



**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE GENERACIÓN DE  
PROCESOS DE IGNICIÓN A PARTIR DE RAYOS,  
SUSCEPTIBLES DE ORIGINAR INCENDIOS  
FORESTALES**

**Preparado para:** Dirección General de Prevención de Incendios Forestales  
Conselleria de Agricultura, Desarrollo Rural, Emergencia Climática y Transición Ecológica

---

**Elaborada por:** Programas de *Investigación Forestal* y de *Meteorología y Contaminación Atmosférica*

**Fecha:** 26 de abril de 2021

**Versión:** V02

---





# EVALUACIÓN DEL RIESGO DE GENERACIÓN DE PROCESOS DE IGNICIÓN A PARTIR DE RAYOS, SUSCEPTIBLES DE ORIGINAR INCENDIOS FORESTALES

Valencia, 26 de abril de 2021  
Versión V02

ÍNDICE DE CONTENIDOS.	Pgn
<b>RESUMEN.</b>	
<b>INTRODUCCIÓN.</b>	
<b>ANTECEDENTES. APROXIMACIÓN GENERAL.</b>	
<b>Electricidad Atmosférica.</b>	
<u>Descarga.</u>	
<u>Detección.</u>	
<u>Ignición.</u>	
<b>Incendios causados por rayos.</b>	
<b>Modelos de estimación de la probabilidad de ocurrencia de incendios originados por rayos.</b>	
<u>Modelos de regresión lineal.</u>	
<b>MATERIALES Y MÉTODOS.</b>	
<b>Fuentes de Información.</b>	
<u>Incendios Forestales.</u>	
<u>Rayos.</u>	
<u>Variables Cartográficas.</u>	
<u>Variables Ambientales.</u>	
<b>Contexto de los Incendios Forestales.</b>	
<b>Incendios Causados por Rayos.</b>	
<b>Factores Ambientales.</b>	
<b>EXPLOTACIÓN DEL BANCO DE DATOS HISTÓRICO.</b>	
<b>Análisis de la Base de Datos de Rayos.</b>	
<b>Selección de Rayos Asociados a Incendios.</b>	
<b>Análisis de Contingencias.</b>	
<u>Dependencia con las referencias temporales.</u>	
<u>Dependencia con las características de las descargas.</u>	
<u>Dependencia con los factores orográficos.</u>	
<u>Dependencia con los factores ambientales.</u>	
<b>Modelos de Operativos.</b>	
<b>RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES.</b>	
<b>NUEVAS PROSPECCIONES.</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA.</b>	



**Los trabajos presentados han sido realizados por el Programa de Investigación Forestal y el Área de Meteorología y Contaminación Atmosférica del Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo para la Dirección General de Prevención de Incendios Forestales según expediente CNME20/0304/051.**



## EVALUACIÓN DEL RIESGO DE GENERACIÓN DE PROCESOS DE IGNICIÓN A PARTIR DE RAYOS, SUSCEPTIBLES DE ORIGINAR INCENDIOS FORESTALES

*Valencia,  
Versión*

*26 de abril de 2021  
V02*

### RESUMEN.

---

Los rayos constituyen la principal causa natural de los incendios forestales en la Comunitat Valenciana, con una importancia creciente en la proporción absoluta del origen de los fuegos. Comprender los mecanismos por los cuales una descarga eléctrica nube-tierra acaba produciendo una ignición susceptible de desembocar en un incendio forestal, tiene un gran interés desde el punto de vista científico, ya que persisten numerosas incertidumbres, como desde la prevención y extinción de incendios. Sin necesidad de entrar en los detalles físicos (la propia electricidad atmosférica presenta aún muchos aspectos desconocidos), profundizar en la caracterización de los factores ambientales que condicionan y/o favorecen el inicio de un fuego a partir de la descarga eléctrica desde una nube, recoge también gran parte del anterior interés.

Los trabajos que se exponen en el presente documento compilan el análisis del banco de datos de descargas eléctricas del que se dispone en la Comunitat Valenciana y la base documental de incendios. El copioso volumen de registros ha permitido reflejar algunos de los rasgos más destacados del comportamiento y distribución de los rayos en la Comunitat Valenciana, y de las características de los incendios forestales originados por las descargas eléctricas que, con cierta variabilidad, superan el 25% en el promedio del periodo analizado.

La incorporación de los factores ambientales en el análisis ha puesto de manifiesto el amplio rango de situaciones bajo las que se desencadenan los fuegos tras una descarga eléctrica lo que, unido a un elevado margen de incertidumbre en la determinación de muchos de los parámetros, le proporciona al hecho de la ignición un cierto grado de aleatoriedad. En línea con otros estudios, las características del rayo no parecen marcar una diferencia con la ocurrencia, mientras que, con una interpretación puramente probabilística, la concentración de descargas próximas en el tiempo y en el espacio aumenta claramente la posibilidad del conato. La pendiente del terreno sería también un factor propiciatorio, al igual que algunas de las magnitudes ambientales analizadas, pero siempre con correlaciones no muy fuertes. El parámetro de la lluvia, habitualmente asociado a proporciones crecientes de igniciones para los rangos decrecientes de precipitación (tormentas secas), no refleja tan claramente este comportamiento en el conjunto de datos estudiado. Quizás esta relación quede enmascarada por el hecho de trabajar con niveles medios diarios de lluvia y por las dificultades de asignar valores concretos de una magnitud que se distribuye tan irregularmente a partir de una red dispersa.

La oportunidad de incorporar los resultados en un modelo operativo que proporcionase una valoración (espacial) del riesgo de incendio ante la ocurrencia efectiva de descargas eléctricas se exploró a partir del ajuste de un modelo de regresión logística lineal, con limitadas expectativas (en gran medida por las necesidades de alimentación con datos actuales). Adicionalmente se propuso un prototipo de modelo heurístico, incorporando la realidad proporcionada por el banco de datos histórico, como herramienta funcional viable para apoyar la toma de decisiones sobre la base única de las descargas en curso.

A corto plazo, los resultados podrían mejorarse con la reducción de la incertidumbre en la información con la que se ha trabajado en esta primera aproximación. Básicamente se consideran dos líneas: refinando la relación entre los rayos registrados y los incendios realmente producidos por una descarga eléctrica y mejorando la asignación de los valores ambientales asignados al punto de impacto.



## INTRODUCCIÓN.

---

Los rayos son descargas eléctricas producidas en el seno de la atmósfera como consecuencia de la separación de cargas positivas y negativas que se producen en la misma de manera natural, espacialmente ligada a procesos convectivos intensos. Estas descargas pueden alcanzar la tierra con diferente energía, pudiendo hacerlo en forma de una corriente continua o de transferencias repetitivas de cargas eléctricas.

La incidencia de los rayos como desencadenantes de incendios forestales ha llegado a ser superior al 30% en algunos años, siendo entre las de origen natural la principal causa de aquellos. Aunque proporcionalmente inferior a los motivados directamente por el hombre, su impacto suele ser mayor en cuanto al tamaño del incendio, dada la potencial lejanía e inaccesibilidad del punto de inicio del fuego.

Esta incidencia tan alta va acompañada de un gran potencial de desarrollar incendios forestales, dado que la mayor parte de las caídas de rayos se producen en el periodo estival y se suelen dar en circunstancias topográficas con dificultad de acceso. Si a ello se suma la gran cantidad de rayos que se producen en cortos periodos de tiempo en un territorio muy extenso, hace que se incremente aún más el peligro de incendio forestal con dicho origen.

La Comunitat Valenciana es muy propensa a esta situación de riesgo, en tanto acumula una elevada frecuencia de rayos entre los registrados en toda la Península Ibérica, con alguna zona (norte de Castellón) en la que se localizan los máximos absolutos de la distribución.

En este contexto, se suscita el gran interés de explorar un índice normalizado que permita informar sobre la probabilidad de que se produzca una ignición por efecto de rayos, extendido al territorio de la Comunidad Valenciana, y formulado en términos de los factores contribuyentes al riesgo.

Este interés se amplificaría si en un futuro, bajo un escenario de cambio climático, un incremento de episodios convectivos (aumento de situaciones de inestabilidad atmosférica) con menores precipitaciones y aumento de la temperatura, podría estar estimulando la ocurrencia de tormentas secas con potencial aumento del efecto de los rayos como iniciadores de incendios.

El documento, en su versión actual, recoge los trabajos prospectivos de caracterización de los incendios originados por rayos y análisis de la base de datos de rayos registrados en la Comunitat Valenciana, a la que se ha adjuntado la información estructural y ambiental potencialmente condicionante del desencadenamiento del proceso de ignición tras la ocurrencia del rayo. De la revisión de esta documentación es posible obtener información del grado de ligazón entre los distintos tipos de condicionantes y la probabilidad de que una descarga eléctrica entre la nube y el suelo acabe desencadenando un incendio forestal.

Se ha realizado un importante trabajo de estructuración y depuración de las bases de datos disponibles, complementándola con otras fuentes documentales para completar el soporte analítico de incendios/causas y rayos/características. Gran parte del conocimiento en la relación entre rayos e incendios forestales, en una primera fase de aproximación, procede del mero análisis de esta documentación (cartografía, vegetación, factores ambientales, etc.).

El desarrollo de un modelo predictivo que permita anticipar el riesgo de que una descarga eléctrica acabe desencadenando un incendio forestal ocupa la última parte del trabajo. Así, se aborda la posibilidad de un índice que pudiese proporcionar, de manera operativa, un indicador de este riesgo en función de las condiciones reinantes en el momento. La literatura científica aporta muchas herramientas numéricas, aunque la complejidad de los procesos físicos involucrados difumina en gran medida las posibilidades de éxito de los modelos operativos propuestos. En el presente trabajo se ajustaron los datos a un modelo de regresión logística lineal sobre las seis variables independientes con mayor potencial predictivo. Su implementación precisaría un acceso en tiempo real a los valores registrados de una serie de magnitudes ambientales con cobertura extensa en todo el territorio de la Comunitat. Una vía alternativa de abordar la evaluación del riesgo de incendio asociado a un rayo consistiría en asumir que la probabilidad corresponde precisamente a la frecuencia con la que una descarga eléctrica en el punto de impacto se asocia a un incendio, tal como se desprende de la compilación histórica del registro de rayos-incendios. Esta aproximación heurística, que permitió implementar un prototipo presentaría grandes facilidades de incorporación en una herramienta rutinaria de apoyo a la toma de decisiones, a la vez que permitiría un notable margen de refinamiento.



---

## ANTECEDENTES. APROXIMACIÓN GENERAL.

---

En la Comunitat Valenciana, como indica el PATFOR, los incendios forestales generan alarma social y constituyen uno de los riesgos naturales que afectan al territorio de manera más perceptible. En este contexto, los rayos, como causa natural del inicio de un incendio forestal, tienen mucha relevancia en la Comunitat Valenciana, representando aproximadamente el 25% de las igniciones producidas (en un periodo promedio analizado entre los años 2009 y 2018 (referencia estudio). En general, la proporción de igniciones causadas por el hombre es mayor, pero los tamaños de sus incendios son típicamente más pequeños que los causados por rayos. Esta diferencia se debe, generalmente, a la lejanía y la inaccesibilidad a las zonas de ignición en los incendios iniciados de manera natural, lo que dificulta el control de los mismos.

---

### Electricidad Atmosférica.

---

La baja atmósfera constituye un medio físico ligeramente conductor debido a la presencia de especies cargadas, tanto iones positivos como negativos. Su origen procede principalmente de tres tipos de causas de ionización: la radiación cósmica, la radiación debido a la presencia de sustancias radiactivas en el suelo y los gases generados por el decaimiento de los anteriores. La primera de las causas es responsable principalmente de la conductividad a elevadas altitudes de la atmósfera, mientras que las otras dos son predominantes en las capas inferiores. La conductividad del aire es función del número de iones de diferente carga presentes en la atmósfera, y de las características de su movilidad, más pronunciada cuanto menor masa (la mayor parte de la conductividad total del aire procede de iones pequeños, y su valor aumenta rápidamente con la altura). Este incremento procede de la actividad ionizante en las capas altas debido a la radiación cósmica, el aumento de la movilidad de los iones a medida que disminuye la densidad general con la altura y por la tendencia de los iones más pesados a permanecer cerca de la superficie. Esta variación con la altura del potencial eléctrico determina un campo eléctrico que fundamentalmente tiene componente vertical (las variaciones horizontales resultan menores) orientado hacia abajo.

Como resultado de la existencia de un campo eléctrico (predominantemente) vertical, en presencia de iones con cargas positivas/negativas, se establece una corriente constante que fluye hacia la superficie terrestre: es la denominada corriente de conducción atmósfera-tierra. La intensidad de esta corriente viene determinada por el flujo neto de iones positivos desplazándose hacia abajo y de iones negativos moviéndose hacia arriba. En presencia de cargas netas, el movimiento del aire produce una transferencia de carga que puede definirse como una intensidad de corriente convectiva.

Por encima de la capa de mezcla, en condiciones de buen tiempo, puede considerarse que existe un equilibrio de cargas. Es en este estrato superficial, donde se produce un intenso intercambio de masa, energía y propiedades físicas de la atmósfera, en el que se registran las mayores variaciones de las propiedades eléctricas, que se manifiestan de día en día y aún a lo largo del día. El gradiente vertical del potencial eléctrico es muy sensible a la presencia de nubes bajas y nieblas, y en condiciones de buen tiempo presenta un doble ciclo en la mayor parte del año (en general más intenso en invierno que en verano). En todo caso, bajo estas condiciones denominadas de "buen tiempo" el campo eléctrico atmosférico, resultado del mencionado gradiente de cargas que se establece con la altura, toma valores modestos, al igual que las variaciones que se producen en su intensidad.

Este escenario cambia radicalmente cuando se desencadenan intensos movimientos verticales, como los que se registran en los procesos convectivos intensos, de manera que los cambios moderados en la electricidad atmosférica en condiciones de buen tiempo se vuelven entonces especialmente intensos. Este hecho tiene que ver tanto con la formación de nuevas cargas como con la separación de las mismas que ocurre estos movimientos convectivos, en los cuales se pone en juego una ingente cantidad de energía (térmica, gravitatoria y cinética), de la cual la actividad eléctrica, a pesar de su espectacularidad, no deja de ser residual.

En una nube convectiva se producen determinados procesos involucrados en la formación de gotas de agua y cristales de hielo, no siempre bien conocidos, que conducen a la aparición de cargas (captura de iones por las gotas de agua, efectos de inducción por colisión de partículas de diferentes tamaños, y otros efectos físicos relacionados con los cambios de fase). Una vez generadas las cargas a partir de un número enorme de estos procesos a microescala, se produce una separación de las mismas debido principalmente al movimiento diferencial de las partículas nubosas de diferentes tamaños debido a las propias fuerzas gravitatorias y el arrastre aerodinámico en los violentos movimientos en el interior del cúmulo. Ello conduce a que en ciertas



partes de la estructura nubosa se acumulen cargas positivas o negativas, generadoras de intensos campos electrostáticos que se extienden hasta la superficie del terreno hasta distancias bastante alejadas en el entorno de la nube. Frecuentemente la estructura eléctrica de una tormenta adopta un característico modelo de carga bipolar, con una parte superior positiva y una concentración de cargas negativas en la parte inferior; con frecuencia un segundo núcleo de cargas positivas se localiza próximo a la base de la nube.

Las descargas eléctricas se producen en este contexto de elevada concentración de cargas en volúmenes relativamente pequeños, que generan campos eléctricos inducidos con gradientes localmente muy intensos. Este potencial eléctrico vence la resistencia del dieléctrico para producir un flujo momentáneo de energía entre diferentes zonas de carga (nube-nube o nube-suelo). Este flujo de energía eléctrica repentino (rayo) puede ocasionar intensos fogonazos (relámpagos) acompañados de un fuerte sonido (truenos).

### Descarga.

En un proceso no bien establecido, el roce de pequeñas partículas de hielo en su movimiento caótico dentro de la nube da lugar a procesos de polarización, ocurriendo que las cargas positivas tienden a desplazarse hacia arriba, acumulándose en la parte inferior de la nube las negativas, de manera que la carga se intensifica a mediada que la nube se desarrolla. Cuando la diferencia de potencial alcanza una magnitud suficiente como para vencer la resistencia natural del dieléctrico (aire, estableciéndose en un umbral en torno a los  $3 \times 10^6$  V/m para condiciones estándar) que las separa, este se vuelve conductor y se produce una descarga electrostática de alta intensidad que se propaga como un cortocircuito a través del gas. Puede establecerse entre regiones de la propia nube o entre nubes próximas, sin involucrar la superficie terrestre, y representan casi el 75% del total de las descargas registradas. Por el contrario, las descargas entre las nubes y el suelo son las más relevantes por su potencial incidencia sobre el ser humano y los ecosistemas en general, distinguiéndose cuatro tipologías principales, dependiendo del sentido del desplazamiento de las cargas (ascendentes/descendentes) y de la naturaleza de las mismas (positivas/negativas).

En latitudes medias la actividad eléctrica en la nube suele producirse con alturas típicas de 7 a 9 km y movimientos verticales intensos entre 10 y 20 m/s. Un rayo típico de tipo nube-tierra se desencadena inicialmente con una pequeña descarga eléctrica entre una pequeña zona positiva, cerca de la base de la nube, y la región de carga negativa, en la zona media de la nube. La ionización parcial de las moléculas/átomos a lo largo de la trayectoria de la descarga guía crea un reguero de canales, los cuales van progresando escalonadamente y ramificándose lateralmente, acompañados de destellos luminosos. Al aproximarse al suelo el extremo de la guía se desencadena una descarga de retorno en sentido ascendente, aprovechando los canales fuertemente ionizados, lo que provoca una rapidísima compensación de la carga entre suelo y nube, acompañada de fenómenos de gran intensidad, tanto en la luminosidad que provoca, así como el sonido provocado por el rápido calentamiento y expansión del aire a lo largo de la trayectoria de la descarga. Este rastro, fuertemente ionizado, es alimentado por nuevas zonas cargadas de la nube a través de otras descargas guía, que ya no se ramifican, en una secuencia que puede durar un cierto tiempo. Si la carga inicial transportada es de signo positivo, dirigiéndose hacia una zona terrestre de carga opuesta, se habla de polaridad positiva, pudiendo ser también de signo contrario. Igualmente, el inicio se puede desencadenar desde el suelo (especialmente en puntos singulares sobresalientes y elevados sobre el terreno), aunque el hecho se produce mucho menos frecuentemente. En este caso el transporte inicial de carga es ascendente, de nuevo con la posibilidad de los dos tipos de polaridad. En conjunto se pueden distinguir cuatro tipos de rayos nube-tierra según su polaridad -positiva/negativa y sentido -descendente/ascendente, siendo los de tipo negativo-descendentes los más habituales.

En todo el proceso se dispersa gran cantidad de energía en forma de procesos de ionización y excitación de átomos y moléculas, aumento de temperatura, trabajo de expansión y, entre otras, la emisión de gran cantidad de radiación en un amplio espectro de frecuencias, especialmente en la banda de la muy alta (VHF), aunque también en baja frecuencia y onda larga (la descarga de retorno va acompañada de las señales de radio más intensas que se producen de forma natural en el planeta).

### Detección.

La profusión de señales electromagnéticas asociadas a la ocurrencia de rayos facilita su detección mediante instrumentación en tierra. Los métodos suelen basarse en la medida de la dirección de procedencia de la descarga o en el tiempo de llegada de la señal, o bien en la combinación de ambos parámetros.



El sistema de detección de rayos de la AEMET está compuesto actualmente por veinte equipos de detección de descargas, que se distribuyen a lo largo del territorio peninsular y los dos archipiélagos, complementándose con algunos otros sensores pertenecientes al servicio portugués y francés, asegurando una buena cobertura de todo el territorio nacional. El instrumental en cada nodo de la red detecta el pulso electromagnético producido en cada descarga, registrando el ángulo de procedencia, el tiempo de llegada y la intensidad de la onda. Todas estas magnitudes están sujetas a un cierto error, de manera que la localización de la zona de impacto viene representada por una elipse más que por un punto, cuyo área representa el espacio en el que la probabilidad de que el rayo haya caído es del 50%. Dependiendo del número y proximidad de los receptores en los que se detecta la onda electromagnética la excentricidad y dimensiones de la elipse serán más o menos reducidas, con el consiguiente aumento en la precisión de la localización del impacto. En esta estimación de la localización han de intervenir al menos dos puntos de medida. La consistencia entre las mediciones de los sensores que participan en la localización de un rayo se cuantifica mediante el estadístico chi-cuadrado, estimado a partir de todas las variables. Su valor refleja la consistencia entre los valores medidos por los distintos equipos que participan en la localización del punto de descarga. De esta manera, valores superiores a 10 suelen revelar problemas para determinar la dirección de procedencia del impulso o bien su desfase de llegada.

La detección de los rayos que se producen entre la nube y el suelo (también es posible registrar los producidos entre nubes) proporcionan información adicional relativa a la naturaleza de la descarga, además de las relativas a la localización de su impacto. Así la intensidad representa la cantidad de carga eléctrica que se pone en juego en el transporte entre los dos polos. El rango habitual de intensidades características de un rayo va desde unos pocos kA hasta alcanzar valores de pocos centenares. El sentido de la corriente dependerá de los signos de los polos entre los que se produce la conexión eléctrica. Por convenio se asignará polaridad positiva cuando la mayor carga positiva se encuentra en la nube y la más negativa en el suelo. La ocurrencia de uno u otro tipo de descarga se relaciona con ciertos procesos de desarrollo de la tormenta o ciertas peculiaridades de las mismas, que favorecen uno u otro tipo de ocurrencia. En promedio los rayos de polaridad negativa suelen ser mucho más frecuentes (~90%).

### Ignición.

Por otra parte, como se comentó inicialmente, habitualmente a la primera descarga asociada al rayo guía le sucede una rápida secuencia de descargas de retorno, que aprovechan el mismo canal fuertemente ionizado, y que a nivel perceptivo se identifica con un único fogonazo. Este número de corrientes ligadas se denomina multiplicidad y habitualmente aquellas ocurren en número tres o cuatro, aunque pueden alcanzar la veintena con persistencias superiores al segundo. Todas estas descargas no se localizan en el mismo punto, pudiendo localizarse en el rango de kilómetros los impactos asociados a un mismo rayo. De manera operativa se puede considerar como un rayo individual al conjunto formado por todas las descargas que impactan a menos de 10 km en el intervalo de 1 segundo.

La posibilidad de que se desencadene un incendio tras una descarga eléctrica viene condicionada por muchos factores, y puede formalizarse su desarrollo en tres fases consecutivas: ignición, persistencia y fuego. La fase de ignición puede considerarse como el proceso en el que se inicia la combustión sin llama ("smoldering") en el combustible natural como consecuencia del impacto de un rayo. La probabilidad de que se desencadene esta fase inicial parece depender principalmente de las características del rayo, las condiciones de combustible y la precipitación. Este inicio de la combustión requiere que la corriente eléctrica que impacta con el material lo caliente hasta alcanzar su temperatura de ignición, lo que se produce frecuentemente a lo largo de una zona anular a lo largo del canal de la descarga eléctrica, en la que se alcanzan temperaturas muy elevadas. La energía puesta en juego en este proceso depende de la intensidad, anchura del canal y duración de la propia descarga, y su eficiencia en la elevación de la temperatura vendrá condicionada por la naturaleza del material (calor específico del combustible, densidad, ...) y sobre todo su grado de humedad (parte de la energía se utiliza en la evaporación del posible contenido en vapor de agua)

Producida la ignición inicial, simultánea al impacto del rayo, la fase de persistencia corresponde al tiempo que transcurre hasta que aparece una combustión con llama. Esta fase puede saltarse, porque el inicio del fuego sea inmediato, o puede persistir varios días, hasta que la combustión iniciada decae y desaparece o, bajo condiciones ambientales favorables, explota en una combustión activa con llama. De nuevo la persistencia de la combustión dependerá de la naturaleza del combustible y su contenido de humedad, así como de la extensión de terreno involucrado en el proceso.



