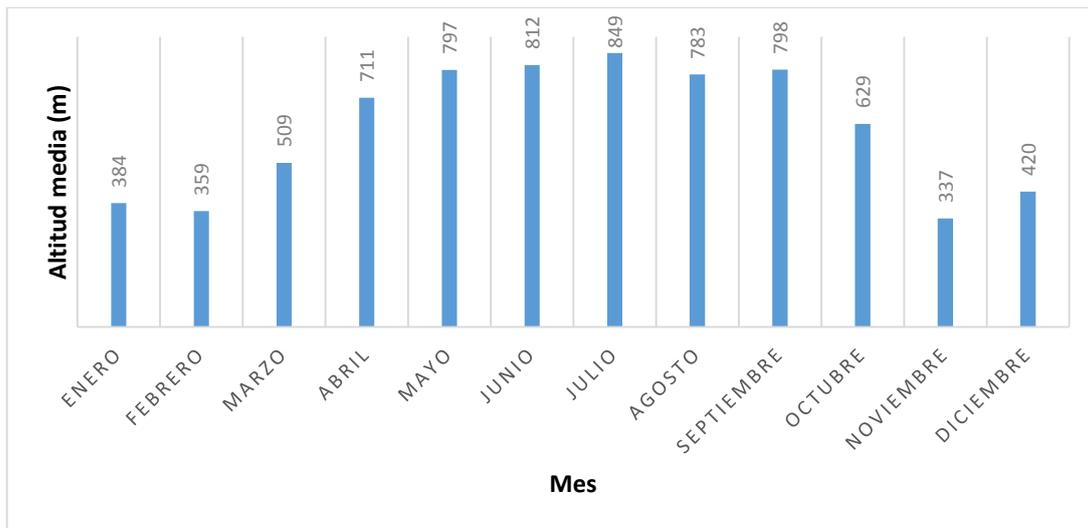


Figura 22: Gráfico con valores de altitud media mensual (m) de impacto de los rayos en el Principado de Asturias (2000-2013).

La evolución de la altitud de las zonas donde ocurren los rayos según la hora UTC (Figura 23) tiene un comportamiento irregular con los máximos concentrados en las primeras horas de la tarde, entre las 14 y 17 horas UTC, en donde superan los 800 m de media, en consonancia con el hecho de que en la época estival la actividad tormentosa se desarrolla inicialmente en zonas altas una o dos horas después del mediodía.

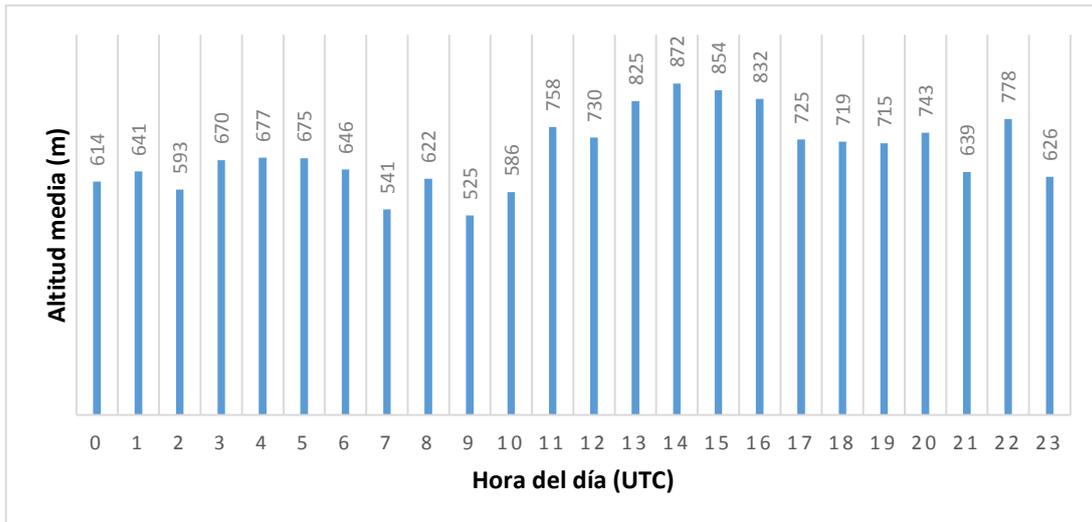


Figura 23: Gráfico con valores de altitud media (m) de impacto de los rayos según hora en el Principado de Asturias (2000-2013).

Finalmente, se ha realizado un ajuste por mínimos cuadrados para ver la relación de los rayos respecto a la altitud. El ajuste inicial no es bueno, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,49$ (ver Figura 24). El ajuste mejora notablemente cuando quitamos el extremo superior de la distribución caracterizado por zonas de área muy pequeña. De esta forma obtenemos un nuevo coeficiente de determinación $R^2 = 0,95$ demostrando la relación entre rayos y altitud (Figura 25).

