

FACTOR DE TORMENTAS

Evelio Álvarez Lamata

GPV del CMT en Aragón, La Rioja y Navarra. INM

RESUMEN

Se ha procedido a calcular un índice que informe sobre la probabilidad de ocurrencia y la localización de tormentas estivales en Aragón, La Rioja y Navarra mediante la cuantificación de ascensos en la atmósfera, determinación de zonas potencialmente inestables, búsqueda de fronteras térmicas y algunas consideraciones climatológicas. Como variables iniciales se ha elegido un conjunto de campos básicos o derivados, con los que normalmente se trabaja cuando se estudian aspectos relacionados con la actividad de tipo convectivo. Estos campos son salidas de los modelos de predicción operativos y se encuentran disponibles en el entorno Mcidas para los distintos periodos de predicción, utilizando la ventana entre 39°N - 44°N de latitud , y 1°E - 3°W de longitud.

1. Introducción

Dado que algunas de las variables elegidas están correlacionadas entre sí, y para que solo intervengan variables independientes, se realiza un análisis en componentes principales que nos permita limitar al máximo la pérdida de información en el sentido de varianza acumulada.

Este índice se está calculando de forma operativa desde el año 1998 y los resultados obtenidos se han evaluado empleando los datos suministrados por la red de descargas del INM.

En virtud de los resultados estadísticos, al ser el rayo la principal causa de incendio en Aragón se ha introducido específicamente este fenómeno meteorológico como factor de riesgo dentro del índice de ignición.

Para determinar la forma en que los rayos influyen en la ocurrencia de incendios es necesario realizar un estudio previo sobre la ocurrencia de descargas eléctricas en los días en que se han producido incendios causados por rayo.

2. Climatología de tormentas

Desde el año 1997 se viene realizando un estudio sobre las descargas eléctricas que afectan a la demarcación del Centro Meteorológico Territorial en Aragón, La Rioja y Navarra. Los resultados pueden verse en la ponencia "Climatología de descargas eléctricas" de este Simposium.

3. Climatología de incendios originados por rayo

Con los incendios originados por rayos durante el periodo de tiempo comprendido entre 1983 y 1996 se han realizado una serie de estadísticas básicas con objeto de detectar patrones espaciales de ocurrencia de incendios. También en este caso se ha utilizado una rejilla de 0.2 grados de latitud de brazo, como célula base para efectuar los contorneos.

En el calculo del número de incendios originados por rayo y por comarca se nota que las zonas donde más incendios por rayo han ocurrido son la zona de Teruel, la zona de Jaca y la zona del Bajo Aragón. La zona del Moncayo es donde menos incendios ha ocurrido en ese periodo de tiempo. No obstante, hay que tener en cuenta la diferente superficie en las distintas zonas, así como recordar que se trata de incendios exclusivamente forestales y que por lo tanto también tendrá su influencia el tanto por ciento de superficie arbolada respecto al total de superficie forestal. Para aportar información sobre como el área de las zonas modifica los anteriores resultados se calculan los siguientes productos:

Con el objeto de conocer la densidad de incendios por rayo en cada zona, ésta se calcula como: (Número de incendios producidos por rayo) / (Número total de cuadrículas de la zona). (Figura 1). Se observa que

las zonas de mayor densidad siguen siendo la zona de Jaca, la del Bajo Aragón y la de Teruel. Sin embargo vemos que el orden es el siguiente: Bajo Aragón, Teruel y Jaca. Si a la luz de estos resultados analizamos la imagen de la cobertura vegetal sobre Aragón observamos que mientras que las zonas de Teruel y Jaca tienen abundante vegetación que podría explicar el mayor número de incendios forestales, no ocurre lo mismo con la zona del Bajo Aragón en la que la distribución espacial de las masas forestales presenta una mucho mayor dispersión; posiblemente habría que pensar que la abundancia de incendios se deba al estado vegetativo en que se encuentra la masa forestal. La zona del Ebro, seguida con la zona del Moncayo son las que tienen los mínimos valores, lo que concuerda con las densidades de rayos registradas en el Valle del Ebro.

Con el objeto de normalizar estos resultados con vistas a la obtención de unos pesos que nos puedan resultar útiles a la hora de discretizar las diferentes zonas se procede a presentarlos de varias formas alternativas: Proporción de (número de incendios) / máximo. [Formula 1], que muestra claramente, que las zonas que más alejadas se encuentran con respecto al máximo (que se está en el Bajo Aragón) son: Valle del Ebro, Moncayo, Bajo Cinca y Calamocha. La cobertura vegetal en todas estas zonas es baja o por lo menos no excesivamente abundante, por lo que los resultados obtenidos parecen tener su lógica. Sin embargo al considerar el alto número de descargas eléctricas que se registran en la zona de Calamocha, este dato no parece estar de acuerdo con el bajo valor obtenido en ella. Las zonas de Sobrarbe y Calatayud presentan valores intermedios.