El estadio final en la ocurrencia del incendio corresponde al momento en el que la combustión sin llama se transforma en un fuego que alcanza la superficie del terreno, entrando ya en la dinámica de cualquier incendio forestal, en que el estado y naturaleza del combustible, las condiciones meteorológicas y el terreno van a condicionar su evolución. El desencadenamiento de una combustión con llama exterior a partir de la combustión interna tras el proceso de ignición parece muy dependiente de las condiciones ambientales, principalmente del viento (que puede avivar la llama) pero que también con la temperatura y humedad ambiente condicionan en gran medida el estado de humedad del combustible (especialmente el fino).

### **Incendios causados por rayos.**

---

Los procesos que desencadenan un incendio forestal a partir de un rayo son complejos, involucrando desde la propia actividad eléctrica que originan la descarga, como a la naturaleza de la vegetación y su estado (contenido de humedad), así como las condiciones meteorológicas (tanto como desencadenantes de la actividad eléctrica, como estimulantes de los procesos de ignición, combustión y ulterior propagación). Mientras la ocurrencia de descargas eléctricas nube-suelo resulta bien establecida, a partir de condiciones meteorológicas que favorecen una intensa actividad convectiva, la eventualidad de que el impacto de un rayo acabe provocando un incendio resulta mucho más indeterminado. Un factor determinante es la baja humedad en el ambiente, por lo que suelen ser las tormentas secas, aquellas cuya actividad eléctrica entre la nube y la superficie terrestre se produce en ausencia de precipitaciones (se suelen tomar por debajo de 2.5 mm), las que resultan de especial relevancia en la ocurrencia de fuegos tras la caída del rayo. Las tormentas secas se han asociado con la diferencia de temperatura en el estrato de 850-500 hPa, con la diferencia del punto de rocío en 850 hPa, con la energía potencial convectiva disponible (CAPE); también se han investigado las características del terreno (altura, pendiente y cobertura vegetal) en la frecuencia y densidad de impactos. Desencadenada la actividad eléctrica en la tormenta seca, son las características del combustible vegetal y su contenido en humedad lo que favorece fundamentalmente la posibilidad de que un rayo acabe provocando una ignición, y que esta persista lo suficiente como para aflorar como un fuego. En este punto el factor determinante es la presencia de combustible, con suficiente disponibilidad y cobertura y en condiciones de combustionar, lo que de nuevo retrotrae al contenido de humedad del suelo, íntimamente ligado al aporte de humedad por vía atmosférica.

### **Modelos de estimación de la probabilidad de ocurrencia de incendios originados por rayo.**

---

Los trabajos científicos han incluido numerosos índices que tratan de representar el contenido (o déficit) de humedad de la vegetación en el análisis de la ocurrencia de incendios forestales asociados a rayos. Adicionalmente, los factores ambientales (principalmente temperatura y humedad de la masa aérea, intensidad del viento y precipitación) también han sido evaluados en la contingencia de incendios asociados a rayos, con un doble papel, indirectamente en tanto que afectan al estado de la vegetación (grado de humedad del combustible) y de manera más directa, favoreciendo los procesos de ignición, persistencia y afloramiento del fuego.

La modelización de la ocurrencia de incendios causados por rayos responde al interés por predecir posibles igniciones con objeto de optimizar, dimensionar y direccionar la dedicación de recursos de prevención y extinción. Los trabajos documentados contemplan un amplio rango de modelos, con énfasis sobre diferentes aspectos del proceso físico y que, en su mayoría, utilizan herramientas de regresión matemática (gran parte de los estudios estadísticos que cuantifican patrones espaciales y temporales a escala fina de la ignición de incendios forestales han utilizado una regresión logística o una técnica similar). También la modelización de procesos puntuales, que capturan el patrón agrupado de igniciones e incorporan variables predictoras han sido utilizados en menor grado. Finalmente, la irrupción con fuerza de técnicas de inteligencia artificial también ha dado pie a la utilización de algoritmos de aprendizaje automático, con un alto poder predictivo en la simulación de los procesos naturales de ignición forestal. Un condicionante de índole práctica y presente en todos los casos, con independencia de la herramienta numérica, se refiere a qué variables incluir en el modelo. La formación de un fuego a partir de una descarga eléctrica es un proceso físico complejo, con una gran cantidad de covariables potencialmente influyentes en su gestación, lo que convierte a la selección de los factores a incluir en el modelo en un hito importante. Por otra parte, la necesidad de obtener información actualizada para una gran cantidad de covariables puede introducir importantes restricciones en el uso de muchos modelos en modo operativo rutinario.



Un aspecto importante en el diseño de un modelo de pronóstico de la probabilidad de ocurrencia de fuegos causados por rayos estriba en el rango temporal de operatividad, pudiendo distinguirse entre aproximaciones a corto y a largo plazo. El objetivo de estimar el riesgo de incendio con una resolución diaria, por ejemplo, requerirá la inclusión de factores cambiantes, principalmente meteorológicos y ambientales, mientras que para escenarios más duraderos prevalecerán aquellas magnitudes más estables en el tiempo, como las topográficas, la naturaleza de la vegetación o los rasgos climáticos. Los modelos a largo plazo son los más adecuados para identificar patrones espaciales de riesgo, con posible importancia en el diseño de planes de prevención y planificación de la lucha contra los incendios forestales. Por el contrario, el corto plazo se ajusta más a la toma de decisiones inmediatas, como la distribución de medios, gestión de alertas y priorización de actuaciones.

Entre los trabajos de modelización el ajuste recae preferentemente sobre la altitud, porcentajes de rayos y número de tormentas secas como los principales covariables de pronóstico.

### Modelos de regresión lineal.

Los modelos de regresión lineal son herramientas flexibles para formalizar y cuantificar relaciones entre variables. La variable de interés  $Y$ , referida como variable respuesta, se formula e interpreta a través de la relación con una colección de variables (covariables o predictores o variables independientes)  $Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n$ . Todas ellas, la variable independiente y/o los predictores pueden ser continuas o discretas o una mezcla de ambas.

En el modelo simple de regresión lineal la dependencia se establece a través de los coeficientes de la expresión

$$Y(Z_j) = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i Z_i$$

Los modelos de regresión pueden utilizarse para representar procesos espaciales si la variable respuesta y covariables tienen una representación sobre una rejilla regular sobre el terreno, con lo que se dispondrá de una ecuación de ajuste para cada celda de la malla.

Los modelos de regresión se utilizan para predecir el resultado que se obtendría de la variable respuesta a partir de las observaciones concretas de las covariables.

Muchos sistemas naturales tienen un comportamiento binario, de manera que adoptan uno de dos estadios posibles (por ejemplo, presencia o ausencia de alguna característica). En estos casos la regresión logística es el modelo de regresión habitualmente utilizado para ajustar el comportamiento del sistema en función de las variables dependientes, y los más frecuentemente utilizados en los trabajos de modelización de los procesos desencadenantes de incendios forestales (con origen o no en rayos), en tanto que la variable respuesta de interés es de tipo alternativo.

Una variable con una respuesta binaria responde a una distribución de Bernoulli, que viene gobernada por un único parámetro ( $p$ ) que es la probabilidad de que se produzca el suceso ( $Y=1$ ). Es por ello que los modelos de regresión para realidades binarias (del tipo existe/no existe) abordan realmente la probabilidad de que se produzca el suceso cierto  $P(Y=1)$ , dado un cierto conjunto de valores para las covariables ( $Z \equiv [Z_i]$ ). La expresión del modelo de correlación toma aquí la forma de la siguiente expresión:

$$Y = P(Z) = \frac{\exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i Z_i)}{1 + \exp(\beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i Z_i)} = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_0 - \sum_{i=1}^n \beta_i Z_i)}$$

De la que se desprende que para cualquier valor de las covariables resultará en un resultado de la variable independiente que recorre el intervalo (0,1), con lo que se interpreta directamente como una probabilidad.

El análisis de regresión logística se ha utilizado ampliamente tanto para predecir como para explicar incendios causados por humanos y/o rayos mediante la integración de variables geofísicas, ambientales o socioeconómicas (por ejemplo, aquellas relacionadas con la topografía, la vegetación, los usos de la tierra, el clima y las condiciones meteorológicas, parámetros medioambientales, índices de riesgo de incendio, factores humanos, etc.) con relación a la ocurrencia de incendios observada.

Un punto importante en la utilización de los modelos es la validación de los ajustes, que no solamente se reduce a valorar la fineza con la que la variable control simulada se desvía del valor efectivamente ocurrido, ya que es posible disponer de modelos bien ajustados a los datos de partida, pero con poco poder predictivo.



## MATERIALES Y MÉTODOS.

### Fuentes de Información.

En el trabajo se han utilizado diferentes fuentes de información, con diferente origen según la naturaleza de los datos, que se sucintan en los siguientes grandes grupos.

#### Incendios Forestales.

Información estadística y cartográfica:

- Estadísticas incendios, periodo 1968-2018.
- Estadística oficial de incendios causados por rayos, periodo 2000-2019. Información facilitada por la D. G. Prevención para la redacción de este informe.
- Cartografía de incendios, periodo 1993-2019. En la Comunitat Valenciana se dispone de información cartográfica con el perímetro de los incendios desde 1993, aunque la localización de los puntos de ignición únicamente está registrada a partir del año 2001.
- Del año 2016 al 2019, los datos sobre incendios forestales son provisionales.

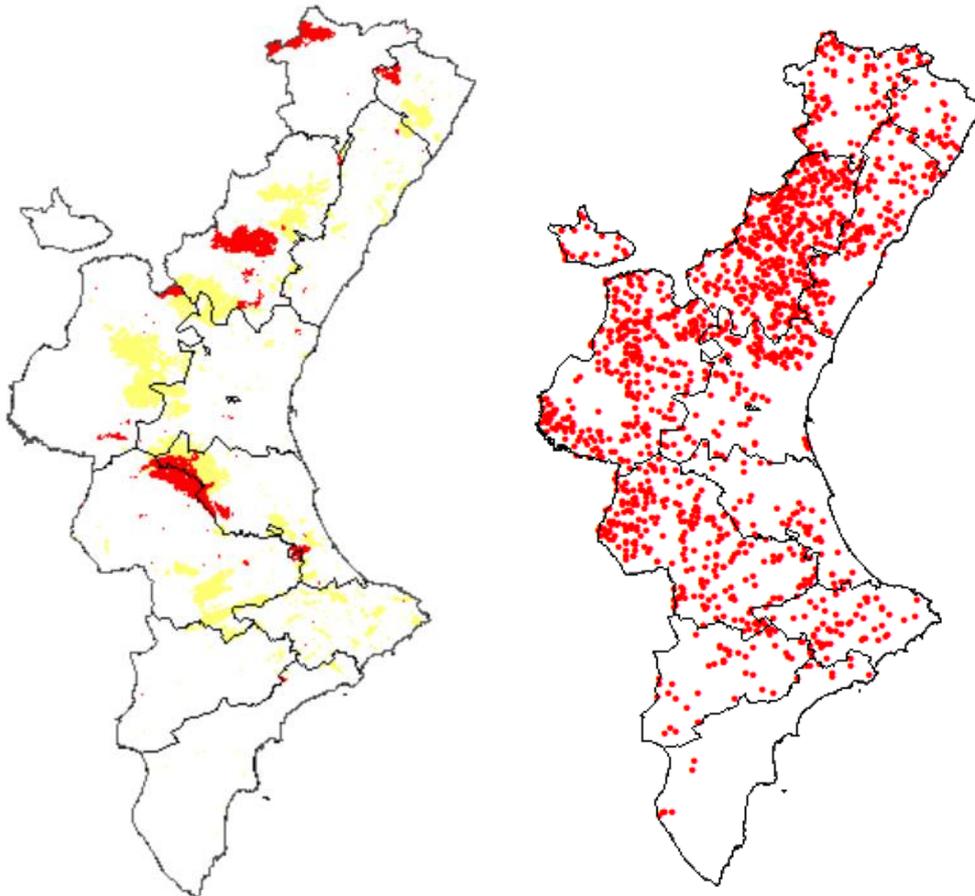


Figura 01. Cartografía de incendios. Izquierda: incendios del periodo 1993-2018; en este periodo hay registrados 2.540 causados por rayos: amarillo incendios no rayos, rojo incendios rayos. Derecha puntos de ignición de los incendios causados por rayos en el periodo 2001-2018 (1.604 incendios).



## Rayos.

La información disponible de rayos se puede agrupar por periodos anuales:

- 2002-2007 información con el número de rayos por cuadrícula, en una malla irregular de 4.3 km de ancho por 3.3 o 2.3 km de alto.
- 2008: datos diarios por provincias. Falta marzo, junio, julio y diciembre.
- 2009-2010. Coordenadas de los rayos, fecha y hora de cada rayo
- Periodo 2011-2019. La información disponible, además de la fecha y localización, es la intensidad y signo de la descarga. Todos los rayos se corresponden a una descarga simple (stroke) (valor STR = 0). Sólo hay 219 rayos entre nubes, el resto nube-suelo.

## Variables Cartográficas.

La información cartográfica utilizada en el estudio ha sido, básicamente, los perímetros de los incendios (1993-2019), el Modelo digital de elevaciones y el Mapa de modelos de combustible de la Comunitat Valenciana 2019. Además, esta información se ha completado con los parámetros meteorológicos (temperatura, humedad, precipitación, viento) que también se han georreferenciado, al igual que los puntos de ignición.

En el apartado de resultados se han realizado diversos mapas con la concentración de rayos, distribución de probabilidades, y relaciones con las variables ambientales.

## Variables Ambientales.

La base de datos sobre ocurrencia de rayos en la Comunitat Valenciana se acompañó de medidas de diferentes parámetros meteorológicos de distinta naturaleza y procedencia, cuyo análisis conjunto es objeto del capítulo siguiente del informe. En todos los casos la compilación documental cubrió el periodo de trabajo, entre los años 2011 y 2018 inclusive. Aunque los valores de las descargas eléctricas se documentan con una elevada resolución temporal, los factores ambientales se incorporaron con una resolución diaria. Se describe brevemente cada una de dichas magnitudes y la caracterización de los valores adjuntados a los registros anteriores.

- Temperatura ambiente. Se procesaron las medidas de temperatura máxima y mínima diaria procedentes de la red de estaciones principales de AEMET, con un total de 157 emplazamientos de medición a lo largo del territorio de la Comunidad Valenciana.
- Humedad Relativa. Se procesaron las medidas de temperatura máxima y mínima diaria procedentes de la red de estaciones principales de AEMET, con un total de 44 emplazamientos de medición a lo largo del territorio de la Comunidad Valenciana.
- Velocidad y dirección. Se procesaron las medidas de temperatura máxima y mínima diaria procedentes de la red de estaciones principales de AEMET, con un total de 38 emplazamientos.
- Precipitación. Las medidas de precipitación diaria proceden de la red de estaciones principales de AEMET, con un total de 137 emplazamientos.
- Condiciones atmosféricas en altura. La incorporación del estado de la atmósfera se realizó a partir de las medidas del sondeo aerológico que se realiza rutinariamente por AEMET en la provincia de Murcia (código internacional de referencia del nodo de la red 08430, situado en las coordenadas -1.1708, 38.0019), a cuyos datos se accedió a través del archivo IGRA (Integrated Global Radiosonde Archive) para el periodo 2011/2018. Disponiéndose normalmente de dos perfiles diarios, a las cero y a las doce horas (en ocasiones también en las intermedias, 06 y 18 UTC), se obtuvieron las correspondientes series temporales de temperaturas a 850 y 500 mb y de punto en el primero de los niveles solo para el sondeo del mediodía, por tener la mayor cobertura de medidas.

La localización de los emplazamientos de las distintas variables, que difieren en cobertura según el tipo de magnitud, se muestra en los mapas de los apartados siguientes en los que se analizan los valores experimentales.



### Contexto de los Incendios Forestales.

En el periodo 1968-2018 en la Comunitat Valenciana hay registrados 20.960 incendios forestales que han quemado un total de 797.946 ha. Durante este periodo, se dispone de información de la superficie afectada por cada incendio, así como de las causas que lo han producido. Durante este periodo hay registrados 3.391 incendios originados por rayos con un total de 140.610 ha quemadas. En porcentajes, los incendios originados por rayos suponen el 16.17% del total de incendios (21.0% si sólo se consideran los incendios de causa conocida) y el 17.6% de la superficie quemada en el periodo (24.8% si sólo se consideran los de causa conocida).

En el período histórico, únicamente en los años 1985, 2001, 2017 y 2018 la superficie anual quemada por incendios originados por rayos fue superior a la de causas no naturales; en cuanto al total de siniestros, en todos los años de la serie el número de incendios causados por rayos es inferior al de causas no naturales. Por meses, los rayos son la causa que ha originado una mayor superficie quemada (acumulada) en el mes de julio; durante este mes se quema más del 80% de la superficie total quemada por rayos, aunque agosto es el mes con mayor número de siniestros por esta causa con 972 incendios, frente a 887 en el mes de julio. Entre julio y agosto se registran más del 50% de los siniestros por rayos, porcentaje que se incrementa hasta más del 86% en el periodo comprendido entre junio y septiembre, lo que representa el 99% de la superficie quemada por esta causa.

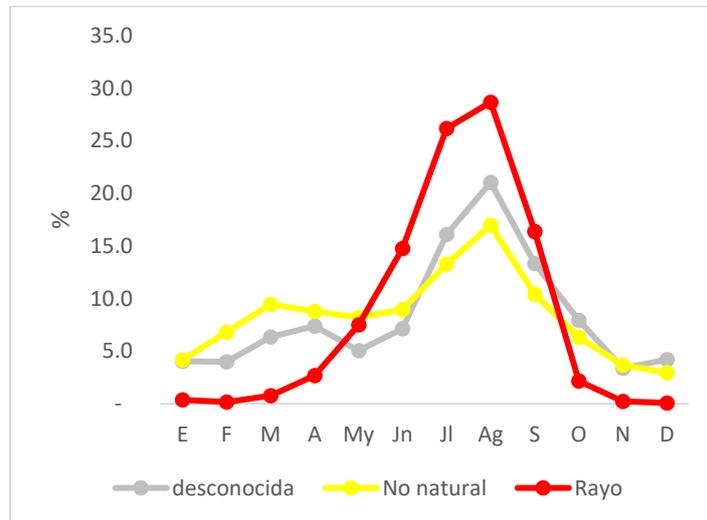


Figura 02. Distribución mensual (%) según causa de incendios en la Comunitat Valenciana. Periodo 1968-2018.

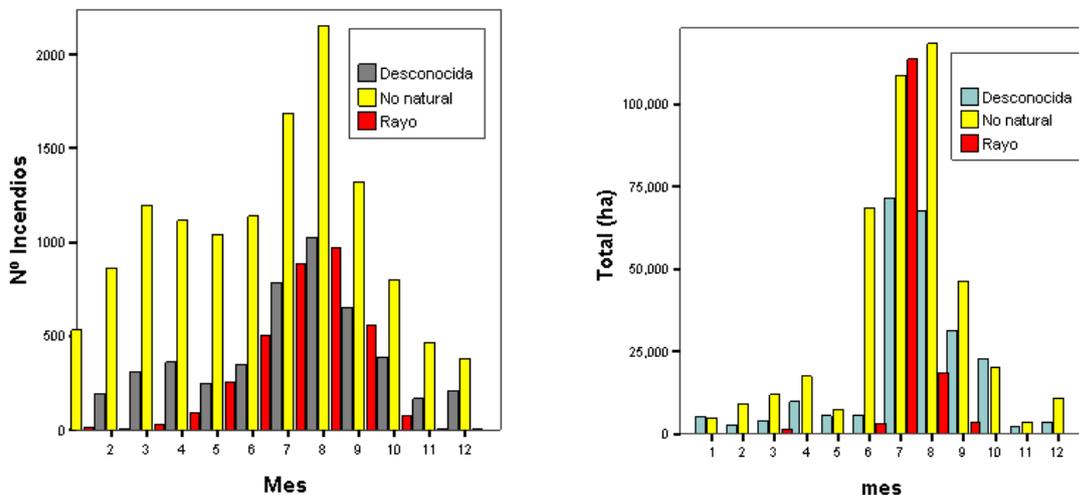


Figura 03. Distribución mensual del número de incendios en la Comunitat Valenciana y de la superficie quemada según la causa de aquellos. Periodo 1968-2018

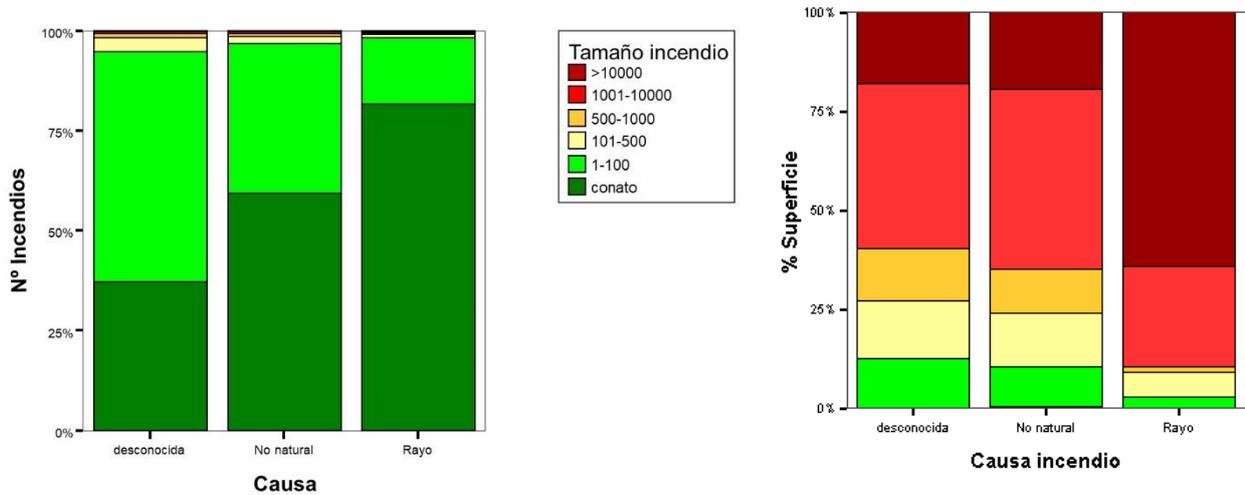


Figura 04. Importancia relativa del número de incendios en la Comunitat Valenciana, según tamaño y causa, y del % de superficie afectada según el origen y tamaño del fuego. Periodo 1968-2018

Por tamaño del incendio, en los originados por rayo dominan claramente los conatos ya que representan más del 81%, porcentaje muy superior a los de causa no natural (59%). Por superficie afectada, dominan los incendios mayores de 1.000 ha: 83 incendios representan el 89% de la superficie quemada, pero los 5 incendios mayores a 10.000 ya representan el 65%