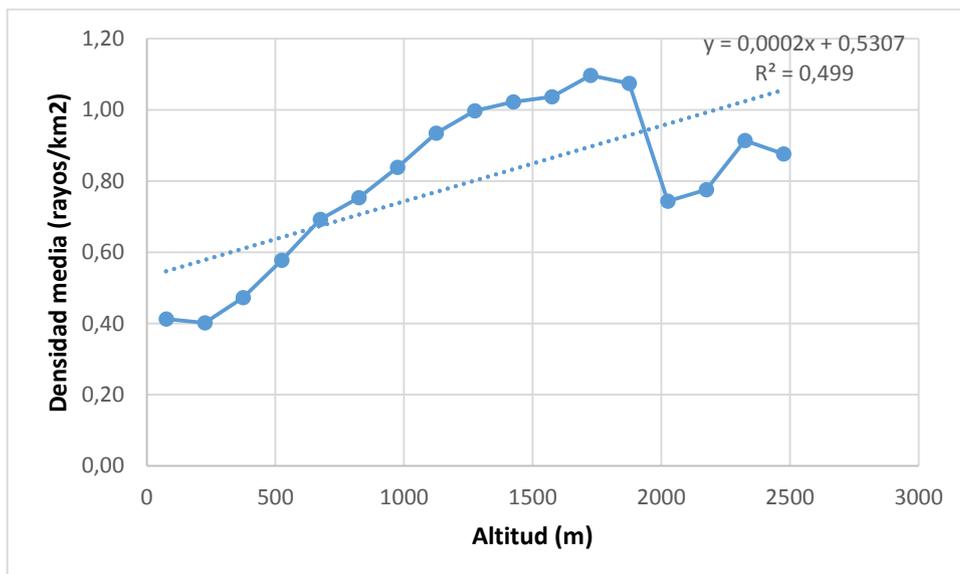


Figura 24: Densidad media anual de rayos frente a la altitud en el Principado de Asturias (2000-2013).

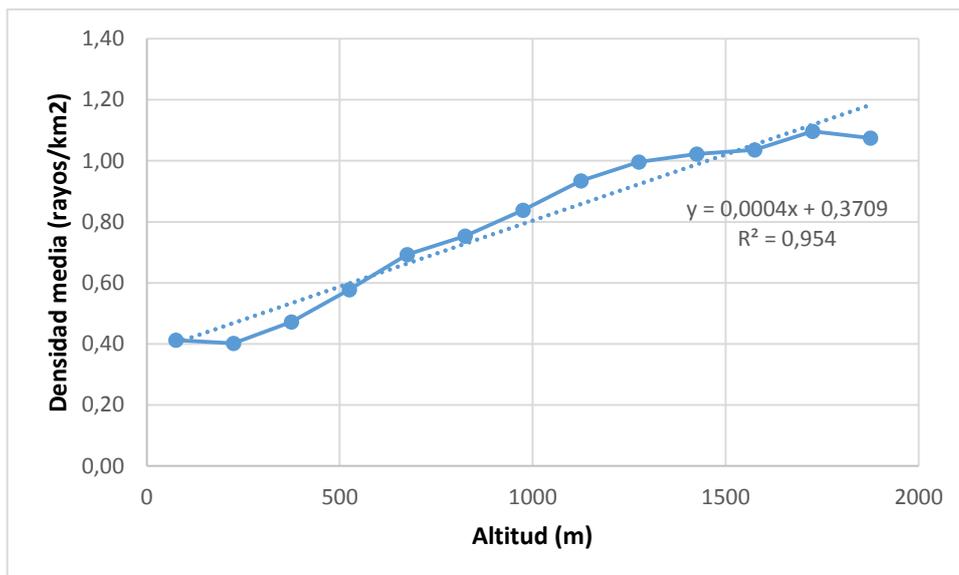


Figura 25: Densidad media anual de rayos frente a la altitud (sin extremo superior) en el Principado de Asturias (2000-2013).

4.6 Actividad eléctrica en relación con los usos del suelo

Este análisis se ha realizado con el segundo filtrado de datos, en el cual la base de datos queda reducida a 56020 rayos. A través de las diferentes zonas del mapa CORINE Land Cover (2006) se observa que en Asturias la máxima densidad se da en las zonas mineras con un valor de 0,55 rayos anuales/km². A continuación, ya algo lejanas, tendríamos las zonas arbustiva herbáceas y de espacios abiertos (0,44 y 0,39 rayos anuales/km², respectivamente). Figura 26 y Tabla 8.

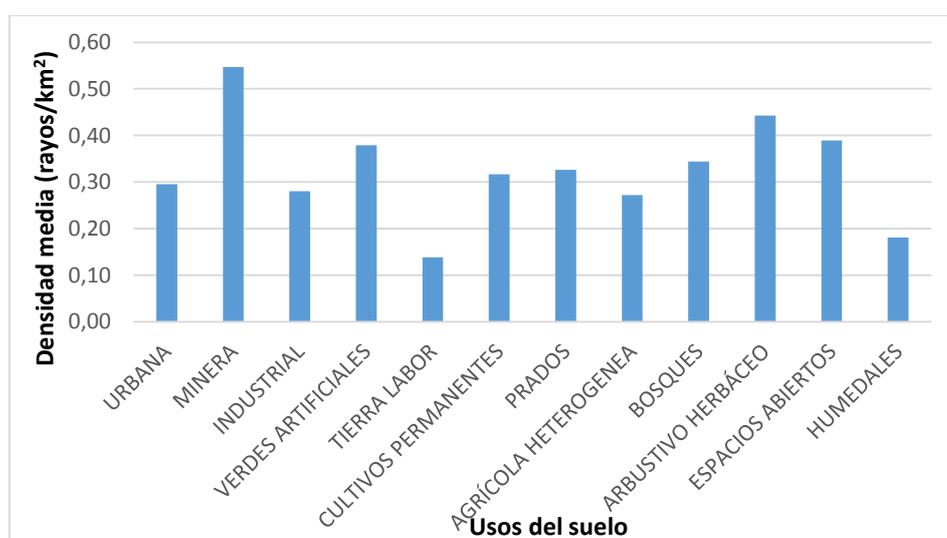


Figura 26: Gráfico con valores de densidad media anual de rayos según usos de suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

USOS DEL SUELO	ÁREA(km²)	RAYOS	DENSIDAD MEDIA ANUAL (RAYOS/KM²)
URBANA	90,42	374	0,30
MINERA	32,4	248	0,55
INDUSTRIAL	69,59	273	0,28
VERDES ARTIFICIALES	5,84	31	0,38
TIERRA LABOR	11,88	23	0,14
CULTIVOS PERMANENTES	6,77	30	0,32
PRADOS	1927,73	8798	0,33
AGRÍCOLA HETEROGENEA	1015,4	3869	0,27
BOSQUES	3339,48	16088	0,34
ARBUSTIVO HERBÁCEO	3615,49	22415	0,44
ESPACIOS ABIERTOS	451,41	2459	0,39
HUMEDALES	11,46	29	0,18

Tabla 8: Valores de densidad media anual (rayos/km²) según usos del suelo y extensión (km²) de cada uso del suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

La ponderación de los valores de densidad por el área y los rayos totales se realiza dividiendo los valores de densidad por el número rayos totales, y multiplicando por el área total del Principado de Asturias (Figura 27 y Tabla 9) y nos permite ver qué usos de suelo son los que tienen predisposición al impacto de los rayos (valor superior a 1).