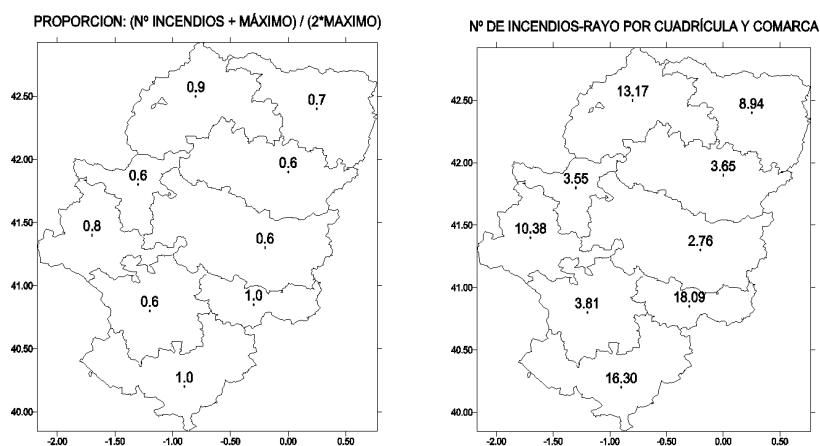


Figura 1: Densidades de incendios-rayo por comarca y por cuadrícula 0,2 x 0,2 y su normalización.

De cualquier forma, el fuerte gradiente que se obtiene entre zonas adyacentes obliga a tener precaución a la hora de asignar densidades a las cuadrículas situadas que participan de dos zonas diferentes. Por eso se puede intentar suavizar los problemas de contorno mediante algún algoritmo como el siguiente: Proporción de (número de incendios + máximo) / (2*máximo). [Formula 2].

4. Estudio de la causalidad incendio-rayo

Para todos los días en los que se han producido incendios por rayo se han representado sobre el mapa de Aragón las descargas eléctricas registradas ese día a partir de los datos de la Red de Descargas Eléctricas del Instituto Nacional de Meteorología, la precipitación diaria acumulada obtenida del Módulo de Acumulación de la Red de Radares y los incendios correspondientes (Figura 2).

En líneas generales puede decirse que la ocurrencia de incendios por rayo parece estar ligada a concurrencia de poca precipitación con la existencia de rayos. No parece que sean necesarias densidades de rayos muy altas, pues estas suelen venir acompañadas de altos valores de precipitación que tendrían el efecto de apagar los incipientes focos de incendios. Por el contrario, parecen propicias aquellas zonas con carácter de frontera de los núcleos compactos de actividad tormentosa, pues en ellas la precipitación recogida suele ser baja (con poca capacidad de extinción) y los rayos (que no necesitan ser numerosos) pueden dar origen a incendios. En la figura 2 se pueden observar diferentes tipos de distribuciones espaciales: a) Núcleos compactos de precipitación con alta densidad de descargas eléctricas. b) Zonas de precipitación moderada con alta densidad de descargas eléctricas. c) Zonas de precipitación moderada o

fuerte con baja densidad de descargas eléctricas. d) Zonas residuales con precipitaciones débiles y baja densidad de descargas eléctricas.

En el caso que nos ocupa vemos que los incendios que han prosperado se encuentran ubicados en la última de estas categorías, con precipitaciones de 2 a 4 litros y situados en el borde de la zona de precipitaciones importantes que afectan al sur de la provincia de Teruel. Este estudio se ha realizado de una manera subjetiva, mediante conteo de casos pertenecientes a cada una de las categorías anteriores, con los resultados anteriormente indicados y que están en concordancia con la experiencia de los técnicos en extinción de incendios, que apuntan a las "tormentas secas" como causa principal de los incendios en Aragón.

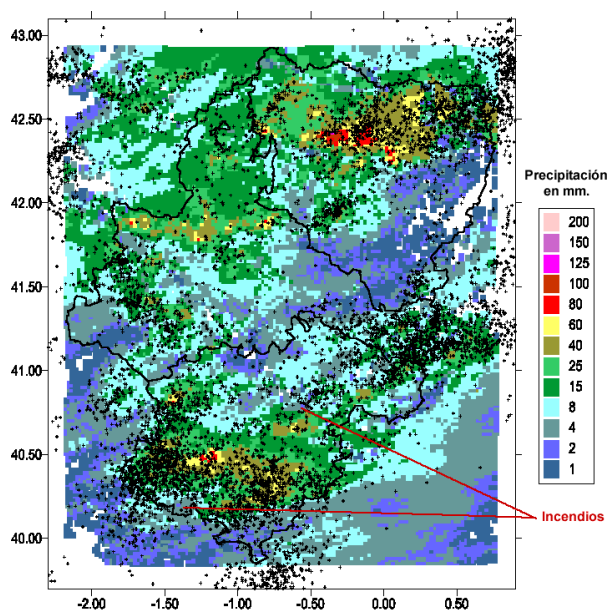


Figura 2: Ejemplo de representación de rayos-precipitación-incendios.