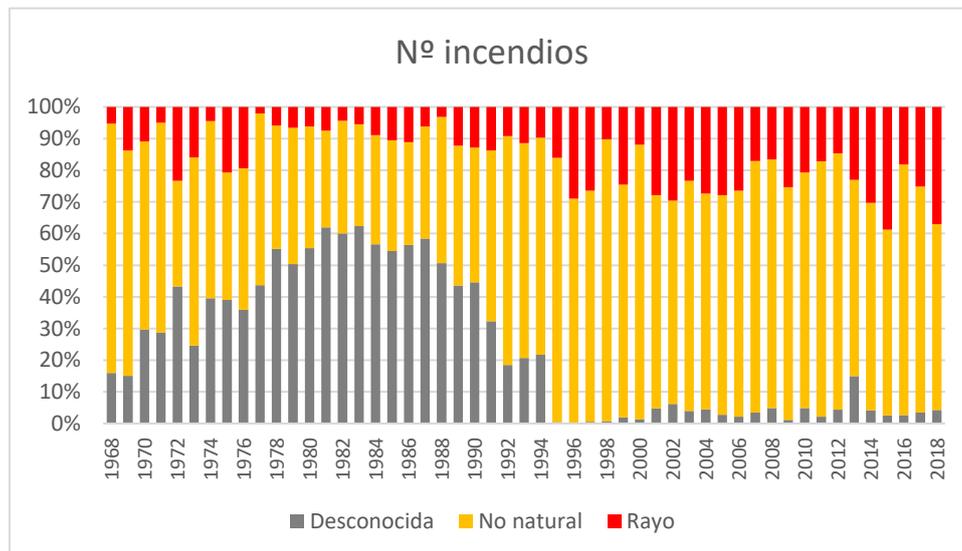


Figura 05. Evolución anual porcentual del número de incendios en la Comunitat Valenciana según la causa del origen. Periodo 1968-2018

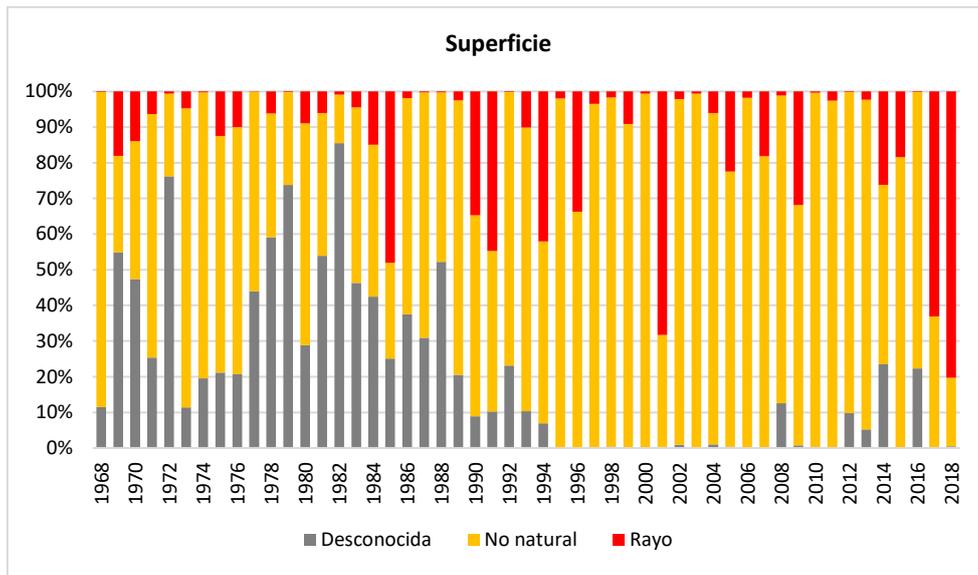


Figura 06. Evolución anual porcentual de la superficie quemada en la Comunitat Valenciana según la causa del incendio. Periodo 1968-2018

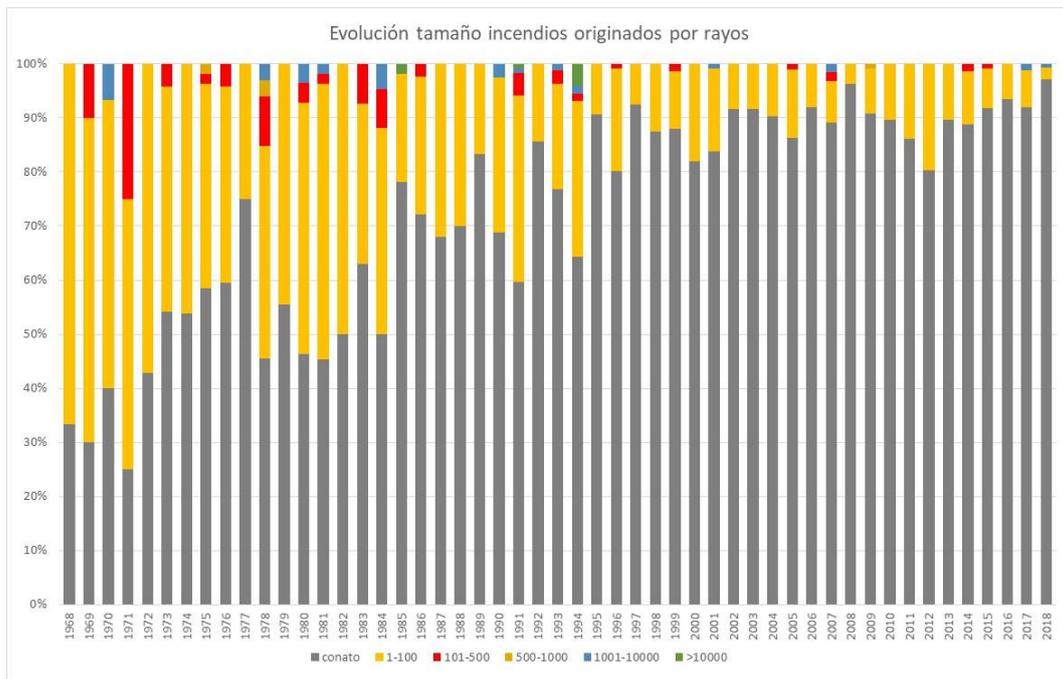


Figura 07. Evolución anual porcentual del tamaño de los incendios originados por rayos en la Comunitat Valenciana. Periodo 1968-2018

Durante el periodo histórico, la evolución de la superficie y el nº de incendios ha variado de forma significativa. Así, los avances técnicos en extinción han favorecido que el porcentaje de conatos haya ido incrementándose paulatinamente. Igualmente, los avances en la investigación de causas han propiciado que las casusas desconocidas hayan descendido desde los años 90. En este último periodo las causas no naturales pasan a ser claramente dominantes.



El número de incendios por rayos se han mantenido con variaciones a lo largo de los años, así, destacan 1968, 1971, 1972 y 1977, con menos de 10 incendios frente a los 191 incendios en 2005 y 151 durante 2014. De los 51 años incluidos en la serie estadística, en 17 años el porcentaje de incendios por rayos supera al 25% del total de casusas conocidas, de ellos 10 son con posterioridad al año 2000. En 2014, 2015 y 2018 los incendios originados por rayos representan más del 30% del total.

## Incendios Causados por Rayos.

Para analizar la relación del punto de ignición con la caída de rayos es necesario conocer las coordenadas del punto de ignición de cada incendio. Esta información sólo está disponible a partir del año 2001, por lo cual el periodo de estudio se tiene que limitar al periodo 2001-2019. Para este periodo, hay un total de 1.955 incendios originados por rayos, 46 de estos incendios son del año 2019 y son datos provisionales. Para el análisis se han descartado los incendios cuyas coordenadas del punto de ignición se consideran erróneas (305 incendios) y los del año 2019 (provisionales). Se incluyen: 1.241 incendios con causa confirmada, 75 con causa supuesta, 288 con causa en blanco (años 2016, 2017 y 2018). En total se consideran 1.604 incendios originados por rayos. pertenecientes al periodo 2001-2018.

En función de la información contenida en los partes de incendios, se pueden comparar las condiciones en las que se producen los incendios originados por rayos frente a los originados por causas no naturales (excluidos los incendios de causa desconocida o por reproducción), siempre con el condicionante de la representatividad del valor consignado respecto a las condiciones en las que se desencadena/inicia el incendio.

Durante los meses estivales, los incendios causados por rayos presentan una temperatura máxima y velocidad del viento inferior a los originados por causas no naturales, por el contrario, la humedad relativa es ligeramente superior a los incendios por otras causas. Por tanto, de acuerdo al mero análisis de la información de los partes, parecería que las condiciones en las que se desencadenan y propagan este tipo de incendios son menos extremas que en el resto de los incendios.

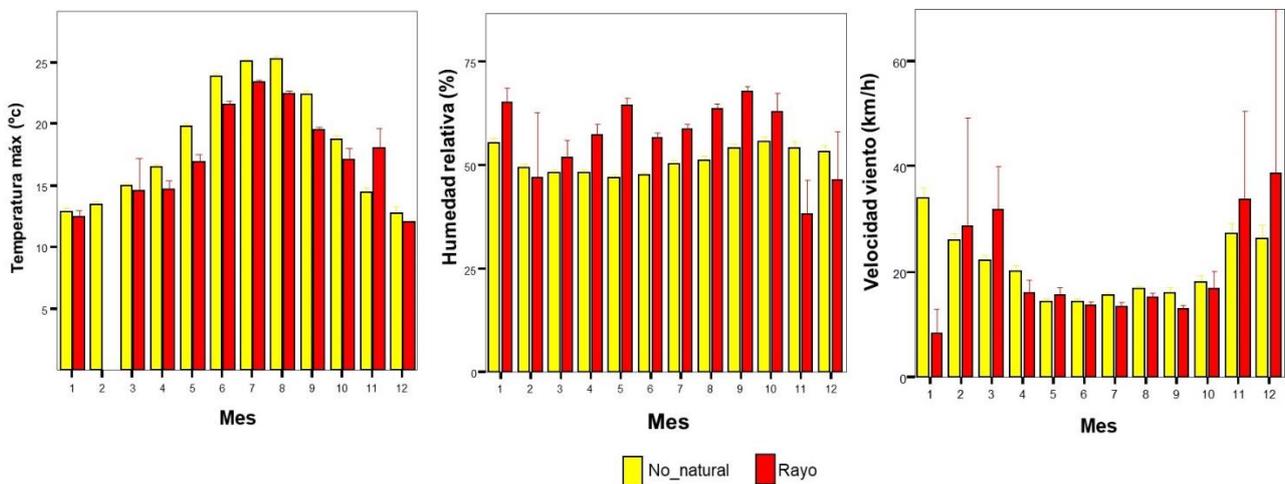


Figura 08. Variación mensual de las condiciones ambientales registradas en los partes de incendios, según su causa (no natural/rayo) en la Comunitat Valenciana. Periodo 2001-2018.

La menor incidencia de situaciones extremas se manifiesta en unos bajos niveles de alerta. Así, en los meses de verano, sólo un bajo porcentaje de incendios (inferior al 20%) se desencadena en situaciones de alarma o alarma extrema. La mayoría tienen lugar en situaciones de prealerta.

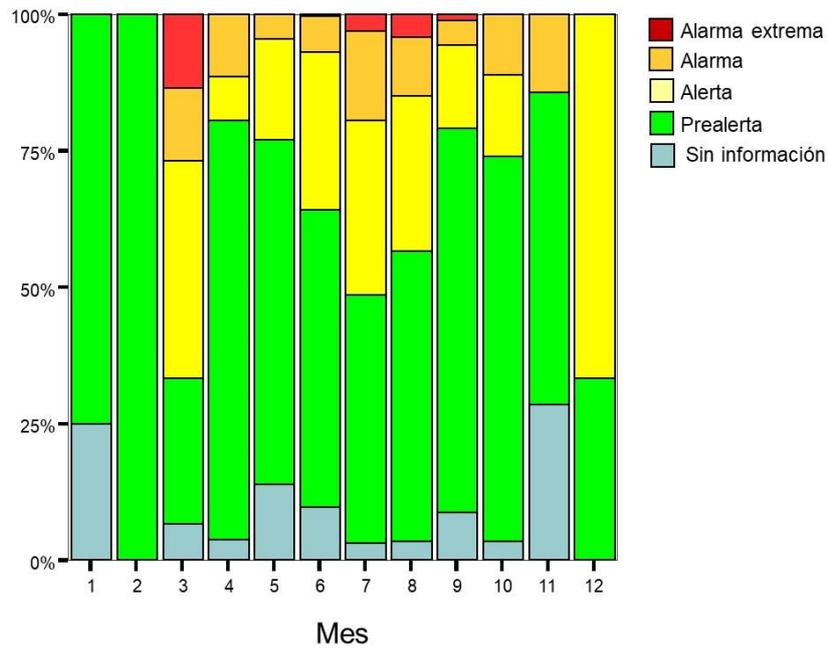


Figura 09. Variación porcentual mensual de los incendios en la Comunitat Valenciana según su nivel de alerta. Periodo 2001-2018

Analizando la época del año, los incendios causados por rayos se concentran principalmente en los meses de verano y en la franja horaria de media tarde.

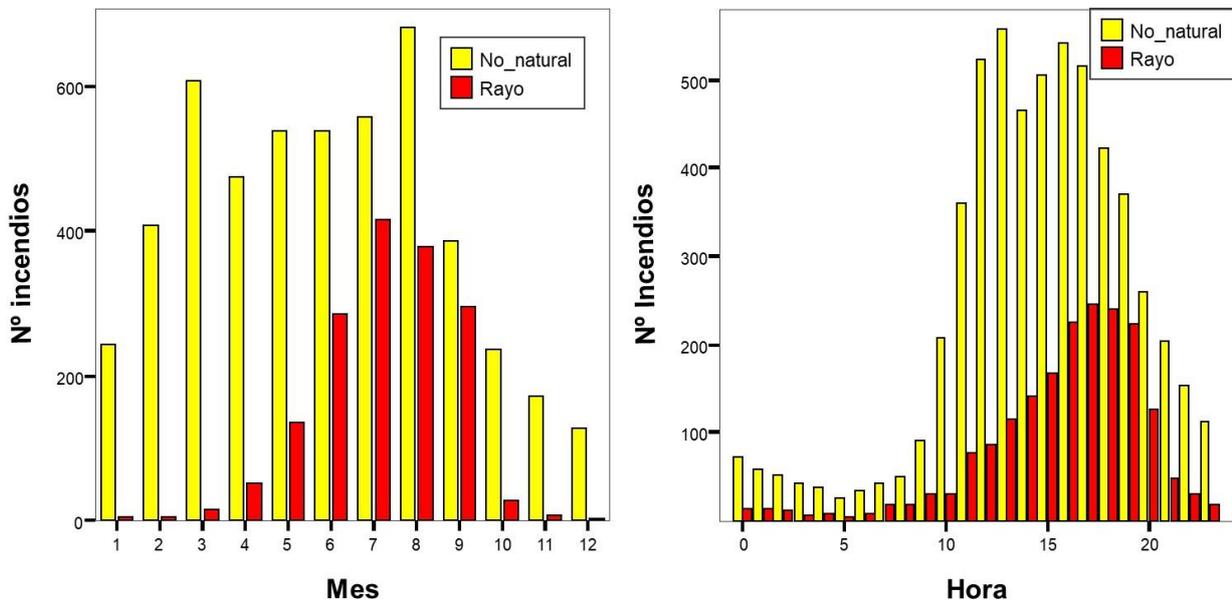


Figura 10. Variación mensual/horaria del número de incendios en la Comunitat Valenciana según su origen. Periodo 2001-2018



En cuanto a las condiciones de relieve, los incendios originados por rayos se registran principalmente en un rango de altitud comprendido entre 500-1000m, en zonas relativamente llanas (pendiente inferior a 15 grados) y sin presentar claras preferencias por la orientación solana o umbría.

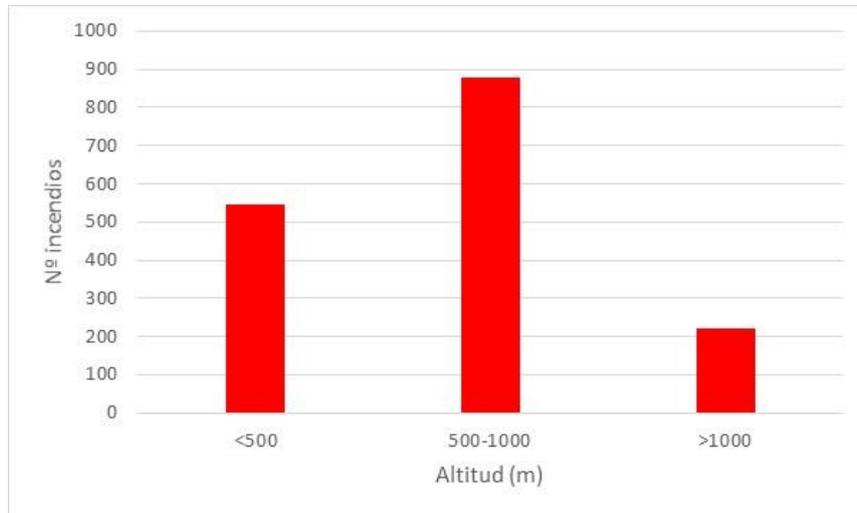


Figura 11. Distribución del número de incendios causados por rayos en la Comunitat Valenciana según las características orográficas del punto de ignición. Periodo 2001-2018

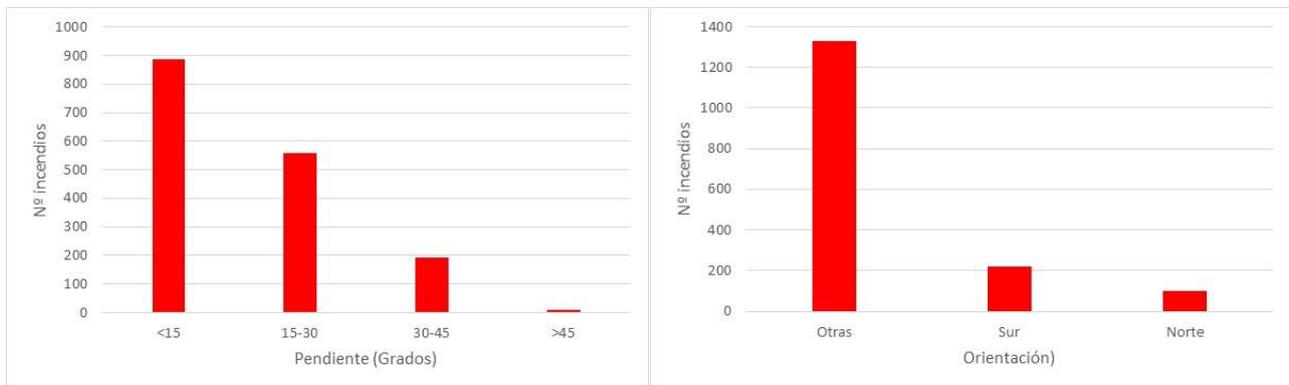


Figura 12. Distribución de los puntos de ignición de los incendios causados por rayos en la Comunitat Valenciana, en función de la pendiente (grados) y orientación. Periodo 2001-2018

## Factores Ambientales.

Se muestran aquí el resumen gráfico del banco de datos de los factores ambientales locales con los que se trabajó, referidos a las *temperaturas máximas y mínimas* diarias, *humedades relativas*, también máximas y mínimas diarias, *intensidades máximas del viento (velocidad/dirección)*, *precipitaciones* y condiciones de la masa aérea (*estabilidad y humedad*). La información procede de las diferentes redes de sensores operados por AEMET, en el caso de las medidas de superficie y de la base de datos de sondeos aerológicos en la estación de Murcia para las mediciones en altura, en todos los casos con una resolución diaria. En el proceso de análisis de la base de datos de rayos se asignaron a cada descarga aquellos valores de las diferentes magnitudes registrados en las estaciones más próximas. El balance final de los registros ambientales asociados a las descargas eléctricas analizadas en el periodo 2011/2018 se representan en las figuras siguientes.



### Temperatura ambiente.

La temperatura ambiente se presenta como una característica de las condiciones ambientales, más o menos propicias a la ocurrencia de actividad eléctrica, con la consecuente posibilidad de una ignición, más que como un factor directamente contribuyente a los procesos (indirectamente a través del estado del combustible). Con los valores extremos se caracterizan las condiciones térmicas generales de la jornada, más allá de las específicamente reinantes en el momento de la descarga, fuertemente dependientes de la hora del suceso.

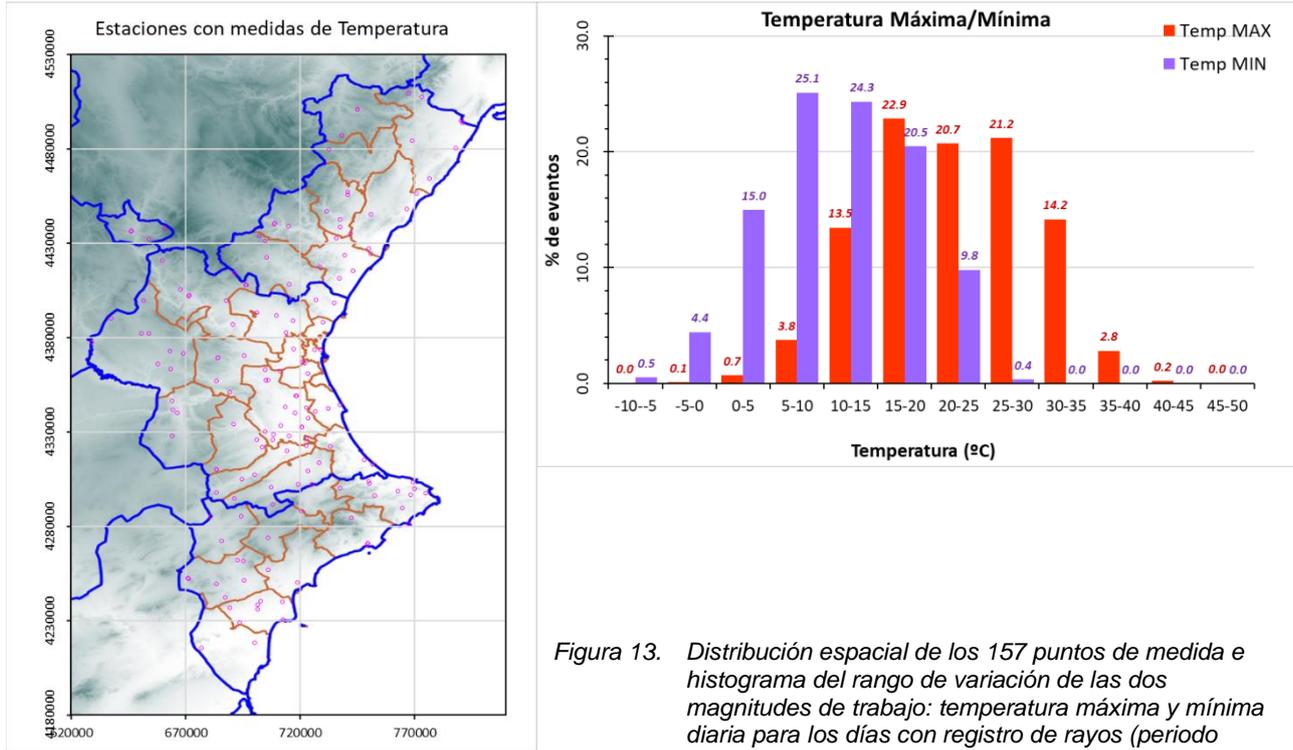


Figura 13. Distribución espacial de los 157 puntos de medida e histograma del rango de variación de las dos magnitudes de trabajo: temperatura máxima y mínima diaria para los días con registro de rayos (periodo 2011-2018).



### Humedad Relativa.

Con los valores extremos diarios de la humedad relativa muestran un comportamiento diferenciado respecto al caso de la temperatura, parámetro del que es fuertemente dependiente. Las distribuciones de los valores mínimos presentan una forma acampanada, mientras que los máximos presentan valores crecientes, reflejando principalmente condiciones nocturnas en las que la caída térmica aproxima el estado de la atmósfera a las proximidades de la saturación.