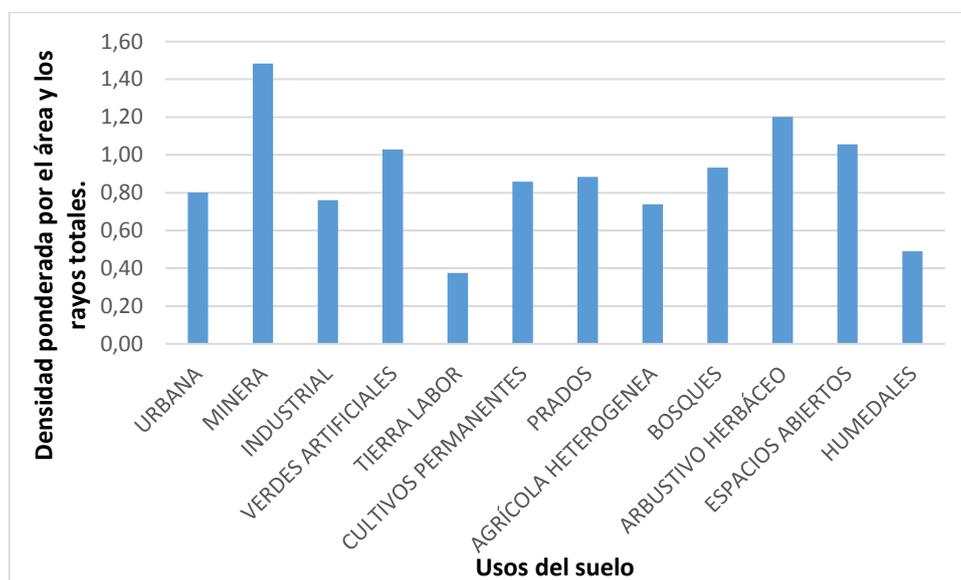


Figura 27: Gráfico con valores de densidad media anual de los rayos según usos de suelo, ponderada por el área y los rayos totales en el Principado de Asturias (2000-2013).

<u>USOS DEL SUELO</u>	<u>DENSIDAD MEDIA ANUAL PONDERADA POR RAYOS TOTALES Y ÁREA TOTAL</u>
URBANA	0,80
MINERA	1,48
INDUSTRIAL	0,76
VERDES ARTIFICIALES	1,03
TIERRA LABOR	0,38
CULTIVOS PERMANENTES	0,86
PRADOS	0,88
AGRÍCOLA HETEROGENEA	0,74
BOSQUES	0,93
ARBUSTIVO HERBÁCEO	1,20
ESPACIOS ABIERTOS	1,06
HUMEDALES	0,49

Tabla 9: Valores de densidad media anual ponderada por área total y número de rayos totales para cada uso del suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

El resultado más destacable es la predisposición de las zonas mineras a la recepción de los rayos, así como las zonas arbustivas herbáceas, los espacios abiertos y las zonas verdes artificiales.

Esta distribución cambia notablemente si ponderamos teniendo en cuenta el efecto de la altitud media de cada zona (Figura 28 y Tabla 10). Por ello se toman los valores representados en la figura 27, dividiéndose por la altitud media de cada intervalo de altura (ver sección 4.5) y multiplicándose por la altitud media del Principado de Asturias. Estos valores medios han sido obtenidos con ArcGis. Con esta ponderación, pasan a ser las zonas verdes artificiales aquellas que más predisposición presentan a la caída de los rayos. Destacan en segundo lugar también las zonas urbanas con un valor cercano al 4. En un tercer orden tenemos las zonas de tierras de labor y las de cultivos permanentes por encima de 2. Con valores por encima de 1 y cercanos a 1 están las zonas mineras, de prados, agrícolas heterogéneas y humedales. Las zonas que presentarían menor predisposición son las de espacios abiertos.

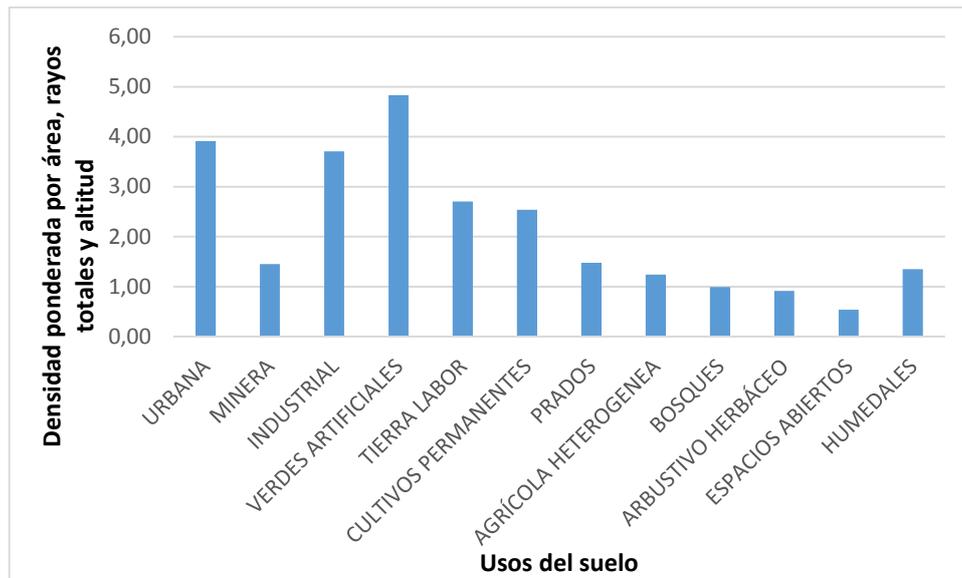


Figura 28: Gráfico con valores de densidad media anual de los rayos según usos de suelo, ponderada por el área total, los rayos totales y la altitud en el Principado de Asturias (2000-2013).