Así mismo, del cruce de los datos de rayos e incendios se ha podido deducir que se da un número no despreciable de casos en los que el foco de fuego puede permanecer en un estado latente varios días antes de detectarse. Se piensa que esto es debido a que el estado más o menos húmedo del mantillo vegetal en el suelo, puede determinar la rapidez con la que se hace patente el incendio. En estas circunstancias (de focos muy pequeños y por lo tanto de difícil detección) es cuando el suministro de una información sobre la densidad y característica de los rayos en las últimas horas puede resultar de crucial importancia para la vigilancia y detección de estos focos por parte del personal destinado en las torres de vigilancia o mediante el uso de medios aéreos.

5. Cálculo del factor de tormentas

A la vista de los resultados anteriores se ha procedido a calcular un factor que informe sobre la probabilidad de ocurrencia de rayos en Aragón, es decir, la localización de tormentas productoras de descargas eléctricas mediante la cuantificación de ascensos en la atmósfera aunque la correspondencia entre la potencia de estos ascensos y el número de descargas no tiene porque darse siempre.

Una forma de abordar el problema es considerar las variables que se piensa que tienen influencia en la ocurrencia de tormentas, a partir de estudios precedentes y de la experiencia en la predicción de tormentas en la zona de interés. Una vez que las m variables han sido elegidas, se constata que algunas están correlacionadas entre sí. Como nosotros estamos interesados en que las variables utilizadas sean independientes, deberemos realizar un análisis en componentes principales que además nos permita limitar al máximo la pérdida de información en el sentido de varianza acumulada. En este nuevo espacio de componentes principales la ocurrencia de tormenta estará representada por un punto definido por n coordenadas (siendo n menor que el número de variables iniciales).

Como variables iniciales se ha elegido un conjunto de campos básicos o derivados, con los que normalmente se trabaja cuando se estudian aspectos relacionados con la inestabilidad atmosférica. Estos campos son salidas de los modelos de predicción y se encuentran disponibles en el entorno Mcidas para los plazos de predicción que nos interesan. Estos campos se agrupan en dos subconjuntos dependiendo de la escala espacio temporal de la que son representativos y por lo tanto se parte de las salidas de los dos modelos numéricos de predicción operativos en el Instituto Nacional de Meteorología (HIRLAM-0,5 para la escala sinóptica y HIRLAM-0,2 para la escala meso-beta), considerando solamente la ventana determinada por los límites siguientes: Latitud: 39 N - 44 N . Longitud: 1 E - 3 W.

Por tanto, se realiza una predicción para el periodo de validez del índice deseado. Este periodo debe cubrir las horas centrales del día, realizándose actualmente los cálculos para las 14h., 17h., 20h. y 23h. oficiales, y reteniendo en cada punto de rejilla el máximo valor de las cuatro predicciones realizadas por separado.

Se ha realizado un análisis de escala considerando en cada campo, las unidades y los coeficientes necesarios para que los resultados del mismo se encuentren en un intervalo de valores, que permitan obtener un resultado adimensional del índice de tormentas con valor máximo de 2 puntos.

Los campos utilizados para cada periodo de predicción y los intervalos en los que pueden aportar información son:

5.1 Escala Sinóptica (Hirlam 0.5)

Advección diferencial de vorticidad geostrofica 500/300	Intervalo: [-1,2 1,2]
Advección diferencial de espesores 500/1000 .	Intervalo: [-1,2 1,2]
Divergencia del vector Q de Hopkins (500 - 850 hPa).	Intervalo: [-1,2 1,2]
Índice de inestabilidad Total de Totales.	Intervalo: [0 1]
Índice de inestabilidad K.	Intervalo: [-0,2 0,6]
Convergencia de humedad en 925 hPa.	Intervalo: [-0,3 0,8]
Convergencia de humedad en 850 hPa.	Intervalo: [-0,3 0,4]
Advección de temperatura en 925 hPa.	Intervalo: []
Advección de temperatura en 850 hPa.	Intervalo: []
Cobertura nubosa.	Intervalo: []

El cálculo de la ecuación se realiza en Mcidas mediante operación con los grids correspondientes a través de programas McBasic, obteniéndose un campo final representativo de la inestabilidad atmosférica a escala sinóptica que se encuentra calado en un intervalo de [0 a 1] puntos. Se efectúa una interpolación de la rejilla a una resolución de 0.2 grados para poder emplearla posteriormente en la composición del índice de tormentas total.