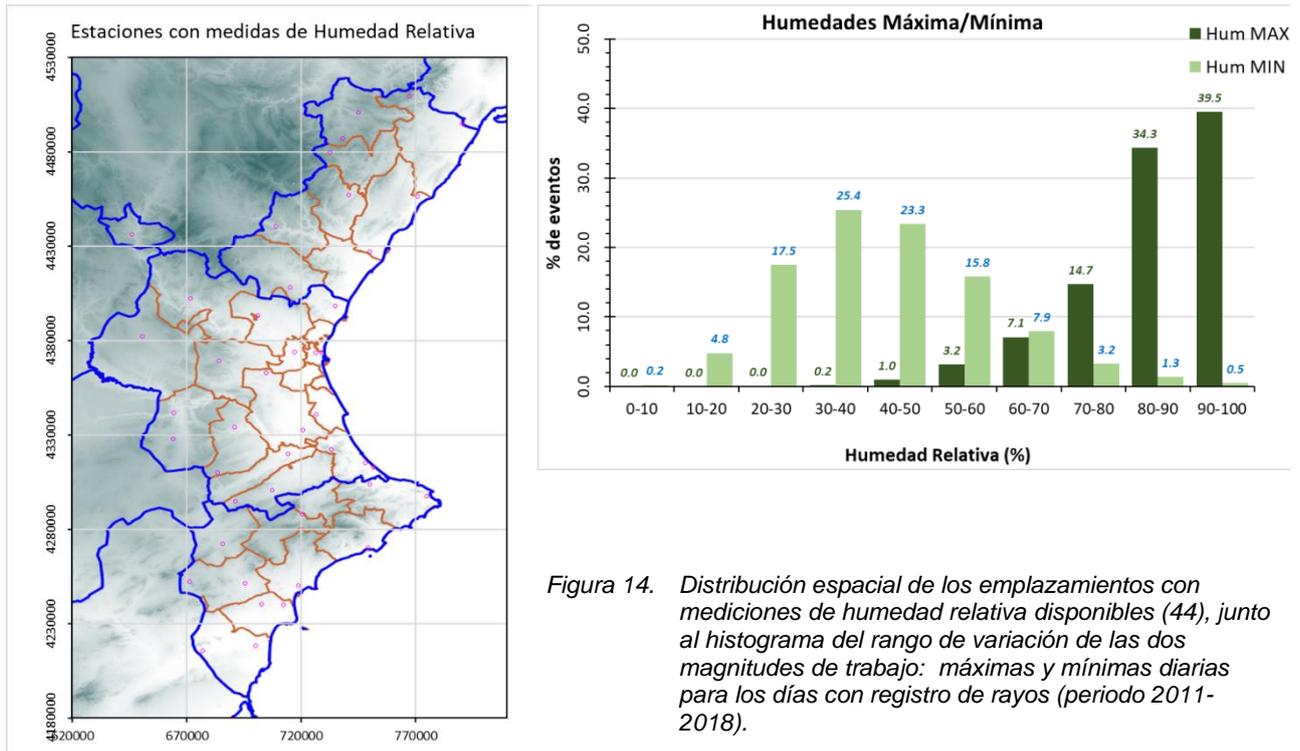


Figura 14. Distribución espacial de los emplazamientos con mediciones de humedad relativa disponibles (44), junto al histograma del rango de variación de las dos magnitudes de trabajo: máximas y mínimas diarias para los días con registro de rayos (periodo 2011-2018).



### Velocidad y dirección.

El viento es un factor potencialmente importante en el inicio de una ignición y, especialmente, la posibilidad de que acabe desembocando en un fuego superficial. De nuevo se dispone de valores máximos diarios de la velocidad que permiten caracterizar la jornada como más o menos ventosa en general. La posibilidad de disponer de medidas más próximas en el tiempo y el espacio al momento y lugar del impacto implicaría gestionar una profusa información a partir de los registros en continuo de las estaciones meteorológicas disponibles, lo que supone una importante fuente de incertidumbre al requerir extrapolar mediciones alejadas en una orografía compleja. Por ello se ha valorado la utilización de la racha máxima en el punto más próximo al rayo como elemento de caracterización del régimen del viento.

En el mismo sentido se ha utilizado en el análisis la dirección asociada a la racha máxima, con el mismo criterio. La propia naturaleza de la dirección y la variabilidad habitual de los registros hace que en ocasiones la medida puntual en un instante no represente bien las condiciones de advección preponderantes. El valor asociado de la procedencia de la masa aérea para las velocidades más altas suele representar la circulación más importante (asunción claramente cuestionable en un régimen alternante de brisas, por ejemplo).

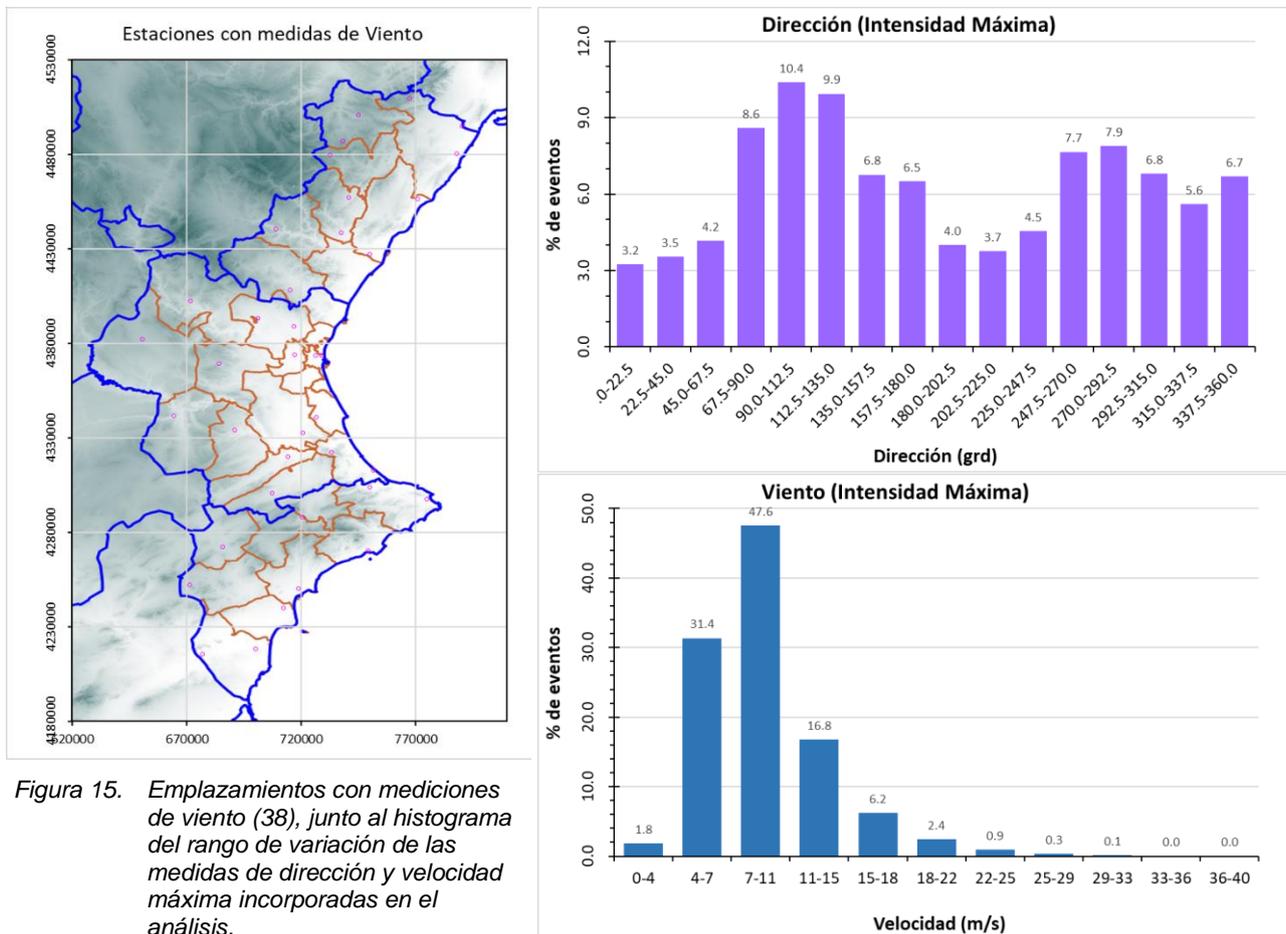


Figura 15. Emplazamientos con mediciones de viento (38), junto al histograma del rango de variación de las medidas de dirección y velocidad máxima incorporadas en el análisis.



### Precipitación.

La lluvia es un factor potencial de importancia en el origen de los incendios debido a rayos. Su papel es ambivalente, en tanto mucha de la actividad eléctrica se produce en un contexto de fuertes desarrollos tormentosos, en los que se frecuente la ocurrencia de precipitaciones que humedecen el combustible. La clave suele residir en la ocurrencia de tormentas secas, aquellas que se desarrollan con aparato eléctrico, pero sin lluvia. De nuevo se ha recurrido a los registros diarios de precipitación, asociados a la jornada en la que se registra la descarga. La mayor limitación en este contexto se refiere a la extrapolación de los valores disponibles que, aunque sobre una red notablemente densa, en la mayor parte de los casos no se sitúan en las inmediaciones del rayo.

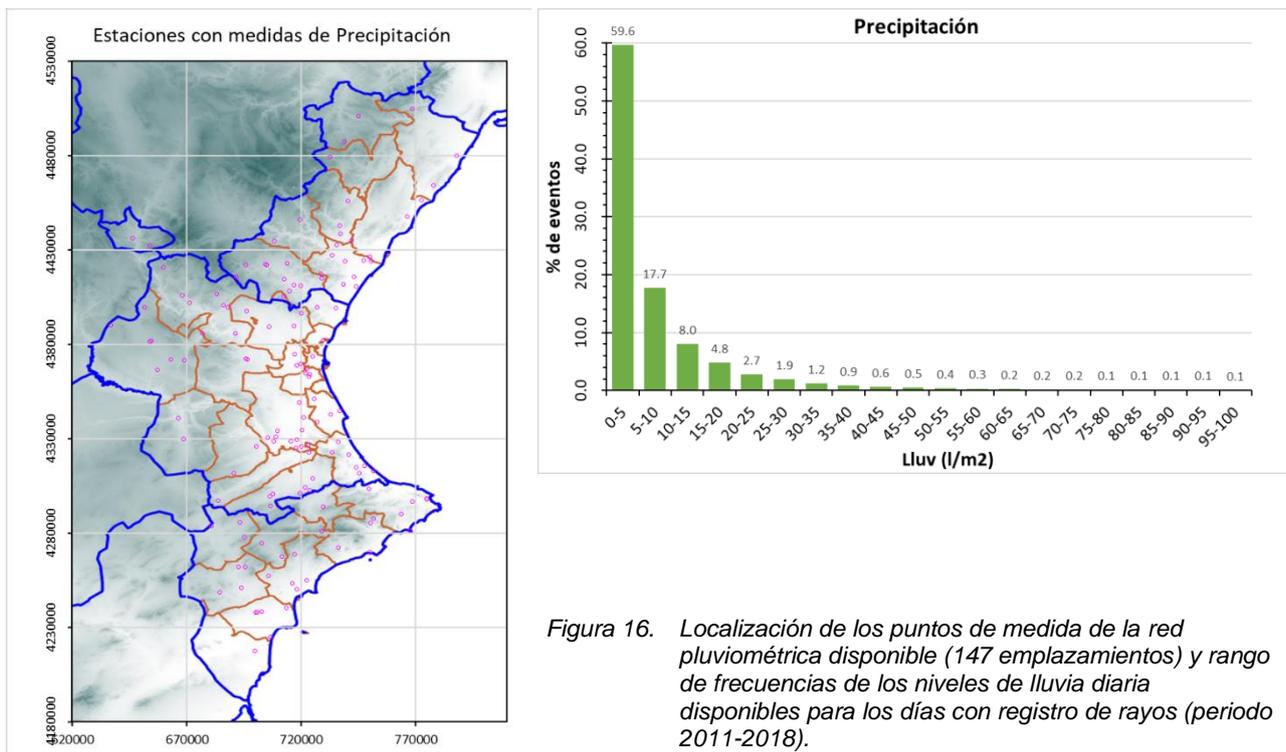


Figura 16. Localización de los puntos de medida de la red pluviométrica disponible (147 emplazamientos) y rango de frecuencias de los niveles de lluvia diaria disponibles para los días con registro de rayos (periodo 2011-2018).



### Condiciones atmosféricas en altura.

Un factor habitualmente incluido en los estudios sobre la descarga de rayos (y su relación con la ocurrencia de incendios forestales) se refiere a las condiciones de la masa aérea en la que se desarrollan los fenómenos eléctricos. El valor de la diferencia de temperaturas entre los niveles de 850 y 500 mb reflejan el grado de inestabilidad potencial de la masa aérea de manera que, cuanto mayor sea la diferencia, cabría esperar una actividad convectiva más intensa. El parámetro denominado como anomalía del punto de rocío a 850 mb representa la diferencia entre la temperatura seca y el punto de rocío en dicho nivel; siendo este último una medida de la humedad de la masa de aire, con valores inferiores a la temperatura normal (la situación en que coinciden corresponde a la saturación), su magnitud refleja el nivel de sequedad de los estratos superficiales. En general valores altos de la diferencia de temperaturas junto a niveles bajos de la anomalía del punto de rocío representarían condiciones favorables al desarrollo de tormentas secas.

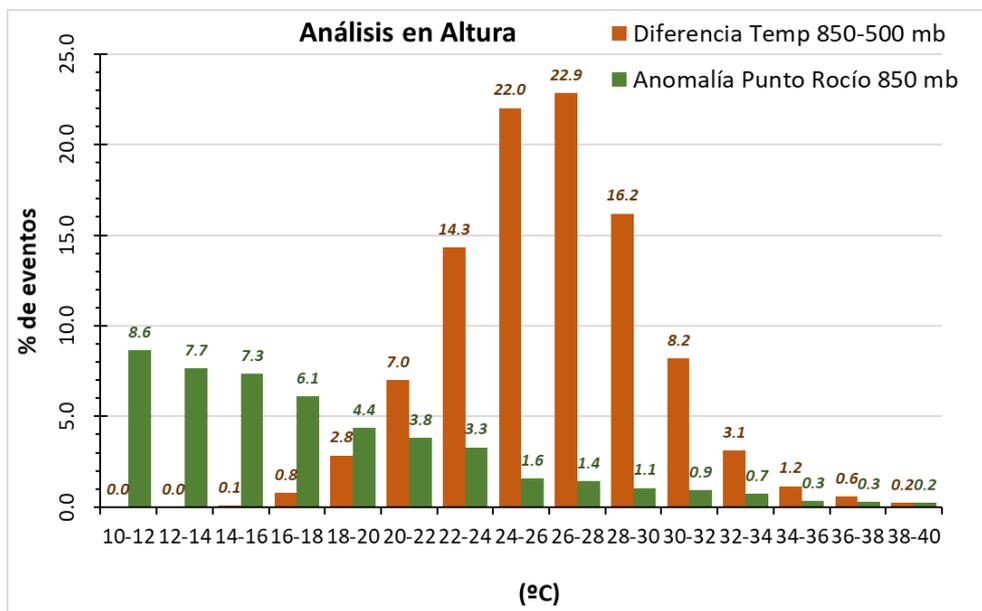


Figura 17. Distribución de los valores de diferencia térmica entre los niveles de 850 y 500 mb y de anomalía del punto de rocío (temperatura seca menos punto de rocío) para el estrato de 850 mb obtenidos para el sondeo aerológico rutinario que se realiza en Murcia.



## EXPLOTACIÓN DEL BANCO DE DATOS HISTÓRICO.

### Análisis de la Base de Datos de Rayos.

La base de datos de rayos cubre el periodo 2002-2019 y contiene un total de 1.203.839 registros, de ellos 482.359 están dentro de los límites de la Comunitat Valenciana y sobre terreno forestal (ampliado a una zona de influencia de 1 km de anchura).

El promedio anual de rayos caídos en terreno forestal (y zona limítrofe) resultó de 28.374, aunque con importantes variaciones interanuales. Así en el periodo 2002-2009 el número anual mínimo de rayos se registró en 2002 y 2017 con 7.914 y 9.871 respectivamente. Los años con el máximo de descargas en terreno forestal fueron 2015 con 75.052 y 2018 con 68.585 rayos.

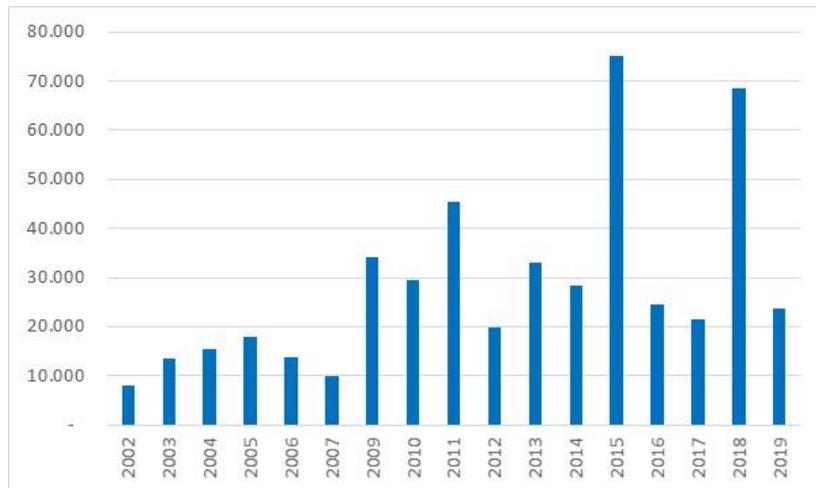


Figura 18. Serie anual del número de descargas eléctricas sobre terreno forestal en la Comunitat Valenciana.

En cuanto a las características físicas de los rayos (información disponible únicamente a partir de 2011), el número de descargas es mayoritariamente de carga negativa.

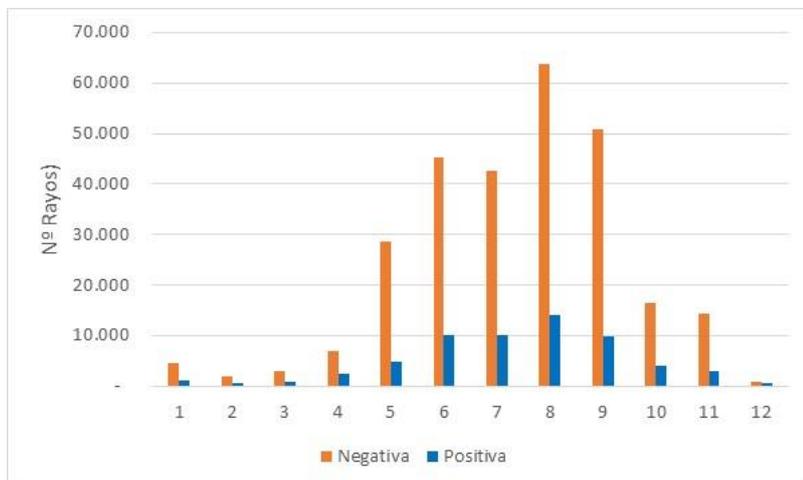


Figura 19. Distribución mensual de la polaridad de las descargas según su intensidad (valores promedio periodo del periodo 2011-2019).



Al igual que con variabilidad interanual, también hay importantes diferencias en la localización de los rayos, con una mayor incidencia en el extremo noreste de la Comunitat, con importantes zonas de concentración en toda la provincia de Castellón y en algunas zonas del interior y costa de la provincia de Valencia. Sin embargo, esta concentración espacial de rayos no se corresponde plenamente con la distribución espacial de incendios originados por rayos, los cuales están más distribuidos por toda la superficie forestal de la Comunitat.

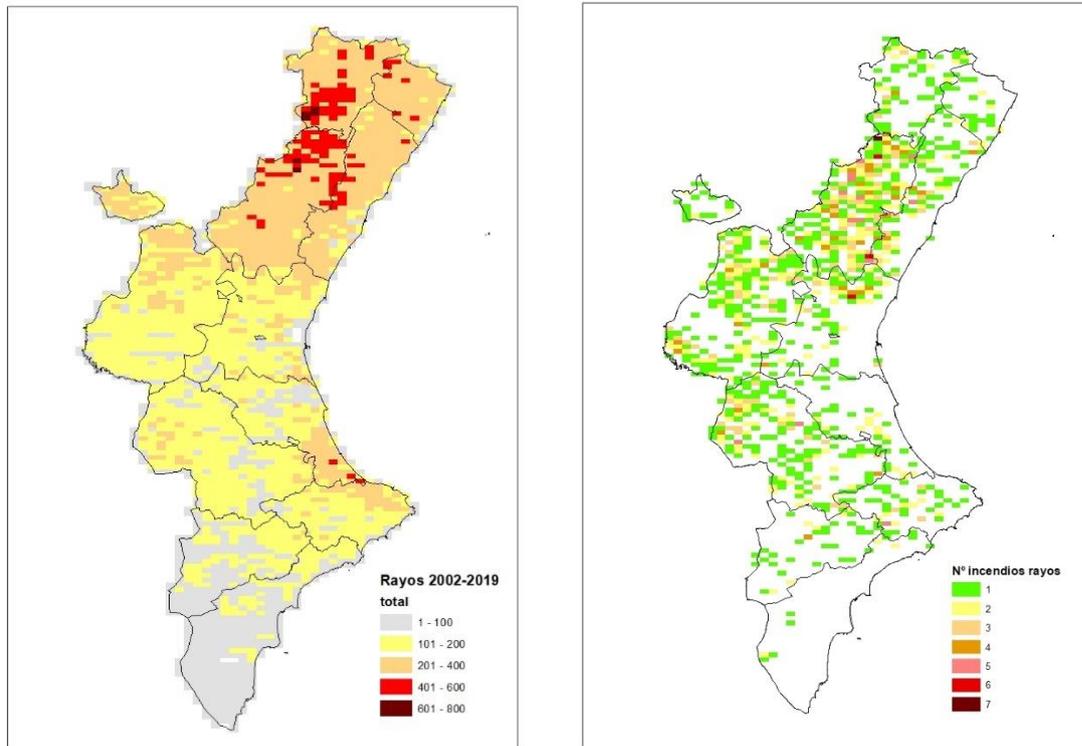


Figura 20. Distribución del número total de rayos en cada cuadrícula (periodo 2002-2018) y del número de incendios originados por rayos en el mismo intervalo.

En el periodo 2002-2019, hay 2.300 días con rayos registrados en suelo forestal (35% del total de los días). El máximo de nº de rayos el mismo día se registra el 23/9/2016, con 8.915 rayos. Hay 6 días con más de 5.000 rayos, 130 días con más de 1000 rayos, 1.834 días con 999-2 rayos y 349 días con un solo rayo en todo el terreno forestal de la C.V.

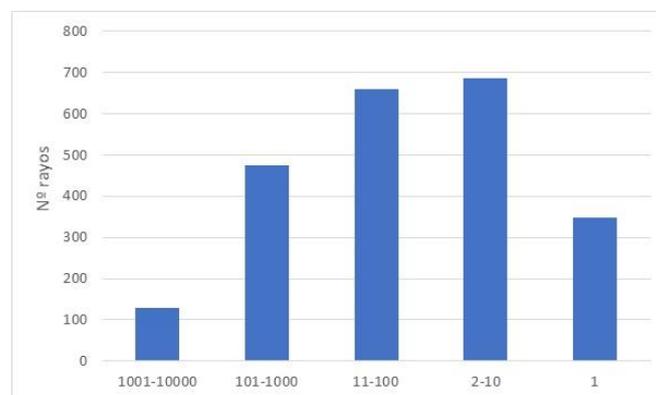


Figura 21. Distribución del número de rayos caídos en un mismo día en el territorio de la Comunitat. Periodo 2002-2019



Desde 2002, hay 723 días con incendios registrados por rayos, pero únicamente en 491 días con incendios por rayos coincide que haya rayos registrados.