<u>USOS DEL SUELO</u>	<u>ALTITUD MEDIA (m)</u>	<u>DENSIDAD MEDIA ANUAL PONDERADA POR RAYOS TOTALES, ÁREA TOTAL y ALTITUD</u>
URBANA	128,19	3,91
MINERA	639,57	1,45
INDUSTRIAL	128,34	3,70
VERDES ARTIFICIALES	133,12	4,83
TIERRA LABOR	86,81	2,70
CULTIVOS PERMANENTES	211,38	2,54
PRADOS	374,03	1,48
AGRÍCOLA HETEROGENEA	372,00	1,24
BOSQUES	590,07	0,99
ARBUSTIVO HERBÁCEO	822,10	0,91
ESPACIOS ABIERTOS	1222,66	0,54
HUMEDALES	227,18	1,35

Tabla 10: Valores de densidad media anual para cada uso de suelo ponderada por el área total, rayos totales y altitud (m) en el Principado de Asturias (2000-2013).

Estos resultados no son fácilmente interpretables debido a que, si bien, como se ha dicho antes, tenemos antecedentes en Castilla-León, las características del relieve son bien distintas para el caso de Asturias. En este sentido, podrían interpretarse mejor los resultados con estudios en regiones similares a Asturias como, por ejemplo, Cantabria.

4.7 Actividad eléctrica en relación con los tipos de suelo

Siguiendo con la base de datos filtrada por segunda vez, con un total de 56020 rayos, analizamos ahora la actividad eléctrica con los tipos de suelo. Como muestran los datos (Figura 29 y Tabla 11), las densidades más altas se dan en los suelos de tipo Andosol-Cambisol con 0,42 rayos/km², los leptosoles cuarcíticos no rugosos con 0,40 rayos/km² y los leptosoles calcáricos no rugosos (0,39 rayos/km²). Hay que decir que todas las tipologías se mueven en un rango bastante pequeño, habiendo diferencias poco significativas entre ellas en la mayoría los casos.

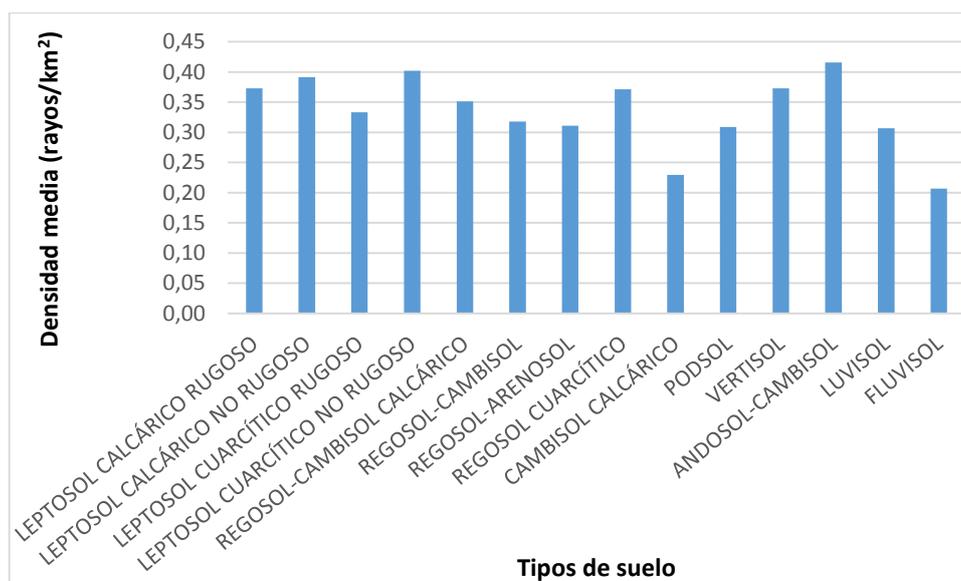


Figura 29: Gráfico con valores de densidad media anual según el tipo de suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

TIPOS DE SUELO	ÁREA(KM²)	NÚMERO DE RAYOS	DENSIDAD MEDIA ANUAL (RAYOS/KM²)
LEPTOSOL CALCÁRICO RUGOSO	204,05	1065	0,37
LEPTOSOL CALCÁRICO NO RUGOSO	403,04	2208	0,39
LEPTOSOL CUARCÍTICO RUGOSO	89,78	419	0,33
LEPTOSOL CUARCÍTICO NO RUGOSO	88,13	496	0,40
REGOSOL-CAMBISOL CALCÁRICO	593,24	2919	0,35
REGOSOL-CAMBISOL	854,14	3799	0,32
REGOSOL-ARENOSOL	279,39	1216	0,31
REGOSOL CUARCÍTICO	1722,52	8958	0,37
CAMBISOL CALCÁRICO	85,23	274	0,23
PODSOL	1302,02	5628	0,31
VERTISOL	1930,52	10077	0,37
ANDOSOL-CAMBISOL	2203,62	12826	0,42
LUVISOL	1195,77	5132	0,31
FLUVISOL	221,33	641	0,21

Tabla 11: Valores de densidad media anual (rayos/km²) según tipos del suelo y extensión (km²) de cada uso del suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

La ponderación por el área y rayos totales (Figura 30 y Tabla 12) nos muestra que son los 3 tipos de suelo mencionados anteriormente los que muestran predisposición inicialmente a recibir descargas eléctricas.