Tabla 01. Días con el mayor número de rayos en terreno forestal y el correspondiente número de igniciones (periodo 2002-2019).

Día	Nº rayos	Nº Incendios
23/09/2016	9.150	7
31/07/2015	8.576	2
28/08/2013	7.850	3
26/08/2013	7.399	1
27/08/2019	7.092	2
30/07/2015	6.002	5
14/09/2007	5.430	10
16/08/2018	5.403	3
14/06/2004	5.308	3
27/09/2009	5.159	0

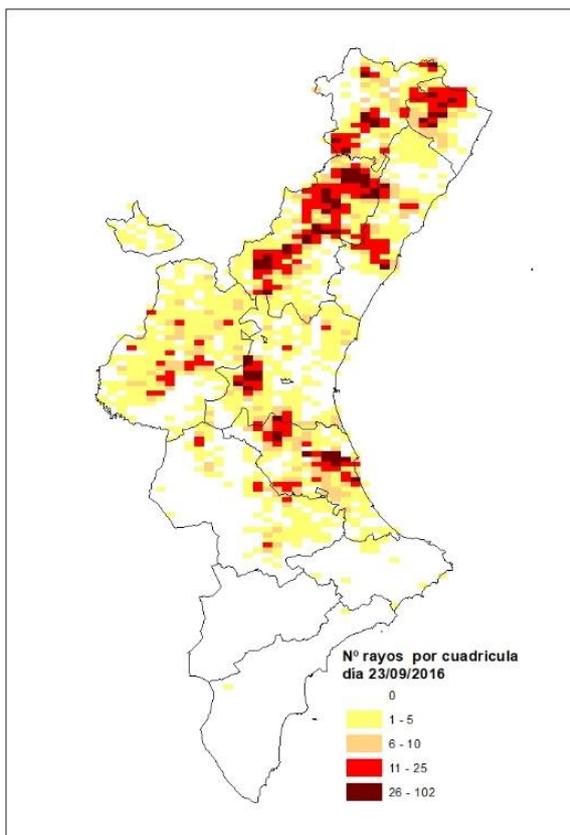


Figura 22. Distribución espacial de los rayos caídos el día con el mayor número registrado en la base de datos.



Tabla 02. Días con el mayor número de igniciones en terreno forestal y el correspondiente número de rayos (periodo 2002-2019).

Día	Nº Rayos	Nº Incendios
22/06/2005	0	21
17/07/2006	0	14
11/09/2006	2.826	13
16/07/2006	2.025	12
18/07/2015	1.204	12
24/09/2016	2	12
08/09/2014	0	12

De la explotación del banco de datos disponibles surgen situaciones difíciles de valorar, que resaltan el grado de incertidumbre que acompaña a la información. Como ejemplo representativo, destacar que en los dos días con más registros de incendios por rayos no hay ningún rayo registrado: 22/06/2005 con 21 incendios y 17/07/2006 con 14 incendios (en este caso el día 16/07/2006 hay registrados 2.025 rayos). Ello refleja la dificultad de asignar a un rayo la causalidad de un incendio, siendo que entre el impacto, la ignición y final fuego en superficie puede distar una considerable distancia, pudiendo diferirse bastantes horas en el tiempo (pudiendo convivir con otras descargas próximas en tiempo y espacio que en realidad no serán causantes físicas del conato).

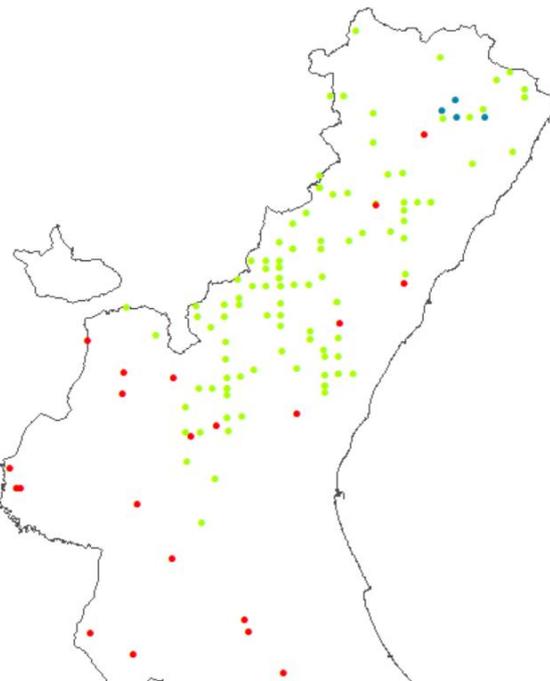


Figura 23. Ejemplo del día 22/06/2005 (máxima simultaneidad de incendios por rayo (21) pero sin rayos asociados. En rojo incendios día 22/06/2005; verde rayos del 01/06/2005, azul rayos 30/06/2005 (para el resto de los días del mes de mayo no hay rayos registrados en terreno forestal).



## Selección de Rayos Asociados a Incendios.

Para analizar los rayos causantes de una ignición, se ha procedido a realizar una asignación en función de la fecha y distancia, aplicando un índice de proximidad (A):

$$A = \left(1 - \frac{T}{72}\right) * \left(1 - \frac{S}{10}\right)$$

donde,

*T*: desfase en horas,

*S*: distancia en km.

El índice se ha calculado para una latencia de 72, 96 y 120 horas (3, 4 y 5 días).

El incremento del periodo de latencia de 72 a 120 horas no incrementa de manera significativa el nº de rayos por incendio, ni el número de incendios a los que se les puede asignar rayos.

Tabla 03. Selección de rayos en función de un valor del índice  $\geq 0$ .

	Indice_72	Indice_96	Indice_120
Nº total rayos a una distancia inferior a 10 km y su correspondencia latencia	52.343	53.459	54.296
Nº incendios con rayos asociados	650	655	668
Nº incendios sin rayos asociados	169	164	151
Promedio rayos/incendio	80.50	79.91	78.35
Promedio índice de proximidad	0.330	0.334	0.342

Aplicando el índice de proximidad de 72 horas, al 20% de los incendios causados por rayos no se podría asignar ningún rayo en un radio inferior a los 5 km.

Tabla 04. Distribución anual del número total de incendios causados por rayos y aquellas sin un registro de descarga eléctrica asociada.

Año	Total Igniciones	Igniciones sin asignación de rayo	%
2011	66	12	18,2
2012	70	11	15,7
2013	77	11	14,3
2014	151	57	37,74
2015	121	5	4,1
2016	62	6	9,7
2017	87	32	36,8
2018	139	12	8,6
2019	46	5	10,8
<b>Total</b>	<b>819</b>	<b>151</b>	<b>18,5</b>

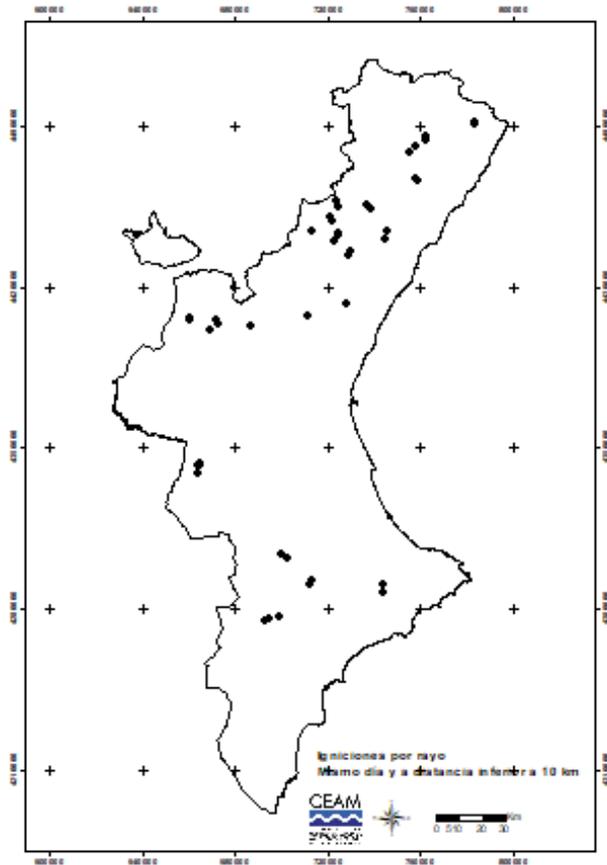


Figura 24. Localización de las ubicaciones en las que un mismo día se localizan varias igniciones próximas.

Por otro lado, hay 51 igniciones originadas el mismo día y a una distancia inferior a 10 km (figura 24). Estas igniciones pueden compartir rayos asignados (¡con lo cual un mismo rayo podría ser causante de dos igniciones!)

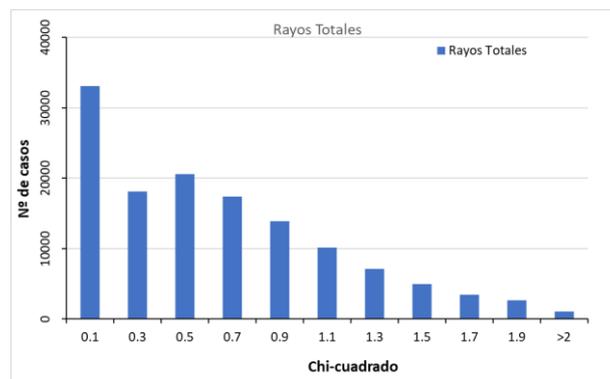


Figura 25. Distribución del valor de la incertidumbre a través del valor del estadístico chi-cuadrado.

Uno de los filtrados realizados en la base de datos de rayos se refiere al parámetro de incertidumbre reflejado por el valor de chi-cuadrado que acompaña a cada descarga que, en el rango de 0 a 999.99 recoge la indeterminación en la determinación del punto y momento de la descarga. Habitualmente se consideran muy aceptables valores por debajo de 2, que en la base de datos disponibles representan aproximadamente el 89% del total, con una distribución como la reflejada en la figura adjunta. En general valores más altos de este parámetro suelen ir acompañados también de mayores incertidumbres en las coordenadas del impacto, por lo que en el trabajo posterior de análisis se eliminaron los registros de dicha categoría del banco de datos.



## Análisis de Contingencias.

El resultado del filtrado sobre el total de la base de datos disponible se sustanció en una relación de 132.540 registros de rayos con impacto sobre terreno forestal, en el periodo de ocho años, comprendido entre el 2011 y 2018, de los cuales 26.056, aproximadamente un 20%, se asocian a algún incendio en terreno forestal, de acuerdo al criterio de asignación de los rayos (proximidad en el espacio y en el tiempo) como potencial causa de ignición.

### *Distribución espacial sobre el territorio*

Con una resolución espacial de rejilla de 10x10 km, la figura 26 muestra la distribución espacial a lo largo del territorio de la Comunitat Valenciana del número total de descargas eléctricas nube-suelo registradas durante el mencionado periodo (ocho años), correspondientes a ambas categorías (totales y rayos asociados a incendios). Aunque el aspecto relevante de las figuras viene determinado por la variación relativa a lo largo del territorio, más que por los valores absolutos, las referencias numéricas representan el número de impactos acumulados a lo largo de los ocho años en las sucesivas cuadrículas de cien km<sup>2</sup> de área.

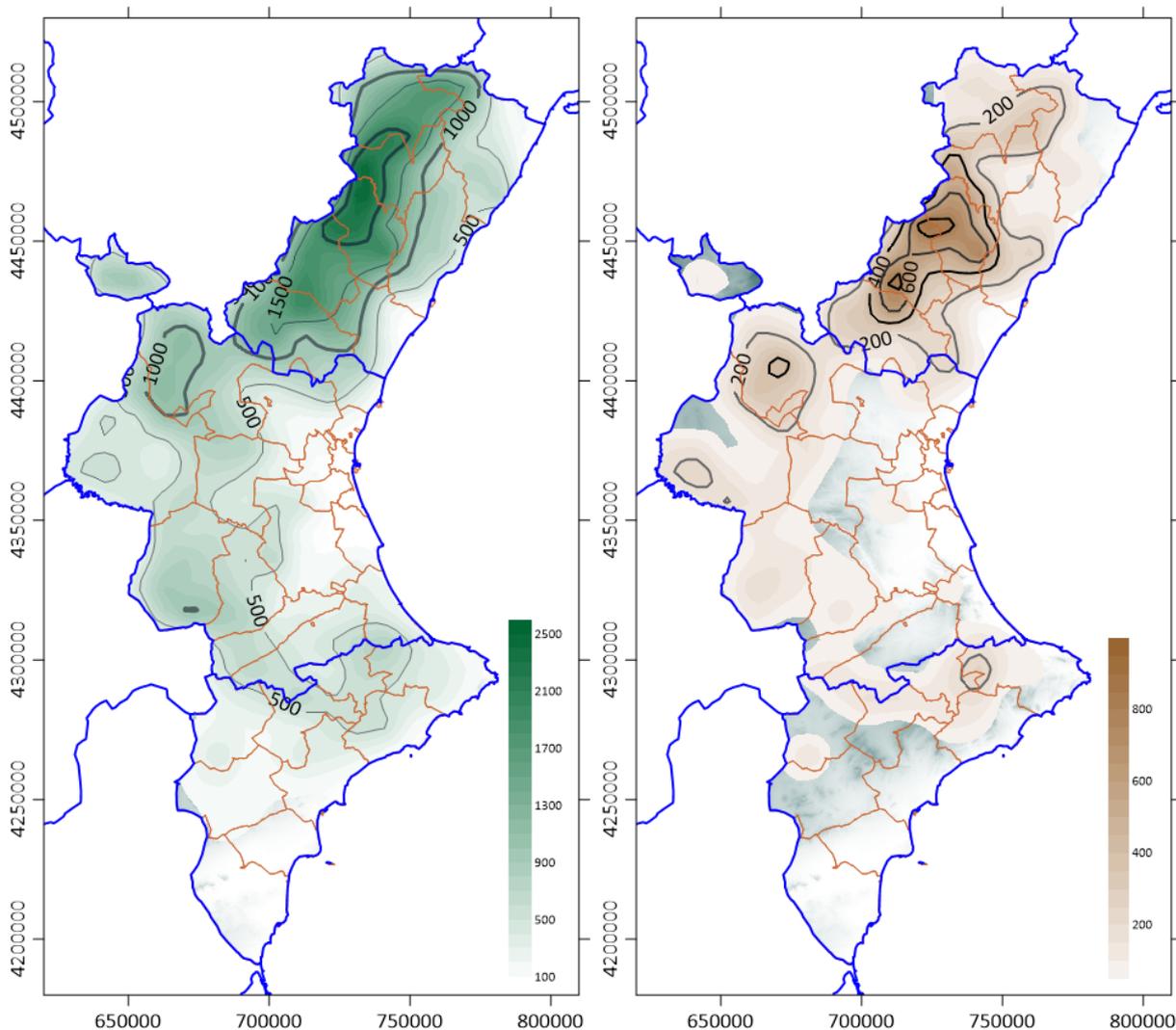


Figura 26. Distribución espacial sobre el territorio de la Comunitat Valenciana del número absoluto de rayos analizados (periodo 2011-2018 sobre cuadrícula 10x10 km) y de aquellos causantes de incendios forestales (derecha).



Con esta perspectiva, se aprecia que se sitúa la mayor actividad en la provincia de Castellón, con los máximos sobre buena parte de la mitad interior, en lo que serían las estribaciones más orientales de la Sierra de Gudar y, en menor medida, en el interior norte de Valencia, en torno a la Sierra de Javalambre. El gradiente de ocurrencias desciende con frecuencias menores por el interior de la Comunitat hacia la frontera norte de Alicante, sobre las estribaciones finales del sistema Bético.

La mayor concentración de incendios con este origen natural también se localiza en el interior centro de Castellón, siendo las estribaciones del macizo de Gúdar y de la Sierra de Espadán las zonas de mayor impacto, con un máximo más modesto en el norte de Valencia, en las proximidades de Javalambre.

#### *Distribución espacial de probabilidad*

La probabilidad de que la caída de un rayo acabe asociándose a la ocurrencia de un incendio forestal aparece representada como isocurvas en el mapa de la derecha de la figura adjunta. De nuevo la interpretación debe entenderse, para cada una de las rejillas de 10x10 km en las que se reparte el territorio de la Comunitat, como la relación entre el número de rayos asociados a incendios computados en toda la base de datos respecto al número total de descargas.

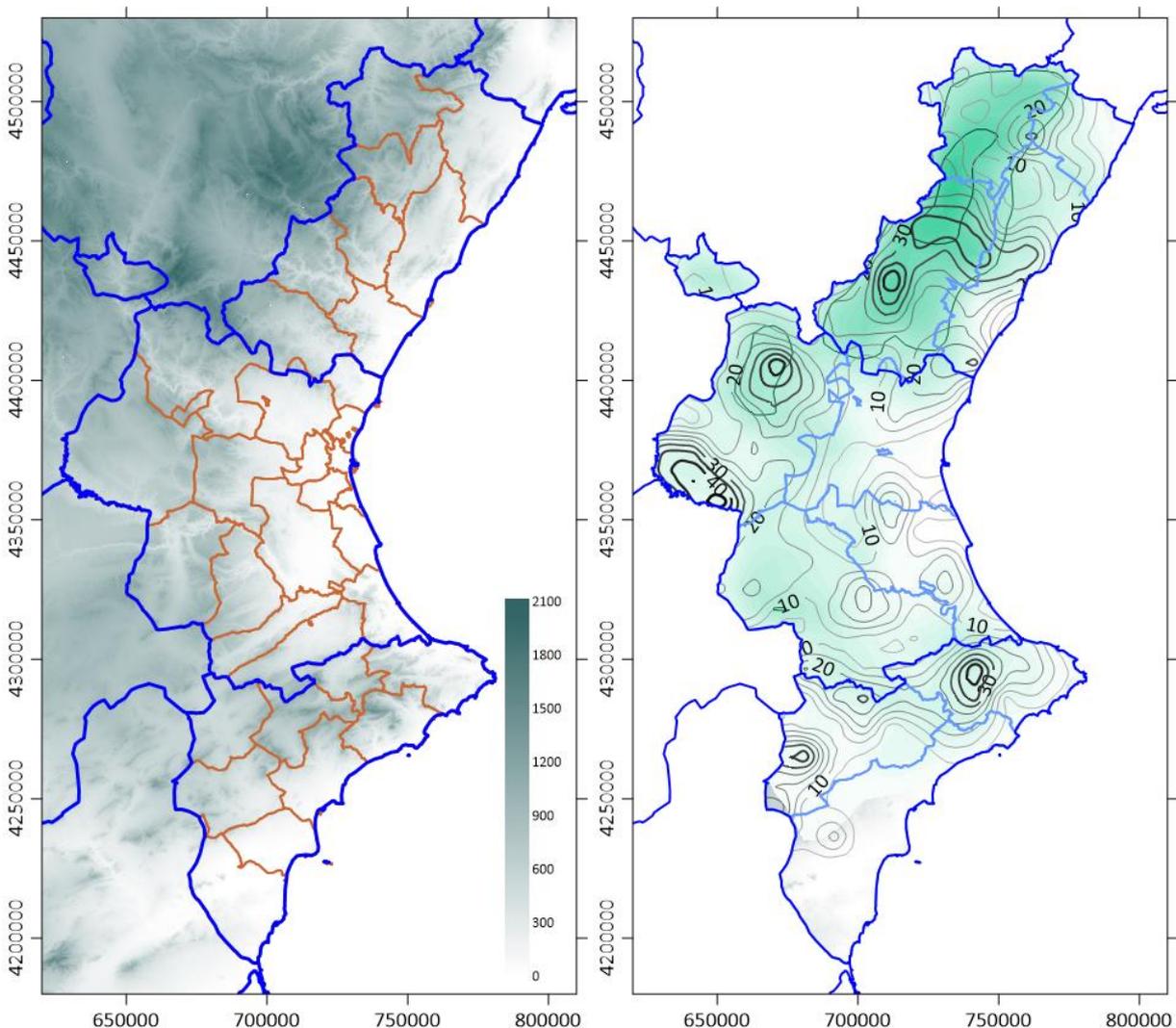


Figura 27. Distribución espacial sobre la orografía de la Comunitat Valenciana (izquierda) de la probabilidad (%) de que un rayo desencadene un incendio forestal (estimada para la base de datos entre el 2011-2018 y sobre una cuadrícula de 10x10 km)



En la izquierda de la figura 27 se representa la orografía de la Comunitat como factor de referencia en el desarrollo de la actividad convectiva que acompaña los fenómenos de electricidad atmosférica. Las frecuencias de ocurrencia mostradas (figura 27, derecha) distribuyen el mencionado 20% de los rayos que, impactando sobre terreno forestal, potencialmente acabarían dando lugar a una ignición. El cómputo realizado necesariamente sobre una rejilla (cuadrada de 10 km de lado) condiciona en cierta medida los resultados numéricos, siendo un compromiso para asegurar la continuidad sobre el territorio, huyendo de los huecos de información que una excesiva compartimentación del espacio generaría en el registro de eventos de la base de datos. De nuevo la morfología de la variación relativa a lo largo del territorio resulta más interesante que los niveles absolutos.

Los valores porcentuales resultan notablemente altos, especialmente en lo que se refiere a los valores pico, y puede ser un efecto de la propia asignación de rayo-incendio. Cuando varias descargas impactan en una zona que combustiona se asigna a todas ellas como causantes, aunque potencialmente solo una iniciaría la ignición. Estos máximos de probabilidad de desencadenar un fuego corrigen en cierto modo la mera distribución de impactos, menos ligados ahora a la orografía (cabe alertar del posible efecto del cociente de números pequeños) y donde la distribución del terreno forestal también puede estar modelando los resultados.

Los niveles de probabilidad representados reflejarían una imagen estática de la integración de todos los factores contribuyentes al inicio de una ignición con origen en una descarga eléctrica.

### Análisis

Se ha realizado un análisis para poner en evidencia posibles diferencias entre los rayos asociados a un incendio y el resto. Se han considerado los rayos registrados en terreno forestal de la Comunidad Valenciana entre los años 2011 y 2018, de los cuales un 20% serían potencialmente causantes de incendios por impactar suficientemente próximos, en tiempo y espacio, a un incendio forestal causado por un rayo. Esta circunstancia, como se comentó, sobreestima el cálculo de la probabilidad de que una descarga genere una ignición, ya que habitualmente un incendio se origina en un contexto de muchos rayos, de los cuales presumiblemente uno o unos pocos, son solo los desencadenantes finales. No obstante, de esta forma, al asociar al incendio un mayor número de descargas, compartiendo condiciones similares, se están resaltando los posibles rasgos comunes ligadas al desencadenamiento del fuego.