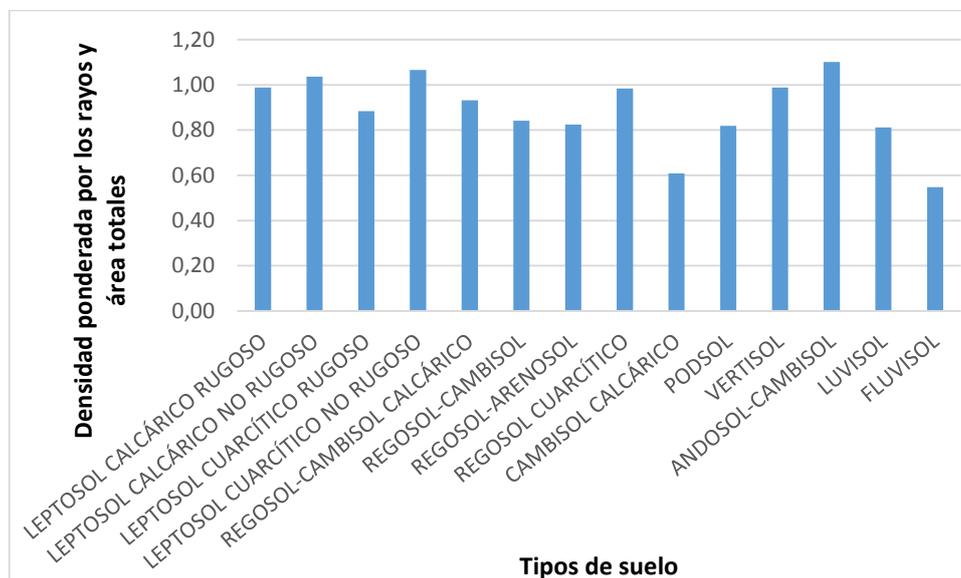


Figura 30: Gráfico con valores de densidad media anual de los rayos según tipos de suelo, ponderada por el área total y los rayos totales en el Principado de Asturias (2000-2013).

TIPOS DE SUELO	DENSIDAD MEDIA ANUAL PONDERADA POR RAYOS TOTALES Y ÁREA TOTAL
LEPTOSOL CALCÁRICO RUGOSO	0,99
LEPTOSOL CALCÁRICO NO RUGOSO	1,04
LEPTOSOL CUARCÍTICO RUGOSO	0,88
LEPTOSOL CUARCÍTICO NO RUGOSO	1,07
REGOSOL-CAMBISOL CALCÁRICO	0,93
REGOSOL-CAMBISOL	0,84
REGOSOL-ARENOSOL	0,82
REGOSOL CUARCÍTICO	0,98
CAMBISOL CALCÁRICO	0,61
PODSOL	0,82
VERTISOL	0,99
ANDOSOL-CAMBISOL	1,10
LUVISOL	0,81
FLUVISOL	0,55

Tabla 12: Valores de densidad media anual ponderada por área total y número de rayos totales para cada tipo de suelo en el Principado de Asturias (2000-2013).

Llama la atención que los leptosoles calcáricos y cuarcíticos tengan una densidad mayor en la categoría “no rugoso”. Estas zonas corresponden a zonas de suelo discontinuo y peñas. Una hipótesis que explique este resultado podría ser que las zonas rugosas normalmente están más protegidas que las no rugosas por la insolación. Además es indicativo el hecho de que las zonas de peñas rugosas suelen ser las que la fauna utiliza de cobijo. El resto de tipologías están por debajo de 1 pero son muy cercanas a dicho valor, salvo el caso de las tipologías de cambisol calcárico y fluvisoles. Respecto a los andosoles, el resultado podría explicarse si las arcillas propias de este tipo de suelos estuvieran enriquecidas en algún elemento metálico. Por ello se ha cruzado la información con un mapa de anomalías geoquímicas en Asturias realizado y proporcionado por la profesora Susana del Carmen Fernández Menéndez (ver anejo), basado en recogida de datos del año 1984 realizada por el Instituto Geológico y Minero Español (IGME), cuyos resultados muestran a simple vista una presencia relativa de anomalías de hierro (fe) sobre todo en la mitad oeste del Principado de Asturias.

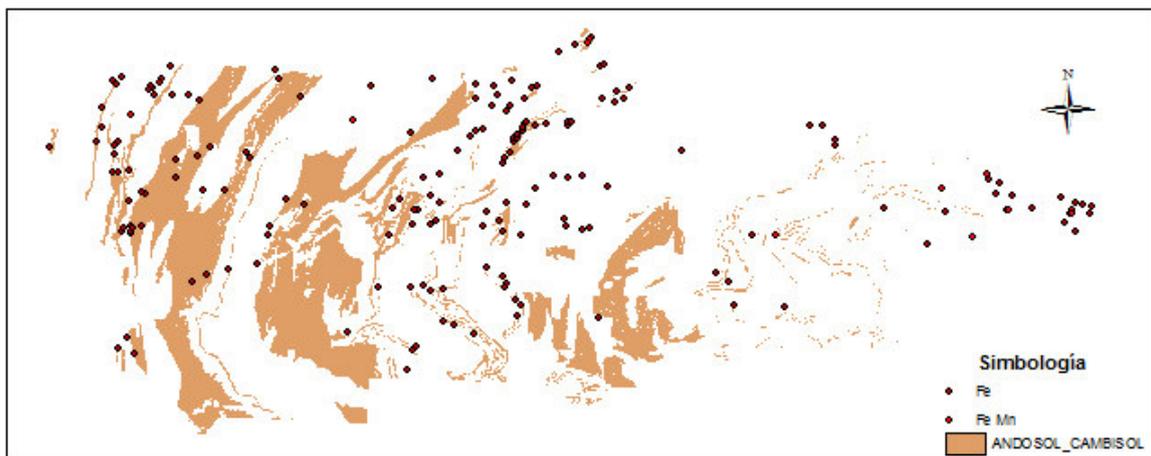


Figura 31: Puntos de anomalías en hierro (Fe) y suelos de andosol-cambisol en el Principado de Asturias.

Si se pondera por la altitud de cada zona (Figura 32 y Tabla 13), luvisoles, podzoles y vertisoles muestran predisposición sobrepasando escasamente el valor 1 pero sobre todo aparecen los fluvisoles y los regosoles-arenosoles como los tipos de suelo que mayor predisposición presentan, con valores superiores a los 2,50.

Tal y como ocurre en el apartado 4.6, este último resultado no puede interpretarse de la mejor manera al no conocer otros casos en regiones que tengan una tipología de suelo y un relieve similar.

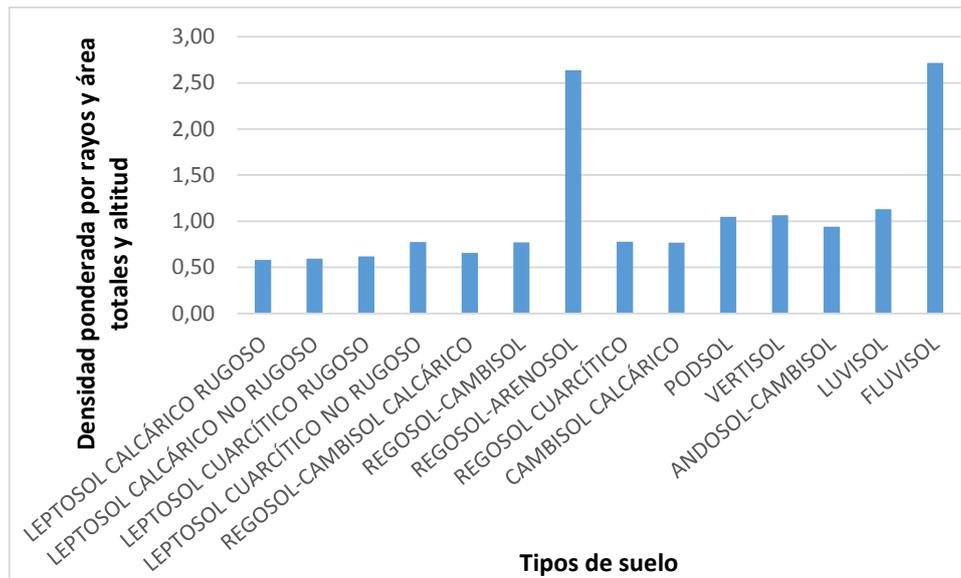


Figura 32: Gráfico con valores de densidad media anual de los rayos según tipos de suelo, ponderada por el área total, los rayos totales y la altitud en el Principado de Asturias (2000-2013).

TIPOS DE SUELO	ALTITUD MEDIA (m)	DENSIDAD PONDERADA POR AREA, RAYOS Y ALTITUD MEDIA
LEPTOSOL CALCÁRICO RUGOSO	1062,68	0,58
LEPTOSOL CALCÁRICO NO RUGOSO	1093,39	0,59
LEPTOSOL CUARCÍTICO RUGOSO	893,08	0,62
LEPTOSOL CUARCÍTICO NO RUGOSO	859,84	0,77
REGOSOL-CAMBISOL CALCÁRICO	886,85	0,66
REGOSOL-CAMBISOL	683,56	0,77
REGOSOL-ARENOSOL	195,27	2,64
REGOSOL CUARCÍTICO	792,80	0,78
CAMBISOL CALCÁRICO	496,16	0,77
PODSOL	487,97	1,05
VERTISOL	580,55	1,06
ANDOSOL-CAMBISOL	733,45	0,94
LUVISOL	449,74	1,13
FLUVISOL	126,27	2,72

Tabla 13: Valores de densidad media anual para cada tipo de suelo, ponderada por el área total, rayos totales y altitud (m) en el Principado de Asturias (2000-2013).

5 – CONCLUSIONES

En este trabajo se ha realizado una climatología descriptiva de las descargas eléctricas en el Principado de Asturias, tarea que hasta la fecha no había sido elaborada. El periodo de estudio comprende desde el año 2000 al 2013.

De los resultados obtenidos destaca, en primer lugar, el diferente comportamiento estacional de la actividad eléctrica, pues está asociada a las tormentas estivales localizadas en zonas de montaña y a las tormentas invernales que se localizan en las zonas costeras. Las diferencias, además de espaciales, son manifiestas en cuanto al número e intensidad, siendo mayor la actividad en las tormentas estivales. Destaca en este punto los altos valores locales de densidad que se dan en localizaciones de aerogeneradores eléctricos, lo que da lugar a pensar en una posible relación entre el incremento local de la actividad eléctrica y estos parques eólicos. Además, se demuestra una relación clara entre la descarga de rayos y la altitud, tanto por el alto coeficiente de correlación como por los resultados del SIG que muestran los mayores valores de densidad, mayor número medio anual de días de tormenta y multiplicidad del rayo en puntos de gran altitud de la Cordillera Cantábrica.

En cuanto a los usos de suelo, parece haber una relativa atracción de las zonas mineras que podría explicarse si contienen una alta concentración en algún tipo de metal. Además tenemos también las zonas de espacio abierto y de zona arbustiva, es decir, peñas descubiertas y zonas de vegetación baja, con una clara exposición a los elementos. Para llegar a una conclusión más concreta sobre los usos del suelo en general, se necesitaría cruzar la base de datos de rayos empleada en este apartado con un mapa de usos de suelo más pormenorizado a los usos de suelo específicos en Asturias.