En la presentación de los resultados se ha procurado mantener un mismo formato de las salidas gráficas para poner de manifiesto las posibles diferencias en la probabilidad para cada una de las magnitudes consideradas. El número de rayos para cada categoría analizada se refiere al conjunto completo de los ocho años de la base de datos y se muestra a la izquierda, distinguiendo entre la totalidad de los rayos y solo el conjunto de descargas que se asocian a incendios (multiplicados por 10), junto al porcentaje (eje secundario) que representan estos respecto al total (probabilidad de que un rayo se asocie a un incendio para las diferentes categorías de la magnitud de estudio); la gráfica de la derecha presenta, para cada categoría, la distribución porcentual de los dos grupos de rayos anteriores (en cada caso respecto al 100%), buscando resaltar diferencias de forma entre ambas curvas. La presencia de posibles sesgos alertaría de posibles condiciones diferenciadas de ocurrencia entre la actividad eléctrica general

### Dependencia con las referencias temporales.

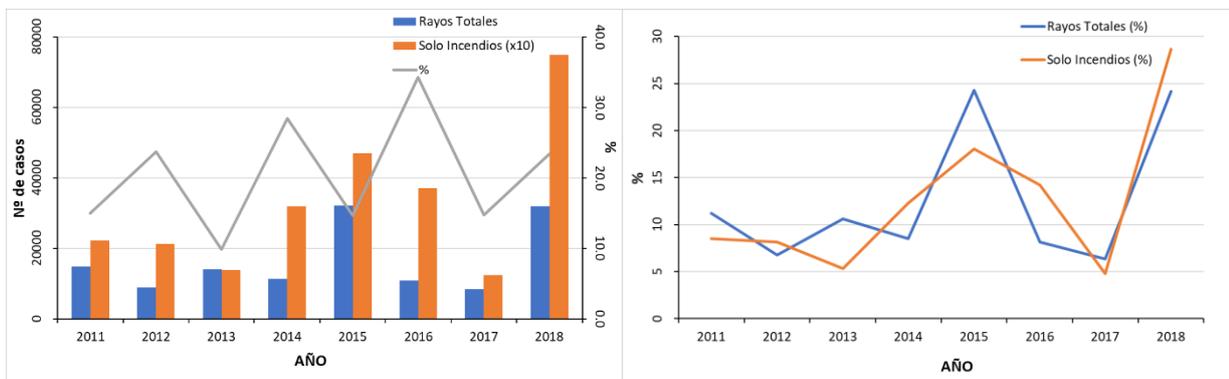


Figura 28. Distribución anual absoluta (izquierda) y porcentual (derecha) del banco de datos analizado para los rayos totales registrados en la Comunidad Valenciana sobre terreno forestal (periodo 2011-2018) y aquellos asociados a incendios; se muestra la probabilidad (%) de que un rayo cause un incendio (línea gris).



El análisis por años (figura 28) refleja un diente de sierra en cuanto al registro de rayos, tanto en los totales como los asociados a fuegos, dando lugar a un patrón oscilante de la curva de riesgos, sin una tendencia temporal apreciable.

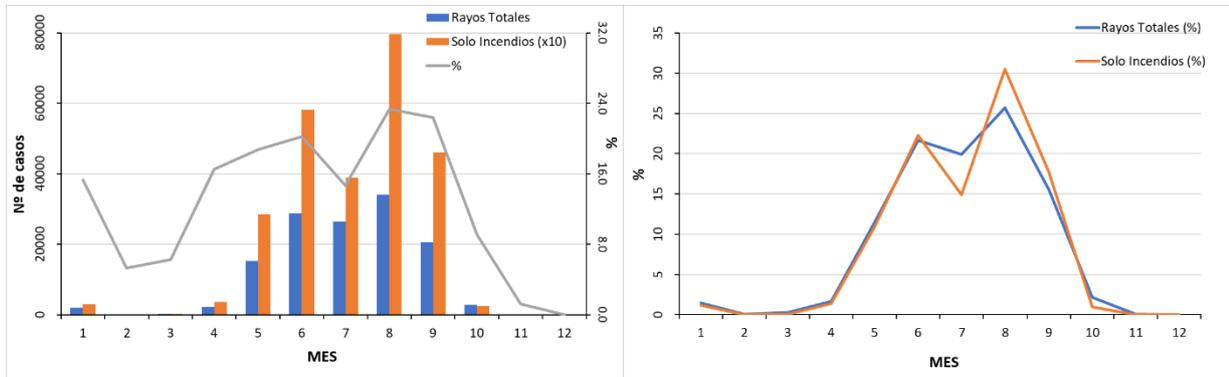


Figura 29. Distribución mensual de la ocurrencia de rayos totales y asociados a incendios (similar a la anterior).

La distribución mensual de la base de datos refuerza también las evaluaciones previas sobre la misma base temporal, con una curva acampanada centrada en los meses de verano en todos los casos y una función de probabilidad con valores notablemente superiores entre los meses de abril a septiembre respecto al resto, con agosto y septiembre como los periodos de mayor riesgo. En las distribuciones porcentuales, junto al máximo absoluto de agosto se aprecia un mínimo relativo en julio, más pronunciado en ambos sentidos en el caso de los rayos ligados a fuegos.

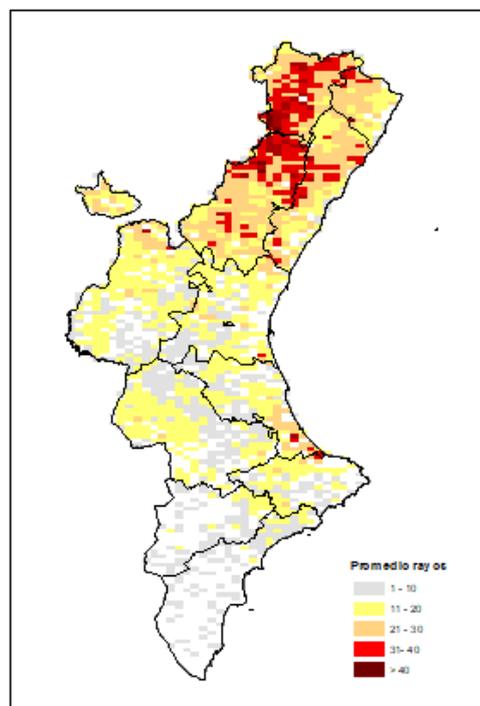


Figura 30. Distribución espacial, en el ámbito de la Comunitat Valenciana, del número promedio anual de rayos en terreno forestal en el periodo 2011-2018.



El comportamiento horario también muestra una distribución fuertemente acampanada, con los episodios preferentemente diurnos, con el máximo a primera hora de la tarde y pocas ocurrencias durante la noche, reflejo de que los desarrollos tormentosos culminan a lo largo de la tarde, bien como resultado de procesos meteorológicos locales (brisas de mar-montaña), bien reforzados/estimulados por aquellos en situaciones de inestabilidad a gran escala. La probabilidad de un incendio provocado por un rayo con relación a la propia ocurrencia de una descarga no parece señalar un patrón definido, con fuertes dientes de sierra, que responden previsiblemente a la irregular distribución de casos.

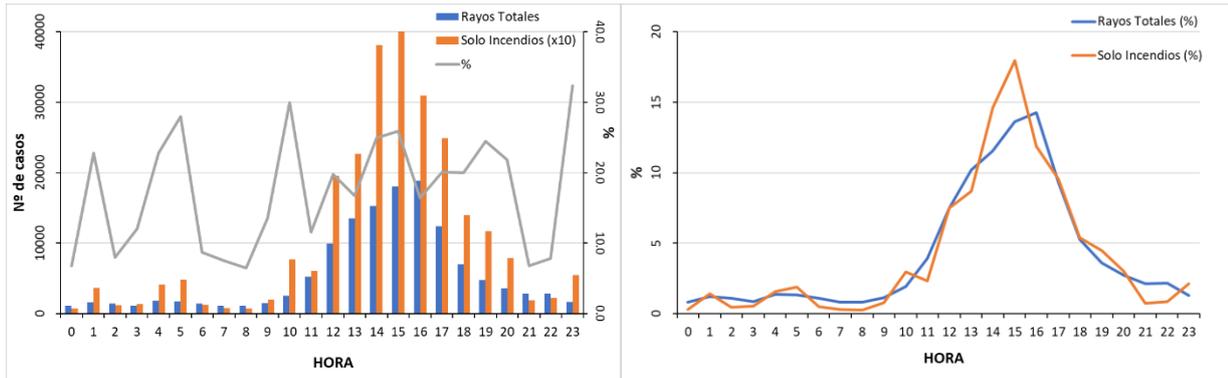


Figura 31. Distribución por hora del día del número de rayos totales y asociados a incendios (similar a las anteriores).

### Dependencia con las características de las descargas.

Los reportes de la red de detección de rayos proporcionan información sobre las características de la descarga, además de las coordenadas del impacto y referencias a la incertidumbre de la ubicación. Generalmente se incluye la intensidad del rayo (que mide la energía asociada a la descarga eléctrica), la polaridad (que indica el tipo de cargas que transporta la conexión eléctrica) y el número de réplicas asociadas a una misma descarga (en la base de datos disponible este campo es constante, y tampoco se aporta información sobre el sentido del flujo de la carga). La bibliografía indica que aproximadamente el 90% de los rayos presentan polaridad negativa y suelen ser mucho más energéticos, lo cual se corresponde con los registros disponibles, que arrojan aproximadamente un 84%, con la proporción de polaridad negativa en el caso de rayos asociados a incendios obtenida es algo mayor, en torno a n 91%. La distribución de ocurrencias de descargas relativa a la intensidad refleja un claro pico en torno a los -15 kA (polaridad negativa), con la referida probabilidad de rayos asociados a incendios más elevada en caso de descargas negativas y, en general, aumentando ligeramente hacia valores crecientes de la intensidad, para ambas polaridades.

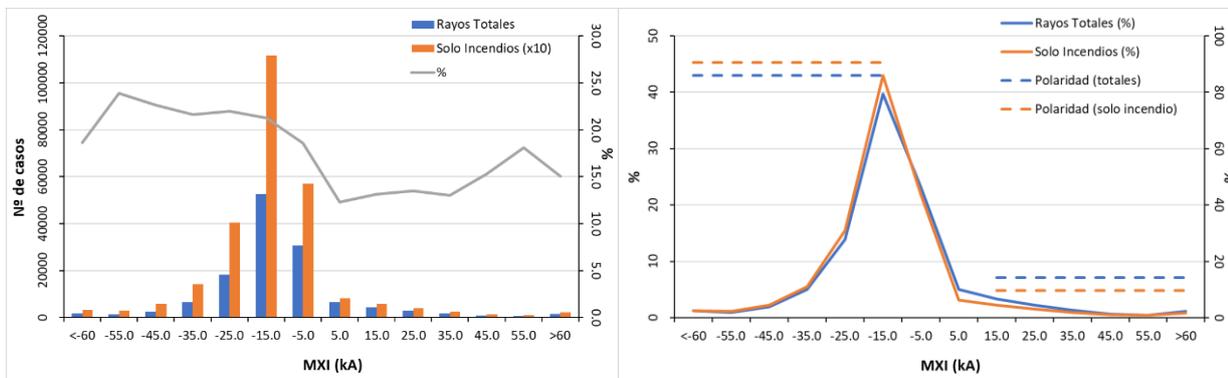


Figura 32. Frecuencia de ocurrencia de rayos según su intensidad/polaridad (similar a las anteriores); se incluye (líneas a trazos) la probabilidad de descargas positivas/negativas (totales y asociadas a incendios).



Otro de los aspectos analizados es la ocurrencia de incendios en función del número de descargas próximas. Para ello se realizaron los cálculos sobre una base diaria y un tramado de 10x10 km, de nuevo distinguiendo los rayos totales frente a aquellos asociados a una ignición, cuyo resultado se muestra en las figuras siguientes. La distribución de sucesos refleja, para ambas tipologías de rayos, un comportamiento similar, rápidamente decreciente desde los episodios aislados de impactos, hacia los eventos más concentrados. No obstante, con las discontinuidades inherentes a la muestra disponible, la curva de probabilidad refleja una tendencia creciente de la oportunidad de que un rayo desencadene un incendio en función del número de descargas.

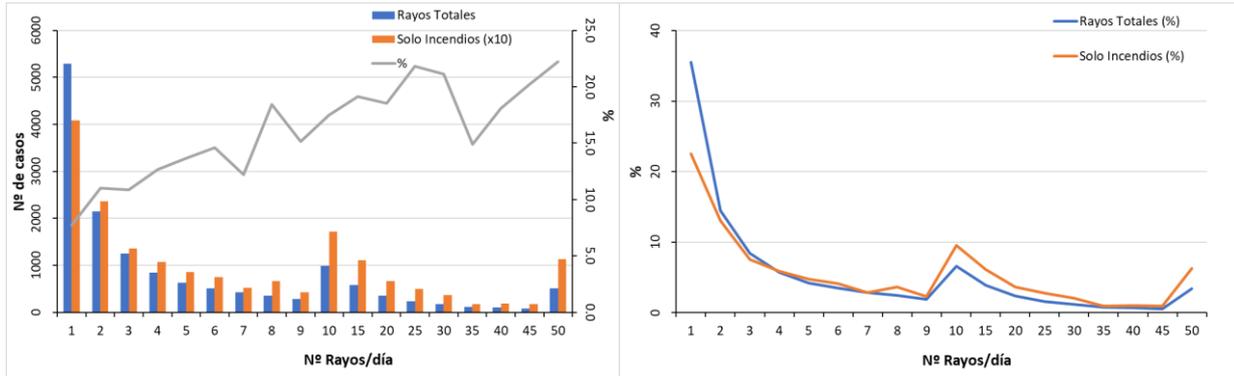


Figura 33. Frecuencia de ocurrencia de rayos según el número de descargas (similar a las anteriores).

### Dependencia con los factores orográficos.

Se analiza a continuación la relación de los incendios asociados a rayos con los factores permanentes del terreno forestal, como son la altura, la orientación de la ladera, su pendiente y el tipo de cobertura vegetal (dentro de la categoría forestal). La distribución de ocurrencias de rayos sobre el territorio refleja en gran medida las propias características del mismo, si bien la naturaleza de los episodios tormentosos favorece una mayor presencia de cotas elevadas y, en menor grado, pendientes más escarpadas ya que ambas características se pueden asociar a las tormentas. Las orientaciones de las laderas y la cobertura vegetal aparentemente son equiprobables.

En la distribución de las dos tipologías de rayos, no se aprecian diferencias en función de la altitud, con una probabilidad de incendios mesetaria, solo claramente decrecientes en los dos extremos de la distribución, donde decrece drásticamente el número de casos.

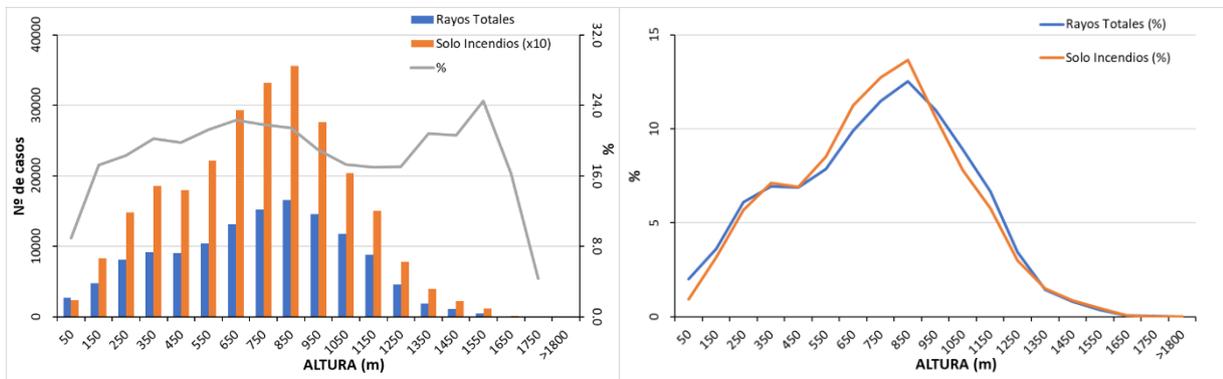


Figura 34. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la altura del terreno (similar a las anteriores).



Con la orientación de la ladera en la que se produce el impacto tampoco se manifiestan grandes discrepancias, aunque en la curva se aprecia la orientación preferente a levante de las cadenas montañosas de la Comunitat. La probabilidad de incendio, representada por la curva continua en la gráfica de barras se muestra prácticamente plana, revelando la falta de influencia de este potencial factor del terreno.

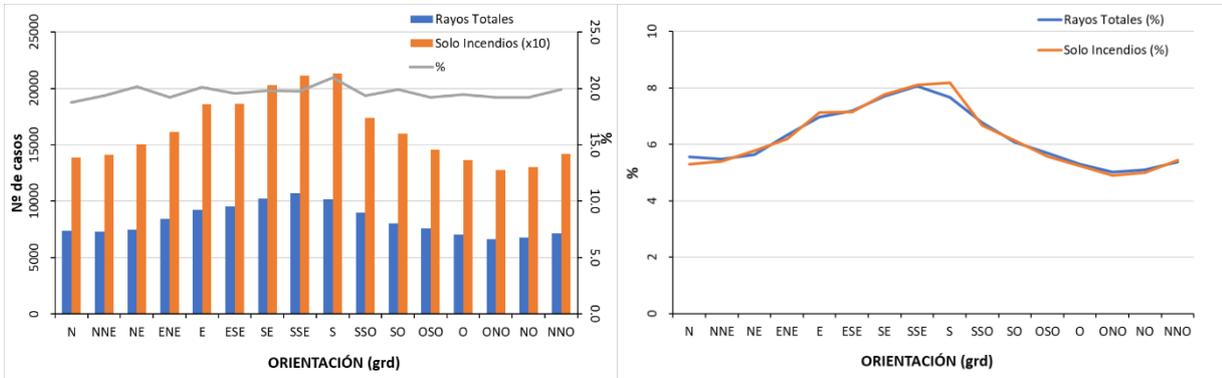


Figura 35. Frecuencia de ocurrencia de rayos según la orientación de la ladera (similar a las anteriores).



Figura 36. Distribución espacial para el periodo de mayor frecuencia de ocurrencia de descargas (junio-septiembre), en el ámbito de la Comunitat Valenciana y sobre una cuadrícula de 10x10 km, de la altitud promedio de los rayos registrados (izquierda), de la orientación promedio (centro) y de la pendiente media (derecha).

Más interesante resulta el análisis de la pendiente, que muestra una distribución decreciente, en términos absolutos, del número de ocurrencias con la inclinación del terreno (lógicamente la superficie con inclinaciones crecientes cada vez es menor) mientras que la relación entre rayos asociados a incendios frente a los totales refleja una tendencia creciente con aquella, moderada pero clara y continua en todo el dominio. Una posible lectura es que la posibilidad de que un impacto eléctrico, en igualdad de condiciones tenga más oportunidades de desembocar en un fuego superficial cuando la inclinación del terreno es mayor.

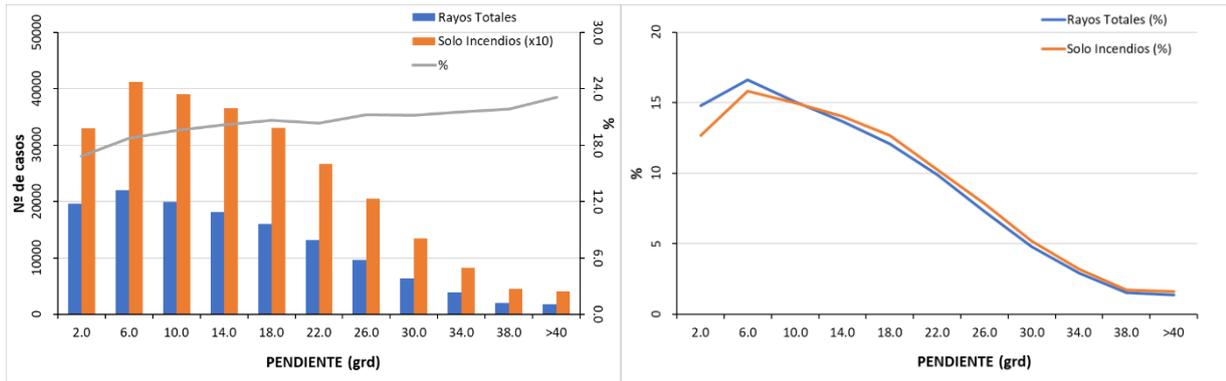


Figura 37. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la pendiente de la ladera (similar a las anteriores).

En las siguientes figuras se muestra el resultado de computar las diferentes situaciones relativas al tipo de cobertura vegetal. En este caso el cómputo se restringió al periodo 2016-2018 (algo más de un 38% de los registros totales), atendiendo a que la información de la cobertura vegetal fuese previa y no posterior a los incendios. De nuevo las distribuciones parecerían ser dependientes de la propia abundancia de las distintas categorías contempladas, con pequeñas diferencias en la importancia relativa de los rayos (segregados por su ignición) que no parecen traducirse claramente en la curva de probabilidades (diente de sierra) según coberturas.

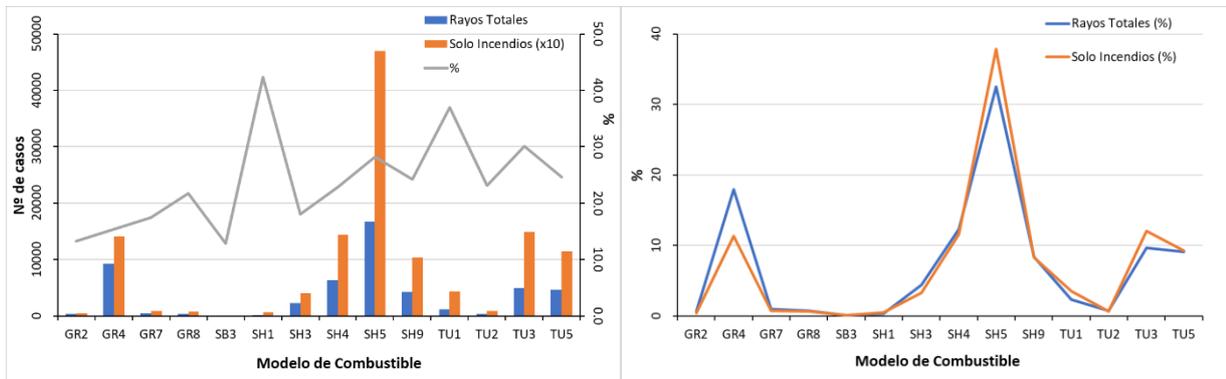


Figura 38. Frecuencia de ocurrencia de rayos según la tipología del combustible -solo periodo 2016-2018- (tabla 05).

Tabla 05. Leyenda del tipo de cobertura forestal incluida en el análisis del banco de rayos.

Referencia	Tipo de cobertura	Referencia	Tipo de cobertura
GR2	PASTO	SH4	MATORRAL
GR4	PASTO	SH5	MATORRAL_DENSO
GR7	HUMEDALES	SH9	PINAR_REGENERADO
GR8	HUMEDALES	TU1	ARBOLADO
SB3	ARBOLADO	TU2	ARBOLADO
SH1	MATORRAL_DISPERSO	TU3	ARBOLADO
SH3	MATORRAL_DISPERSO	TU5	ARBOLADO



### Dependencia con los factores ambientales.

La evaluación de las magnitudes que representan el estado de la atmosfera incorpora la parte cambiante del entorno atmosférico. Se han analizado los valores extremos diarios de la temperatura, la humedad relativa y del viento, la precipitación diaria acumulada y dos factores que pretenden evaluar el grado de estabilidad atmosférica y el nivel de sequedad de la masa aérea.

De las figuras relativas a la temperatura se aprecia claramente una diferencia en la distribución de los rayos asociados a incendios, claramente sesgados hacia los valores mayores, mientras que la mínima diaria no parece introducir diferencias importantes en la probabilidad de que se desencadene un fuego.