Los resultados de la actividad eléctrica en relación con los tipos de suelo están en parte relacionados con los de usos de suelo, pues se muestra una predisposición clara al impacto de los rayos en aquellas zonas de suelos descubiertos, aumentando además en las zonas menos rugosas. El alto valor de predisposición al impacto de los rayos en los andosoles podría explicarse por la componente metálica de minerales como el hierro. Los resultados, en principio interesantes, habrían de ser comprobados en posteriores y pormenorizados estudios en este campo.

6 – BIBLIOGRAFÍA

MORA, M., 2012: “*La actividad tormentosa en Castilla y León: Análisis microescalar y modelos conceptuales*”. Tesis leída en la Universidad de Salamanca para optar al doctorado en Física. <http://www.tdx.cat/handle/10803/111017>

AREITIO, J., EZCURRA, A. y HERRERO, I, 2001: “*Cloud-to-ground lightning characteristics in the Spanish Basque Country area during the period 1992-1996*”. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, Volume 63, Issue 10, July 2001, Páginas 1005-1015.

ÁLVAREZ, E., ESPEJO, F., CORTÉS, F.J., LAFRAGÜETA, C., y SERRANO, R., 2011: “*Caracterización sinóptica de los procesos convectivos en el interior del NE peninsular*”. Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). *Nota técnica 3*.

CHAGNON, S. A., y SEMONIN, R.G., 1979: “*Impact of man upon local and regional weather*”. *Reviews of Geophysics*. Volume 17, Issue 7, pages 1891–1900, October 1979.

ENNO, S. E., 2011: “*A climatology of cloud-to-ground lightning over Estonia 2005-2009*”. *Atmos. Res.* 100, 10-317.

SCHULZ, W., CUMMINS, K., DIESDOFER, G., DOMINGER, M., 2005: “*Cloud-to-ground lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system*”. *Journal of Geophysical Research*. Volume 110, Issue D9.

RIVAS SORIANO, L., DE PABLO, F., TOMAS, C., 2005: “*Ten year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula*”. *J.Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 67, 1632-1639.

ORVILLE, R., HUFINES, G.R., 2001: “*Cloud-to-ground Lightning in the United States: NDLN Results in the First Decade*”. 1989-98.

Organización Meteorológica Mundial (OMM). Vocabulario Meteorológico Internacional, nº 182.

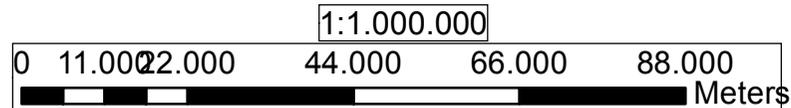
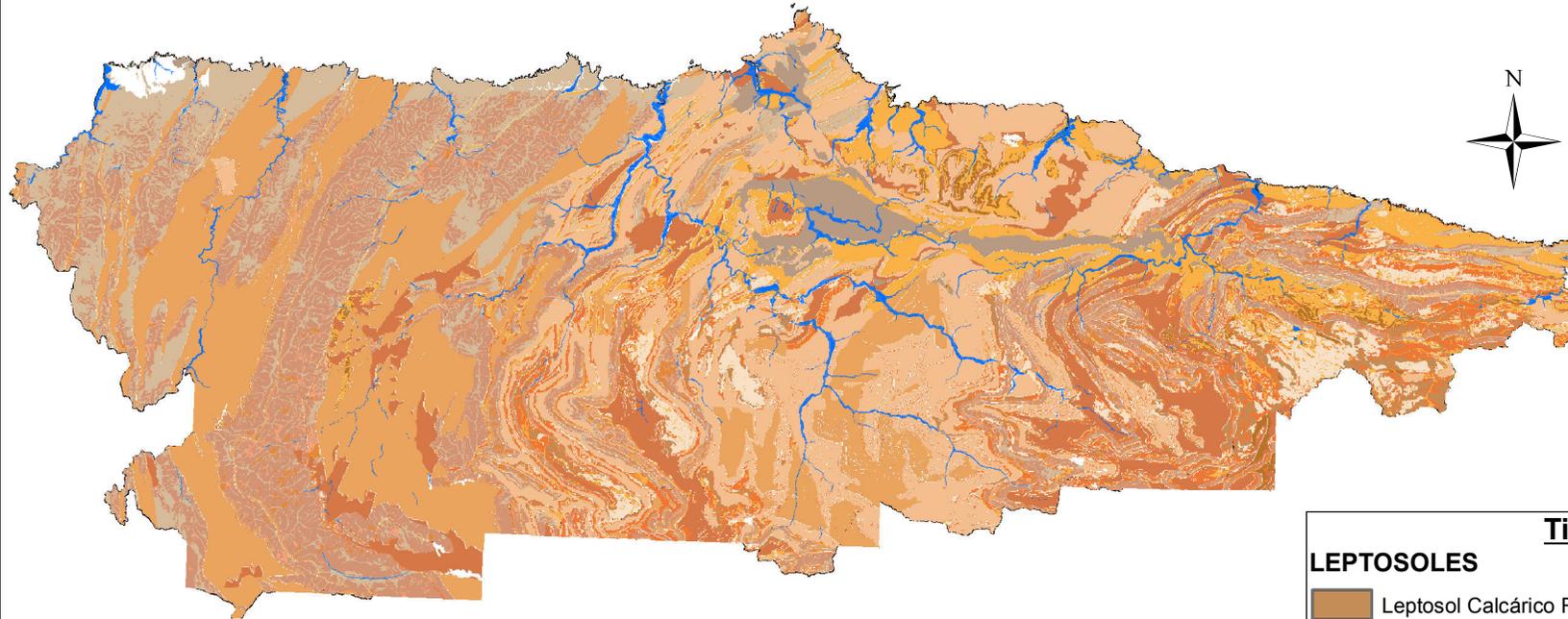
ESRI, “*Ayuda de ArcGIS 10.1*”, <http://resources.arcgis.com/es/help/>, [Consulta: Abril, mayo y junio de 2014]

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), BIBLIOTECA MÓDULOS TEMPO, “*Modelos Conceptuales de tormentas: Radar y Rayos*”, http://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_educativos/modulos_tempo [Consulta: 12/2/2014].

Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), Servicios Climáticos, <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos?l=1249I&k=ast>

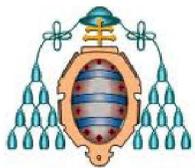
ANEJO

Mapa de Tipos de suelo con criterio geológico. Principado de Asturias



JULIO DE 2014

David Prieto Sisniega
Susana del Carmen Fernández Menéndez



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

Tipos de suelo

LEPTOSOLES

- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| Leptosol Calcárico Rugoso | Leptosol Calcárico No Rugoso |
| Leptosol Cuarcítico Rugoso | Leptosol Cuarcítico No Rugoso |

REGOSOLES

- | | |
|----------------------------|--------------------|
| Regosol-Cambisol Calcárico | Regosol-Arenosol |
| Regosol-Cambisol | Regosol Cuarcítico |

CAMBISOLES

- | |
|--------------------|
| Cambisol Calcárico |
|--------------------|

VERTISOLES

- | |
|----------|
| Vertisol |
|----------|

LUVISOLES

- | |
|---------|
| Luvisol |
|---------|

PODZOLES

- | |
|--------|
| Podsol |
|--------|

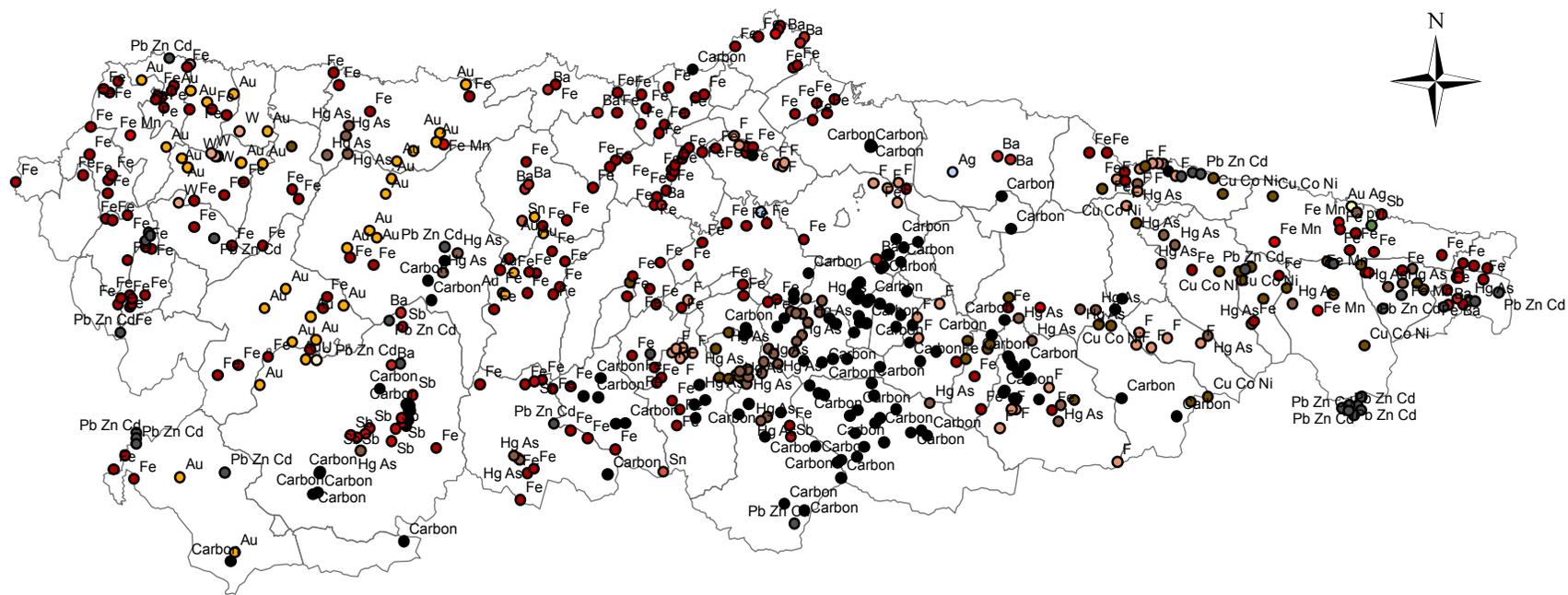
ANDOSOLES

- | |
|------------------|
| Andosol-Cambisol |
|------------------|

FLUVISOLES

- | |
|----------|
| Fluvisol |
|----------|

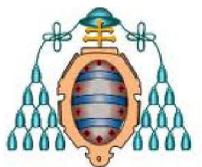
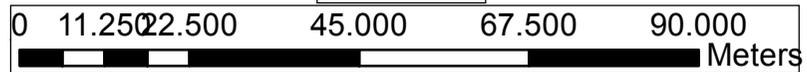
Mapa de anomalías geoquímicas.



Anomalías Elementos

- Ag
- Au
- Au Ag
- Ba
- Carbon
- Cu Co Ni
- F
- Fe
- Fe Mn
- Hg As
- Mo Sn Au
- Pb Zn Cd
- Sb
- Sn
- U
- W
- pyr

1:1.000.000



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

JULIO DE 2014

Susana del Carmen Fernández Menéndez