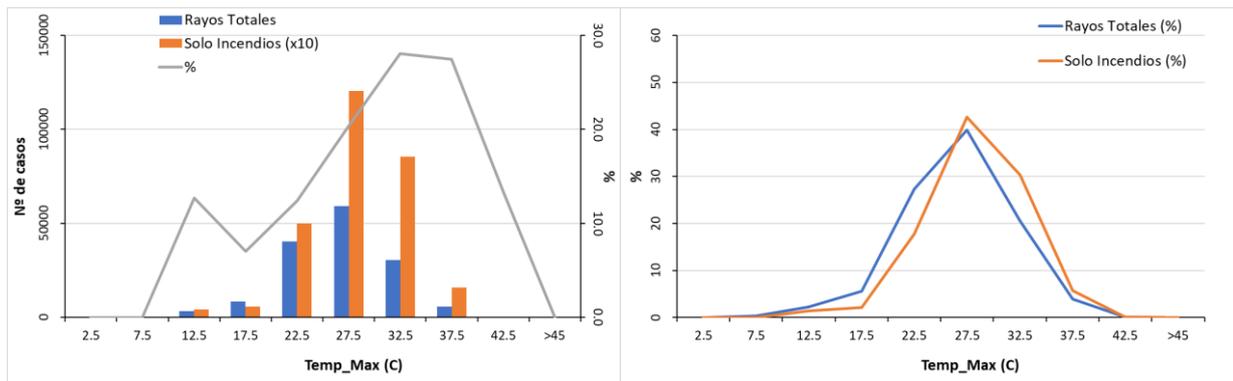


Figura 39. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la temperatura máxima diaria (similar a las anteriores).

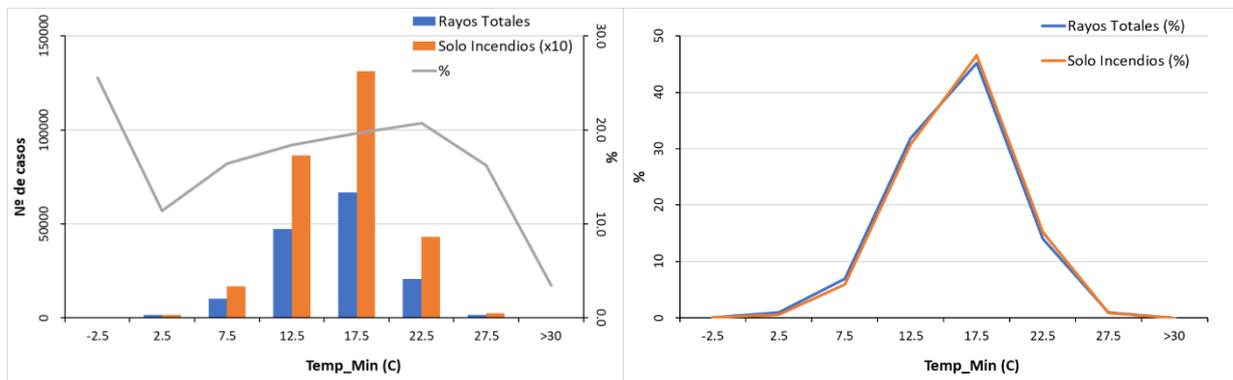


Figura 40. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la temperatura mínima diaria (similar a las anteriores).

Un comportamiento inverso parece ocurrir con la humedad relativa (en gran medida dada la anticorrelación entre ambas magnitudes). Los valores máximos diarios tienden a acumularse en la escala alta del rango, correspondiendo previsiblemente a periodos nocturnos de máximo descenso térmico. El número de casos aumenta rápidamente con el valor de la humedad, solapándose las curvas de los dos tipos de rayos, si bien el valor de la probabilidad se hace notablemente máximo en los rangos bajos de la magnitud. La distribución de episodios con referencia a la humedad mínima (eminentemente diurna) muestra una forma acampanada, de nuevo con un marcado desfase entre la ocurrencia de rayos asociados a incendios frente a los totales. Las curvas de probabilidad parecen sugerir una tendencia positiva de la probabilidad de ignición por rayo con valores decrecientes de la humedad relativa.

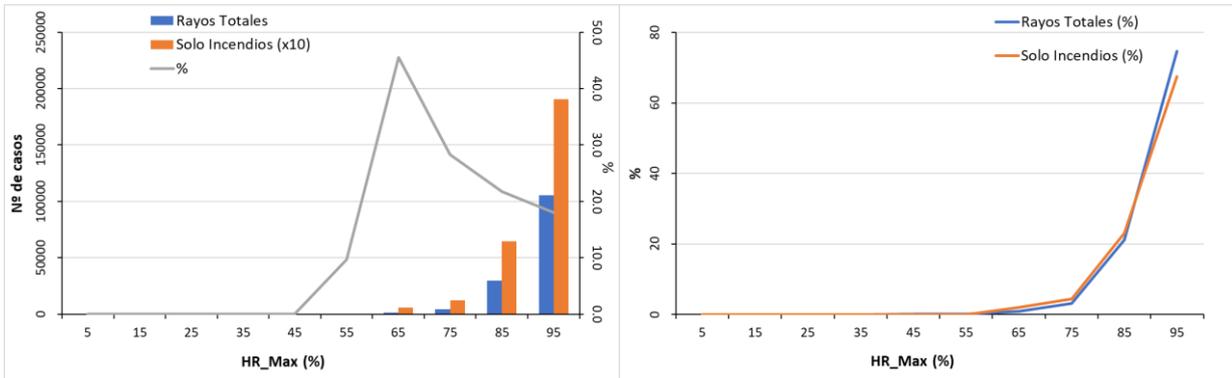


Figura 41. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la humedad máxima diaria (similar a las anteriores).

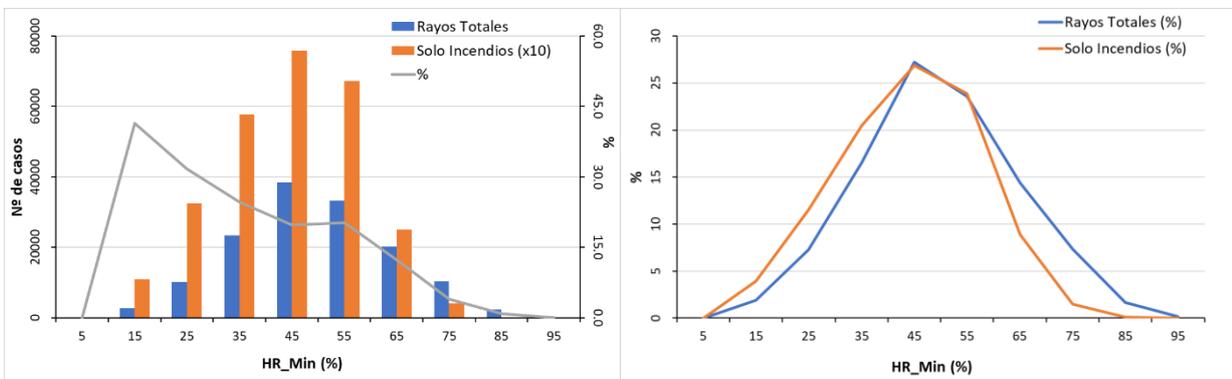


Figura 42. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la humedad mínima diaria (similar a las anteriores).

Los cálculos con la dirección del viento (que como se indicó, corresponde a la dirección correspondiente a la racha máxima) muestran una distribución muy cambiante con respecto a las dos categorías de rayos consideradas, quizás debido a que la dirección del viento puntual es muy cambiante, mientras que el valor correspondiente a la mayor intensidad del viento no siempre refleja bien la circulación general de la atmósfera (en muchas ocasiones las tormentas se desarrollan bajo condiciones muy locales, con flujos marcados inducidos por la propia dinámica de la celda convectiva). La gráfica de las probabilidades sí parece mostrar un cierto mínimo en torno al oeste, que reflejaría la poca actividad convectiva en situaciones de ponientes.

Un comentario similar cabría formular respecto a la racha máxima, que como valor diario pretende reflejar el carácter más o menos ventoso de la jornada, pero cuya medida exacta en el punto de impacto del rayo puede presentar grandes variaciones. Los resultados muestran una campana bien definida con una cola hacia los valores más altos, que podría interpretarse como la presencia de vientos intensos en torno al desarrollo de las celdas convectivas en las que es frecuente la actividad eléctrica. Con las precauciones debidas a los pocos casos, las estimaciones parecerían sugerir una tendencia creciente de la probabilidad de los incendios con la intensidad del viento.

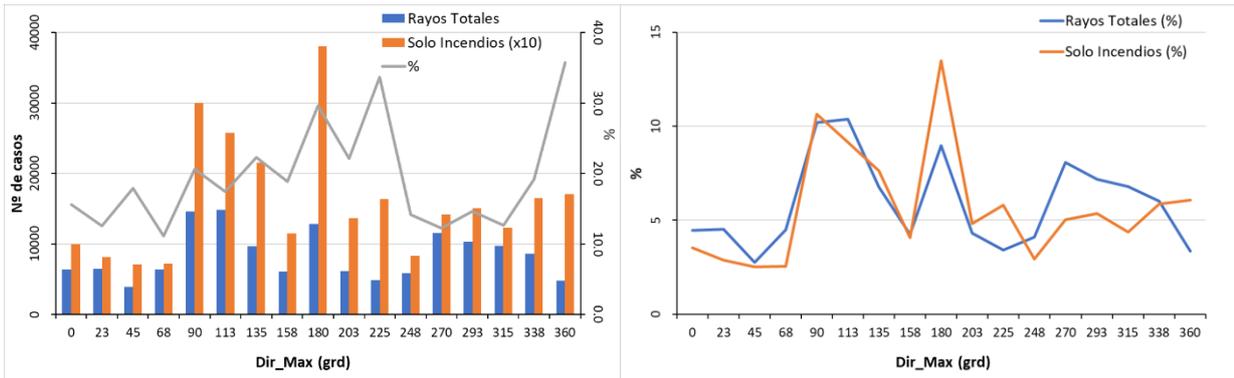


Figura 43. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la dirección del viento (similar a las anteriores).

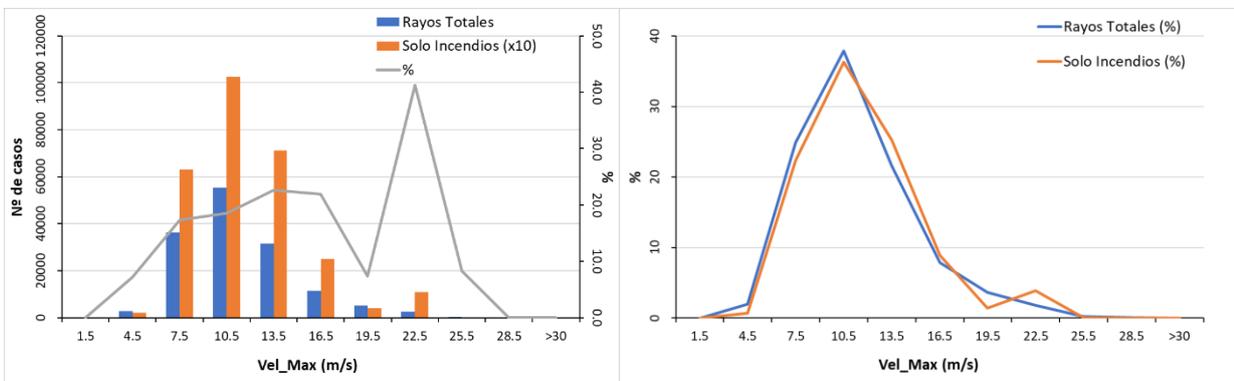


Figura 44. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la velocidad máxima diaria (similar a las anteriores).

La lluvia es una variable especialmente compleja de evaluar, dada su distribución irregular sobre el terreno y la dificultad de asignarle un valor medido próximo a la ocurrencia de la descarga eléctrica. Utilizando acumulados diarios se aminora la dependencia temporal de la precipitación, asignando un valor que de alguna manera afectaría al efecto del rayo, tanto si la lluvia se produce antes como después de la descarga. Teniendo su origen ambos en la actividad tormentosa, rayos y precipitaciones van juntos en gran medida. La ocurrencia de tormentas secas favorece teóricamente la posibilidad de que un rayo produzca una ignición que acabe en un fuego superficial.

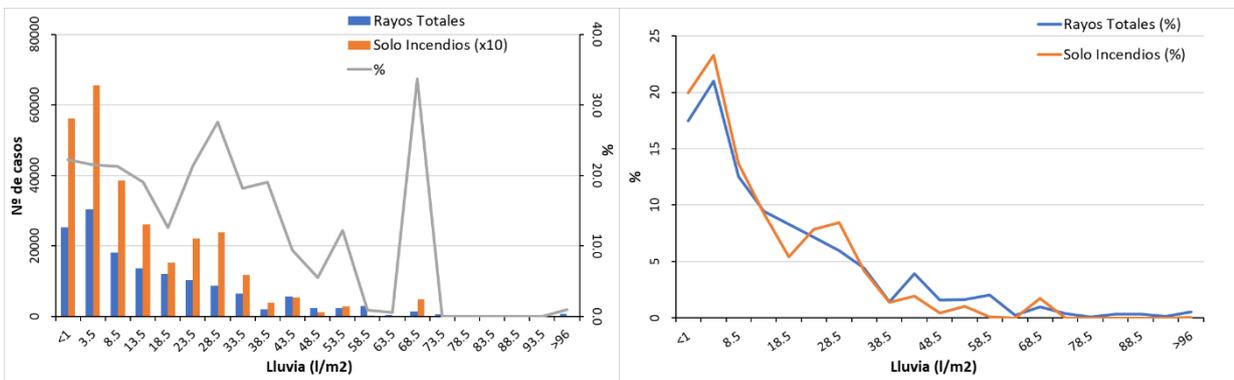


Figura 45. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la precipitación diaria (similar a las anteriores).



El banco de datos disponible no refleja bien esta situación, con probabilidades de incendio que no muestran niveles claramente menores en los rangos bajos de precipitación (incluidos aquellos sin lluvia), si bien cada categoría de rayos se ajusta bien a la distribución reportada por otros estudios. En este sentido, la asignación de los valores de precipitación diaria al impacto concreto puede estar condicionando los resultados, en tanto que el momento de la lluvia respecto al de la descarga puede resultar crítico. En esta línea cabría valorar (no realizado) si existe un comportamiento diferenciado respecto al factor precipitación entre los rayos que se asocian a incendios grandes frente a los simples conatos, entendiéndose que las tormentas secas sí jugarían un papel importante en la posibilidad de un gran fuego.

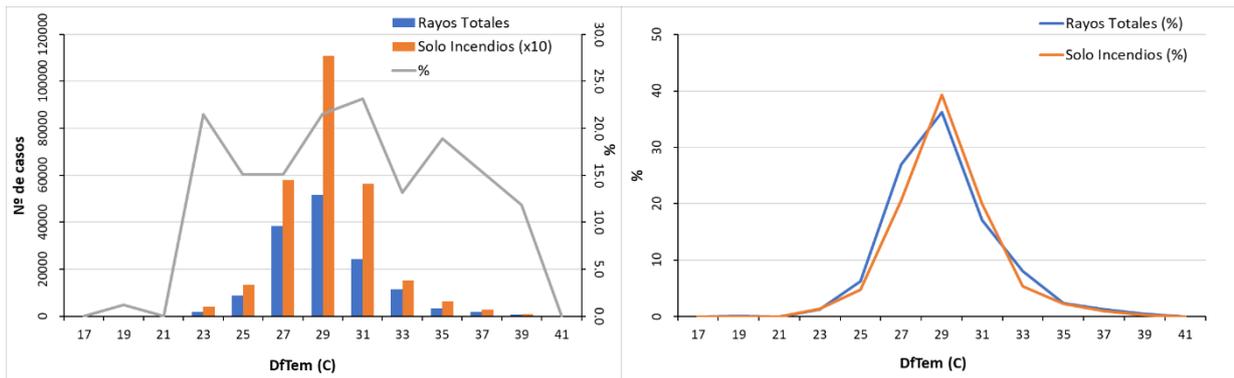


Figura 46. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la diferencia térmica 500-850 mb (similar a las anteriores).

Finalmente, se muestra la relación de ocurrencia de descargas eléctricas en función de las características de estabilidad y humedad de la masa aérea (figuras 46 y 47), obtenidas de acuerdo el procedimiento descrito. En ambos casos la resolución es diaria y procede del sondeo meteorológico de Murcia de las doce horas. La diferencia de temperaturas entre los 500 y los 850 mb exhibe una distribución acampanada, con pocas diferencias entre las dos categorías de rayos, reflejando la probabilidad de incendio una curva mesetaria sin tendencia apreciable. Con diferente distribución, la diferencia entre la temperatura del punto de rocío y la temperatura seca (que representa el grado de alejamiento de la saturación grado de sequedad de la masa aérea) en el nivel de 850 mb

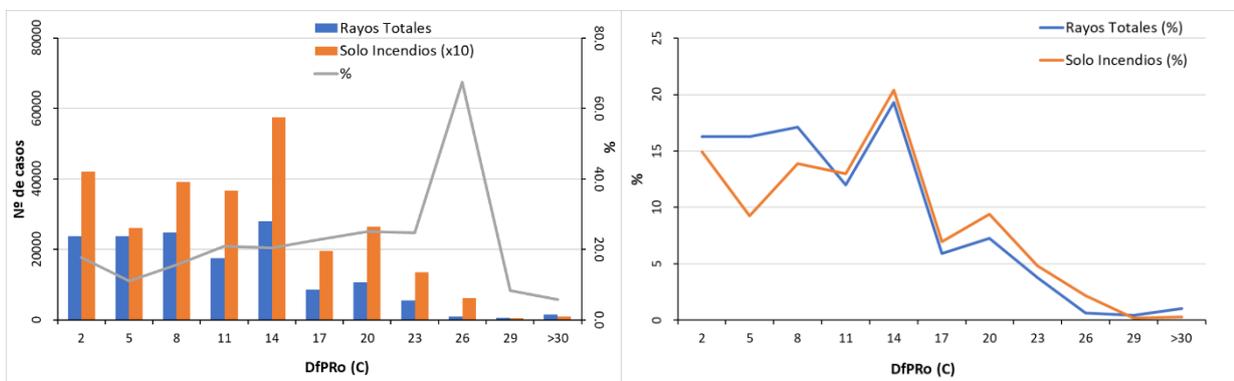


Figura 47. Frecuencia de ocurrencia de rayos en función de la humedad a 850 mb (similar a las anteriores).



## Modelos Operativos.

Como se indicó previamente, los modelos de regresión constituyen las herramientas numéricas más utilizadas en los trabajos de simulación de los incendios causados por descargas eléctricas, en las que se trabajan diferentes tipos de variables respuesta (desde la fecha ocurrencia de un incendio, su extensión, presencia de ignición, frecuencia de fuegos, etc.), desarrollados sobre la base también de diferentes conjuntos de covariables, en las que se incluyen factores ambientales, orográficos, usos del suelo, interacción humana, etc. También la escala de aplicación de los modelos puede variar, en el tiempo (aunque lo más frecuente es trabajar sobre una base diaria) y en el espacio, distinguiéndose aquí los modelos regionales, evaluados sobre áreas grandes (comarcas, provincias, estados) y los locales, con rangos que suelen ir frecuentemente entre 1 y 20 km. Sintetizando, cabe resumir que la regresión logística es la preferida cuando se analizan opciones binarias (posibilidad de ignición), la distribución de Poisson y la regresión binomial negativa cuando se simulan número de ocurrencias, mientras que los modelos lineales generalizados suelen utilizarse en la simulación de alguna propiedad cuantitativa del sistema.

En el presente trabajo se ha prospectado la posibilidad de utilizar una regresión logística sobre el banco de variables que acompañan la base de datos de ocurrencia de rayos, asociados o no a incendios forestales. Inicialmente se utilizaron todas las magnitudes disponibles, que suman un total de 18 (previamente analizadas), encuadrables en cuatro grupos de factores, atendiendo a su naturaleza.

Tabla 06. Relación de covariables inicialmente disponibles para el modelo logístico (se resaltan las finalmente incorporadas).

Categoría	Variable	Unidades
Temporalidad	Año	
	Mes	
	Hora	
Características del rayo	Polaridad	kA
	Nº Rayos	nº
Territorio	Altitud	m
	Orientación	grd
	Pendiente	%
	Combustible	ver tabla 05
Condiciones ambientales	Temp. Max	°C
	Temp. Min	°C
	H.R. Max	%
	H.R. Min	%
	Veloc- Max	m/s
	Dirección	grd
	Precipitación	l/m <sup>2</sup>
	Estabilidad	°C
Sequedad	°C	

Sobre la colección inicial se realizaron diferentes ensayos, resultando en ajustes poco representativos, con problemas de convergencia numérica del sistema de resolución, optándose por seleccionar un subconjunto de magnitudes (covariables) de entre las que parecían mostrar una mayor dependencia en los análisis previos. Se seleccionaron las seis magnitudes que se resaltan en la tabla 06.

A partir de las seis magnitudes extractadas se realizaron diferentes ajustes de la regresión lineal, evaluándose sobre la propia base de datos la bondad del ajuste. En ocasiones las diferencias resultaron poco importantes, resaltando el hecho de que el ajuste en términos absolutos (ocurrencia frente a no ocurrencia de incendio) arroja un elevado nivel de diferencias entre la simulación y lo ocurrido.

En la tabla 07 siguiente se indican los resultados de los diferentes ensayos, se ha incluido la evaluación de cada una de las seis variables seleccionadas y el modelo que mejores resultados proporciona (con las seis variables). La tabla muestra los porcentajes de coincidencias/discrepancias para los casos en los que se produce (o no) un incendio asociado a la descarga. De su lectura se desprende el alto porcentaje de fallos (en términos absolutos 0/1) en la identificación del incendio, aspecto para el que solo la variable "Número de



Rayos” predice probabilidad efectiva de ignición, resultando claramente el modelo conjunto de las seis variables superior a cada una por separado.

Tabla 07. Porcentajes de acierto/fallo de los ajustes logísticos a partir de variables individuales y conjuntamente.

Ocurrencia Rayo	SIN ignición	CON ignición	Covariable
acierto	97.3%	8.1%	Nº Rayos
fallo	2.7%	91.9%	
acierto	100.0%	0.0%	Pendiente
fallo	0.0%	100.0%	
acierto	99.7%	0.8%	T. Máxima
fallo	0.3%	99.2%	
acierto	100.0%	0.0%	HR Mínima
fallo	0.0%	100.0%	
acierto	100.0%	0.0%	Vel Máxima
fallo	0.0%	100.0%	
acierto	100.0%	0.0%	Precipitación
fallo	0.0%	100.0%	
acierto	96.4%	14.0%	Modelo COMPLETO
fallo	3.6%	86.0%	

El modelo conjunto de las seis covariables con el ajuste de los parámetros se refleja en la tabla 08. La expresión proporciona la probabilidad en el intervalo [0,1] de que el impacto de un rayo acabe desencadenando un incendio, a partir de los valores de las diferentes covariables representativas. Desde un punto de vista operativo, la elaboración de un mapa de riesgos requeriría alimentar con los valores de las diferentes covariantes en cada punto del territorio, proporcionando la función ajustada de la tabla el valor de la probabilidad de ignición.

Tabla 08. Parámetros del ajuste del modelo de regresión logística en función de las Covariables principales.

	$\beta_i$	CoVar <sub>i</sub>
$P(\text{ignición}) = \frac{1}{1 + \exp(-\beta_0 - \sum_{i=1}^6 \beta_i \text{CoVar}_i)}$	-4.00228712	$\beta_0$
	0.00743858	Nº Rayos próximos
	0.01508083	Pendiente (grds)
	0.09765838	T. Máxima (°C)
	-0.00834747	HR Mínima (%)
	0.00162938	Vel Máxima (m/s)
	-0.00257660	Precipitación (l/m <sup>2</sup> )

Una alternativa a la aproximación anterior sería utilizar el propio modelo probabilístico obtenido como resultado del análisis conjunto histórico del banco de datos de rayos y de incendios forestales como estimador heurístico del riesgo asociada a una descarga localizada en un lugar. En esta línea los resultados mostrados en la gráfica derecha de la figura 27 relativos a la distribución sobre el territorio de la Comunitat proporcionarían ya un valor de este nivel del riesgo, avalado por la documentación histórica, que permitiría la comparación entre impacto simultáneos o próximos en el tiempo. La implementación en un procedimiento operativo solo precisaría acceso a la información proporcionada por la red de vigilancia de las descargas eléctricas (tal como se esquematiza en la figura 48). La visualización de la información como capa de información en el contexto de otros planos de información se ajustaría fácilmente a una herramienta informática. Al mismo tiempo el sucesivo refinamiento de la base de datos (incluyendo las actualizaciones con la información reciente) permitiría ajustar la representatividad de los resultados.



Figura 48. Esquema de la funcionalidad de una herramienta de monitorización del riesgo de incendio asociado a las descargas eléctricas producidas

En el presente trabajo se ha desarrollado un prototipo de simulador para ilustrar la potencialidad de la herramienta en una hoja Excel. En la figura 49 se muestra un ejemplo con los registros reales de rayos para uno de los días recogidos en la base de datos analizada.

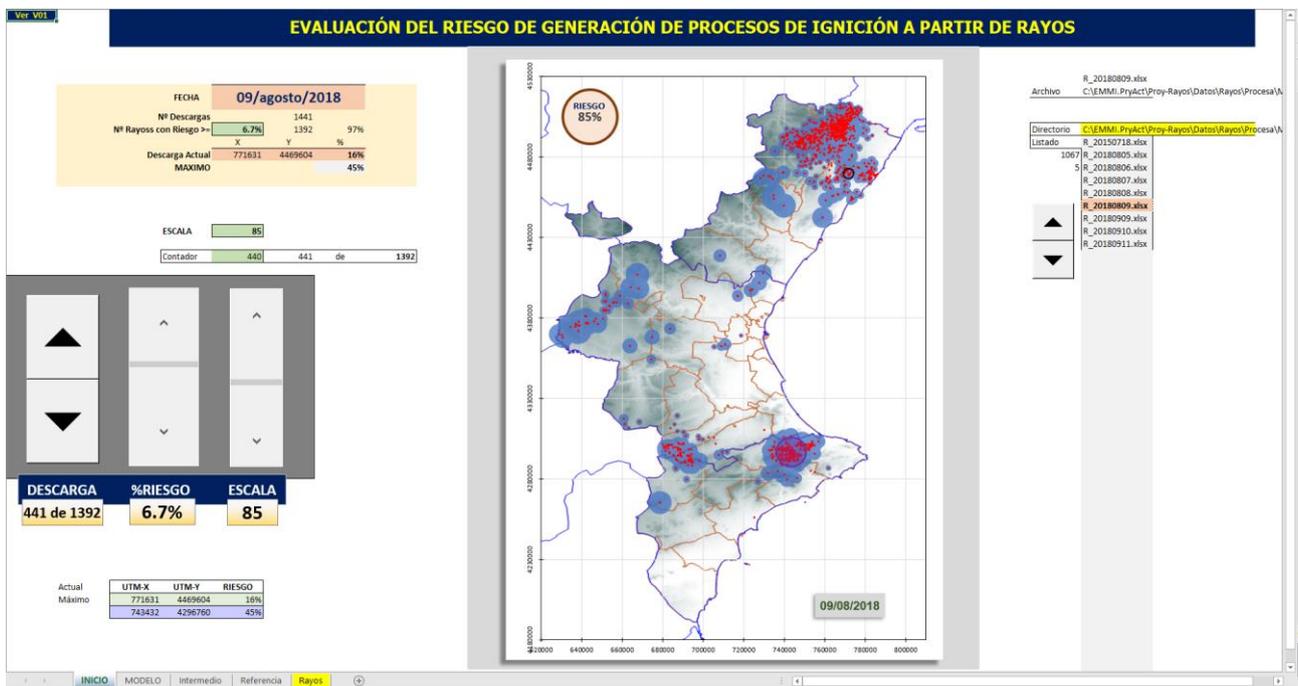


Figura 49. Ejemplo del prototipo del modelo heurístico incorporado en una hoja de excel.



---

## RECAPITULACIÓN Y CONCLUSIONES.

---

Es una evidencia que los rayos constituyen la principal causa natural de incendios forestales, con una relevancia creciente tanto por su contribución relativa al número de episodios como por la magnitud del impacto sobre el terreno afectado. En el marco del presente proyecto se exploran las relaciones entre la ocurrencia de rayos y la contingencia de que desemboque en un fuego en superficie forestal. Esta cuestión ha sido objeto de numerosos trabajos científicos que han abordado el tema desde muy diferentes tratamientos, lo que da una primera idea de que el ámbito de conocimiento no está aún bien consolidado. En general, los esfuerzos dedicados se pueden agrupar en dos grandes categorías: los orientados a la caracterización del territorio respecto al riesgo de fuego por rayos, trabajando sobre escalas temporales largas, con pretensiones de gestión del terreno, y las desarrolladas sobre escalas más cortas, más centradas en los factores ambientales que condicionan la ignición y principalmente orientados a la gestión de los recursos de extinción/prevención.

La consolidación de una red experimental de monitorización de las descargas eléctricas en todo el territorio Peninsular ha venido proporcionando una amplia base documental respecto a las principales características de los impactos de rayos nube-suelo, susceptible de combinarse con los registros históricos de incendios forestales, en los que cada vez se registra con mayor fiabilidad el origen inicial de la ignición. Un aspecto relevante de la actividad eléctrica atmosférica es que, quizás debido a su propia naturaleza, aún persiste un importante déficit de conocimiento que abarca tanto a las condiciones que la desencadenan y desarrollo de las descargas.

En la Comunitat Valenciana los registros históricos de incendios sistemáticamente documentados se remontan a 1968, periodo en el que aproximadamente una cuarta parte de entre los de causas conocida tienen su origen en una descarga eléctrica. La progresión documental muestra una disminución del porcentaje de incendios de causa desconocida, en gran medida en favor de los iniciados por rayos. Esta evolución es especialmente abrupta a partir de 1997, en que la proporción de incendios de origen desconocido decae drásticamente, con un correspondiente incremento en las debidas a rayos.

La base de datos documental sobre rayos disponible para la Comunitat Valenciana cubre el periodo 2002-2019, con diferencias en la calidad de la información, de manera que solo a partir del 2009 se registran coordenadas geográficas de las descargas, y solo a partir de 2011 se adjuntan además las características físicas de las mismas.

La asignación de un rayo como causa de un incendio es fuente de cierta incertidumbre dado que es posible cierto periodo de latencia entre la descarga y el fuego, así como cierto recorrido de la ignición hasta que se resuelve en una llama superficial. En el presente análisis se han asociado a un fuego todas aquellas descargas producidas en unos intervalos de tiempo y espacio próximos al momento y lugar de inicio del incendio, lo que puede ocasionar un previsible incremento el número de rayos contabilizados como potencialmente causantes de fuegos. Del mismo modo, algunos incendios declarados como originados por rayos no pudieron asignarse a una descarga concreta.

La asignación de los valores ambientales que acompañan a la descarga constituye la fuente de mayor indeterminación, al trabajar con valores diarios (que no discriminarían por el momento de ocurrencia) y con una red de estaciones de medida necesariamente dispersa.

En gran medida el trabajo realizado en el marco del proyecto ha consistido en depurar, estructurar y organizar la información de partida relativa al banco de datos explotable de rayos e incendios forestales. Se ha conseguido una base de datos consistente, centrada en el periodo 2011 a 2018 por coincidir con la documentación de mejor calidad de los dos ámbitos. Los registros se combinaron con la información complementaria de interés, cartográfica y ambiental. La información se depuró de aquellos valores anómalos y se prescindió de registros repetidos o con información incompleta. Finalmente se obtuvieron más de ciento treinta y dos mil descargas distribuidas a lo largo del terreno forestal de la Comunitat, acompañadas de medidas representativas de la actividad eléctrica, incendios asociados, la orografía y cobertura del terreno, y de factores ambientales atmosféricos (temperatura, humedad, etc).

El análisis del banco de datos ha puesto de manifiesto algunos aspectos relevantes de la realidad de las descargas eléctricas, en particular de aquellas asociadas a incendios forestales:

- # el escenario temporal analizado de ocho años muestra una variabilidad en el número de rayos registrados y de aquellos asociados a incendios con un comportamiento oscilante y sin una tendencia temporal clara; sin embargo, la proporción entre unos y otros no se mantiene (curva de probabilidad en diente de sierra),



lo que sugeriría que no están funcionando del mismo modo todos los años los factores que condicionarían los procesos de ignición/fuego;

- # la distribución de impactos por rayos sigue un patrón espacial asociado en gran medida a la orografía del terreno, pero concentrado en algunos puntos especialmente del interior de Castellón;
- # la distribución de los impactos por rayos asociados a incendios forestales muestra una forma que resulta en cierto grado similar en términos generales, con las mayores concentraciones en la mitad interior del territorio;
- # la estimación de los porcentajes de rayos asociados a incendios forestales, respecto a las descargas totales, muestra una distribución espacial diferente a las anteriores por separado, con algunos máximos bien definidos, siempre ligados al terreno montañoso;
- # la revisión de los diferentes factores con potencial influencia sobre el inicio de un fuego forestal tras una descarga eléctrica no muestra, para las variables analizadas, una relación definitiva. Previsiblemente porque todas contribuyan en un cierto grado y porque el proceso que desencadena la ignición con posterior fuego en superficie involucra muchos procesos poco conocidos y mal determinados, lo que se traduce en un importante grado de aleatoriedad;
- # de las características del propio rayo, la que parece relacionarse mejor con la posibilidad de un incendio es el número de descargas próximas. Ni la intensidad ni la polaridad parecen contribuir a la probabilidad de ignición;
- # en el caso de la orografía, solo la pendiente destaca con cierta correlación positiva entre probabilidad e inclinación de la superficie;
- # el análisis de la influencia de la cobertura vegetal refleja claramente una gran diferenciación en la distribución de rayos, previsiblemente indicando la propia extensión de la distribución de los ecosistemas naturales en la Comunitat, pero sin grandes sesgos porcentuales en la estimación de probabilidad ocurrencia de descargas eléctricas ligadas a incendios;
- # los factores meteorológicos chequeados muestran relaciones en general débiles, salvando la contribución de indeterminación en la asignación de los valores concretos al punto/momento de la descarga:
  - la influencia de temperaturas elevadas y humedades bajas previsiblemente se relacionan con el estado de la vegetación como combustible, más que como condicionante directo de la ignición;
  - el viento pudiera afectar más al desarrollo posterior del incendio que al propio proceso de afloramiento de llama en superficie;
  - la precipitación es un factor generalmente disuasorio del inicio de un conato de incendio al suponer un aumento de la humedad del combustible; la relación experimental obtenida no es muy clara, quizás enmascarada por el hecho de trabajar con niveles medios diarios de lluvia y por las dificultades de asignar valores concretos de una magnitud que se distribuye tan irregularmente a partir de una red dispersa;
  - la inclusión en el análisis de la caracterización de la masa aérea (a partir de los dos factores considerados) tampoco proporcionó resultados discriminantes, quizás porque se trata de aspectos más condicionantes del desarrollo de actividad convectiva, susceptible de generar actividad eléctrica que contribuir al inicio de una ignición; adicionalmente, y aunque se trata de efectos a mayor escala, cabría revisar la asignación de los valores desde un punto distante en tiempo y espacio;

La posibilidad de incluir los resultados en un modelo operativo se abordó bajo la premisa de alimentar un algoritmo que proporcionase información del riesgo de ignición derivado de la ocurrencia efectiva de una serie de descargas eléctricas sobre el terreno de la Comunitat Valenciana. Descartado un modelo físico de ignición, de formulación compleja y con necesidades de alimentación extremadamente difíciles de obtener, se valoraron aproximaciones estadísticas:

- # por una parte, la ocasionalidad de un incendio constituye en realidad una variable binaria (ocurrencia o no ocurrencia), por lo que se presta a su descripción mediante un modelo de regresión logística, en el que la probabilidad del suceso viene descrita en función de las magnitudes elegidas como covariantes; en el presente estudio, tras diferentes ensayos, se ajustó el banco de datos a un modelo con seis variables,
- # por otra parte, el propio banco de datos experimental proporciona un modelo heurístico de evaluación real del riesgo de que un rayo se asocie a un incendio, extendido a todo el territorio, en que dicho valor de la



probabilidad integra en si mismo el resultado del forzamiento de todos los factores contribuyentes; en el presente trabajo se preparó un prototipo de simulador basado en esta aproximación, con las siguientes valoraciones:

- el procedimiento proporciona de manera sencilla y rápida una evaluación del riesgo potencial de una descarga eléctrica localizada en algún punto del territorio, y la comparación con otras producidas en tiempos próximos, con las que se pretende comparar;
- solo precisa ser alimentado en tiempo real de los puntos de impacto de los rayos que se están produciendo, información que resultaría de fácil acceso con los recursos actuales;
- el esquema descansa sobre la explotación del banco de datos histórico, susceptible de refinarse con cierta facilidad, a la vez que se va incrementando su representatividad con el tiempo, al incorporarse las nuevas situaciones; igualmente se prestaría a trabajar con diferentes estimaciones de la distribución de probabilidad, en función de la época del año o de ciertas condiciones generales simples.

## **NUEVAS PROSPECCIONES.**

---

Sobre los mismos presupuestos desarrollados en los trabajos expuestos, el progreso en los alcances reportados podría venir de la reducción de la incertidumbre en la información con la que se ha trabajado en una primera aproximación al problema, en dos líneas principales:

- refinando la relación entre los rayos registrados y los incendios realmente producidos por una descarga eléctrica,
- mejorando la asignación más precisa de los valores de las diferentes magnitudes consideradas en el punto de impacto, determinando los valores más próximos (en tiempo y espacio) a la descarga; esta limitación procede de la disponibilidad de una red de sensores necesariamente limitada, con el error inherente a la extrapolación de la medida desde los puntos de muestreo al momento/lugar del impacto eléctrico; la posibilidad de disponer de valores continuos sobre una rejilla espacial (con la complejidad de cálculo que representa) soslayaría esta limitación, con diferentes opciones:
  - ✓ campos meteorológicos de reanálisis, salidas de modelos meteorológicos de simulación;
  - ✓ rejilla de precipitación interpolada de alta resolución (0.5 grd).

Otro aspecto de posible avance sería la incorporación de nuevas realidades en el análisis que no han sido tenidas en cuenta hasta el momento. En este sentido cabría explorar la disponibilidad de información sobre el grado de humedad de la vegetación como factor determinante en el inicio de una ignición (mucho más relevante que la medida del contenido de vapor de agua en la propia atmosfera).



## BIBLIOGRAFÍA.

---

La bibliografía que se presenta ha sido consultada en el desarrollo de los trabajos, aunque no necesariamente aparece referenciada en el texto.

Análisis de causas de incendios forestales en la Comunitat Valenciana. periodo 2009-2018.  
Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient, Canvi Climatic i Desenvolupament Rural.

Joseph R.Dwyer, Martin A.Uman, 2014, The physics of lightning, Physics Reports, Volume 534,  
Issue 4, Pages 147-241

Anderson Kerry; 1993; Lightning-caused fire occurrences: an overview; Proceedings of the 6th  
Western Region Fire Weather Committee Scientific and Technical Seminar

Anderson Kerry; 2002; A model to predict lightning-caused fire occurrences; International Journal of  
Wildland Fire, 2002, 11, 163–172

Andrew J. Dowdy, Graham A. Mills, Klara Finkele and William de Groot; 2009; Australian fire  
weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire  
Weather Index; The Centre for Australian Weather and Climate Research; Technical Report No. 10

Andrew J. Dowdy and Graham A. Mills; 2009; Atmospheric states associated with the ignition of  
lightning-attributed fires; The Centre for Australian Weather and Climate Research; Technical Report  
No. 019

Andrew J. Dowdy, Graham A. Mills, Klara Finkele & William de Groot; 2010; Index sensitivity  
analysis applied to the Canadian Forest Fire Weather Index and the McArthur Forest Fire Danger  
Index; Meteorol. Appl. 17: 298–312

Andrew J. Dowdy and Graham A. Mills; 2011; Atmospheric and Fuel Moisture Characteristics  
Associated with Lightning-Attributed Fires; Journal of Applied Meteorology and Climatology; 51; pp  
2012-2037

Cardo, Jose Antonio & Calvo-Sanchez, Javier & León, Francisco. (2015). Pronóstico de rayos  
mediante el modelo no hidrostático HARMONIE. 10.13140/RG.2.1.3714.4486.

Castedo-Dorado F, Rodriguez-Perez J. R., Marcos-Menendez J. L., Alvarez-Taboada M. F.; 2011;  
Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW  
Spain); Forest Systems 20(1), 95-107

Faba-Fernandez, M., Blanco-Vazquez, M.A., Blanco-Oviedo, J, Castedo-Dorado, F., Rodriguez-  
Perez, J.R.; 2013; Caracterización de los incendios forestales producidos por rayo en Castilla y León  
en el período 2000-2010; &º Congreso Forestal Español; Vitoria-Gasteiz.

Felipe Rodríguez Verdú; 2010; Análisis geográfico de los incendios forestales de la España  
peninsular en el período 1991-2005; Tesis doctoral; Universidad de Alcalá de Henares.

Francisco Pérez Puebla; J. Miguel Gutiérrez Núñez y F. Javier López Ruiz; 2000; Análisis de la  
distribución temporal y espacial de los rayos registrados por la red de detección del I.N.M. en el  
período de 1992-1995; Comunicación AII-7; IV Simposio Nacional de Predicción, Ministerio de  
Medio Ambiente

Franco Radín C., Revert Ferrero A., Mediavilla González J. y Núñez Mora J.A.; 2018; Análisis  
estadístico de incendios forestales en la Comunitat Valenciana y modificación del índice de  
peligrosidad de incendios (PIF); SEXTO SIMPOSIO NACIONAL DE PREDICCIÓN — MEMORIAL  
ANTONIO MESTRE; Madrid.

García Gómez R.; 2016; Evaluación de la precisión en la detección de descargas eléctricas nube-  
tierra de la red de detección de rayos de AEMET; Trabajo Fin de Master, Máster en Teledetección y  
Sistemas de Información Geográfica; Universidad de Oviedo.

Graham Mills & Andrew Dowdy; 2011; Predicting fire from dry lightning; Fire Note; Bushfire CRC Ltd  
2011



- Harrison R.G.; 2004 The global atmospheric electrical circuit and climate; *Surveys in Geophysics*, 25 (5-6). pp. 441-484
- Jack Wierzbowski A, Mark Heathcott B and Michael D. Flannigan C; 2002; Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada; *International Journal of Wildland Fire*, 11, 41–51
- Jeffrey P. Prestemon, Todd J. Hawbaker, Michael Bowden, John Carpenter, Maureen T. Brooks, Karen L. Abt, Ronda Sutphen, and Samuel Scranton; 2013; *Wildfire Ignitions: A Review of the Science and Recommendations for Empirical Modeling*; General Technical Report SRS-171; United States Department of Agriculture; Forest Service.
- José Ángel Núñez Mora, Jesús Riesco Martín, Manuel Antonio Mora García; 2019; *Climatología de descargas eléctricas y de días de tormenta en España*; Ministerio para la Transición Ecológica, Agencia Estatal de Meteorología
- José Gómez Castaño; Representación de datos meteorológicos en la operación de ferrocarriles. Detección de caídas de rayos; *Revista Vía Libre – Técnica*
- Lucy Ellen Burris; 2015; *Characteristics of wildfire-igniting lightning in the western United States*; Degree of Master of Science; Colorado State University
- Joseph R. Dwyer, Martin A. Uman, 2014, *The physics of lightning*, *Physics Reports*, Volume 534, Issue 4, Pages 147-241
- Martínez-Fernández, J., Chuvieco, E., and Koutsias, N.M; 2013; Modelling long-term fire occurrence factors in Spain by accounting for local variations with geographically weighted regression, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 311–327
- Marty Ahrens; 2013; *Lightning fires and lightning strikes*; National Fire Protection Association; Fire Analysis and Research Division.
- Miriam L. Rorig and sue A. Ferguson; 1999; *Characteristics of Lightning and Wildland Fire Ignition in the Pacific Northwest*; *Journal of applied meteorology*; Vol 38; pp 1565-1575
- Miriam Rorig. Stacy A. Drury; 2015; *The Fire Weather Accuracy and Lightning Ignition Probability System*; Report number: JFSP Project ID 10-1-07029
- Nauslar Nicholas J. ;2014; *Examining the Lightning Polarity of Lightning Caused Wildfires*; 23th International Lightning Detection Conference; Tucson-Arizona
- Nicholas J. Nauslar; 2014; *Examining the Lightning Polarity of Lightning Caused Wildfires*; 23<sup>rd</sup> International Lightning Detection Conference; Tucson, Arizona, USA
- Nicholas Read; 2018; *Statistical models for the location of lightning caused wildfire ignitions*; ORCID 0000-0002-8540-464X; School of Mathematics & Statistics; University of Melbourne.
- Nicolau Pineda, Joan Montanyà, Oscar A. van der Velde; 2014; *Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia*; *Atmospheric Research*; 135–136, pp 380-387
- Ordóñez C, Saavedra A., Rodríguez-Pérez J.R., Castedo-Dorado F., Covián E.; 2012; Using model-based geostatistics to predict lightning-caused wildfires; *Environmental Modelling & Software* 29; 44-50
- Pacheco Angulo, C. E., Aguado Suárez, I. y Nieto Solana, H.; 2009; *Análisis de ocurrencia de incendios forestales causados por rayo en la España peninsular*, *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 232-249. ISSN: 1578-5157
- Pineda, Nicolau & Montanyà, Joan & Van der Velde, Oscar. (2012). *Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia*. *Atmospheric Research*. 135.10.1016/j.atmosres.2012.07.011
- Ricardo Sanz, Miguel Hernández, Andrea José, Monika Przeor, Pino González, Natalia Prats y Ernesto Barrera; 2016; "Análisis de los rayos registrados en Canarias en el periodo 2006-2015"; *Calendario meteorológico*. 2017, p. 241-254.
- Sander Veraverbeke, Brendan M. Rogers, Mike L. Goulden, Randi R. Jandt, Charles E. Miller, Elizabeth B. Wiggins & James T. Randerson; 2017; *Lightning as a major driver of recent large fire years in North American boreal forests*; *NATURE CLIMATE CHANGE*; Vol 7.



The Fire Environment—Innovations, Management, and Policy; 2007; second Fire Behavior and Fuels conference; Destin, Florida

Vilar del Hoyo, L., Martín Isabel, M.P. & Martínez Vega, F.J. Logistic regression models for human-caused wildfire risk estimation: analysing the effect of the spatial accuracy in fire occurrence data. *Eur J Forest Res* 130, 983–996 (2011).

Vicente López, FJD.; Crespo Abril, F. 2012; A new wildland fire danger index for a Mediterranean region and some validation aspects. *International Journal of Wildland Fire*. 21(8):1030-1041. doi:10.1071/WF11046.

Vilar, Lara & Nieto, Hector & Martín, Maria. (2010). Integration of Lightning-and Human-Caused Wildfire Occurrence Models. *Human and Ecological Risk Assessment*. 16. 340-. 10.1080/10807031003670469.

Yonghe Wang, Kerry R. Anderson; 2010; An evaluation of spatial and temporal patterns of lightning- and human-caused forest fires in Alberta, Canada, 1980–2007; *International Journal of Wildland Fire*, 19, 1059–1072.

Weber, K. T. and G. Russell, 2003, Modeling Lightning as an Ignition Source of Rangeland Wildfire in Southeastern Idaho, *African Journal of Range and For-age Science*, 20(2):127

Wierzchowski Jack, Heathcott Mark, Flannigan Michael D.; 2002; Lightning and lightning fire, central cordillera, Canada; *International Journal of Wildland Fire*, 11, 41–51.