5.2 Escala meso-beta (Hirlam 0.2)

Precipitación y precipitación convectiva	Intervalo: []
Convergencia del campo superficial de viento.	Intervalo: []
Tendencia de la presión en las próximas tres horas.	Intervalo: []
Topografía.	Intervalo: []

De forma similar se calcula la contribución de los procesos a mesoescala, también calado en el intervalo de [0 a 1] puntos.

5.3 Índice de tormentas (Escala 0.2)

Finalmente se procede al cálculo del índice total mediante suma de los ascensos en las dos escalas y que por lo tanto puede presentar valores comprendidos entre 0 y 2 puntos. La resolución es de 0.2 grados de latitud, nuevamente. Por lo tanto: Ascensos totales (ÍNDICE DE TORMENTAS). Intervalo: [0 a 2].

6. Análisis de componentes principales

Los resultados para cada una de los periodos predicción de este índice se almacenan para su posterior verificación mediante comparación con las descargas eléctricas registradas en la ventana de interés. Asimismo, diariamente se somete a un seguimiento y verificación.

Los resultados de las verificaciones de las campañas de 1998 y 1999 se revelan como muy satisfactorios, pues se obtienen probabilidades de detección (POD) para zonas individualizadas de 0.70 con una Probabilidad de falsa alarma (FAR) de 0.37. No debe olvidarse que también estamos de alguna forma, evaluando la pericia de los propios modelos para representar adecuadamente la situación atmosférica y a partir de ella desarrollar las predicciones para los distintos periodos. No obstante, a la luz de estos resultados, después de las dos campañas se ha procedido a efectuar diversos reajustes, que han afectado sobre todo a la redefinición de los factores de escala e intervalos utilizados en algunas variables particularmente sensibles. Con los datos de los años 1999 y 2000 se ha procedido a realizar un análisis de componentes principales con el fin de definir un número n de variables linealmente independientes a partir de las m variables de las que se dispone actualmente y de las cuales algunas son linealmente dependientes. A la espera de poder contar con los datos de la campaña del año 2001 que permitirá poseer una base de datos mayor, los resultados de este primer análisis efectuado son los siguientes:

Matriz de correlación entre las variables.

En esta matriz se muestra el coeficiente de correlación lineal entre cada pareja de variables que como sabemos, puede oscilar entre -1 (en este caso las variables son linealmente dependientes y el aumento de una de las variables da lugar a la disminución de la otra) y 1 (en este caso también son linealmente dependientes y el aumento de una de las variables dará lugar al aumento de la otra), pasando por 0 (donde nos encontraríamos en el caso en que fueran linealmente independientes, sin que esto quiera decir que no pueda existir alguna otra relación de tipo no lineal entre ellas). Debajo de este coeficiente de correlación aparece un p_valor que no es otra cosa que el resultado de un test estadístico, cuya interpretación sería la siguiente:

$P_valor < 0.05$: Las dos variables consideradas son linealmente dependientes con un 95% de confianza.

$P_valor > 0.05$: De las dos variables consideradas, no podemos decir con una confianza del 95%, que sean linealmente dependientes.

Si observamos la tabla, tomando como ejemplo las variables *Índice Total De Totales e Índice K*, cuya definición en términos de inestabilidad por causas térmicas es muy similar, vemos como en este caso el coeficiente de correlación es alto y positivo y el p_valor asociado es 0, lo cual nos estaría indicando la dependencia lineal entre estas dos variables. En el caso de las variables *Advección Diferencial de Vorticidad Geostrofica en el estrato de 300 a 500 hPa* y *Precipitación convectiva*, que son tratadas de diferente manera por el modelo, ya que la precipitación se incluye dentro de los procesos de parametrización física se observa que el coeficiente de correlación es muy pequeño y el p_valor asociado es superior a 0.05 (0.923), lo que indicaría con una confianza del 95% que estas dos variables son linealmente independientes.

En las tablas que se presentan a continuación aparecen los siguientes datos.

Comunalidad: Indicaría el tanto por uno de esa variable explicada por el conjunto de factores considerados. En la primera tabla aparecen unos porque se toman los trece factores (es decir todos ellos).

Factores: Es el número del factor considerado.

Valores propios: De alguna manera nos indican la variabilidad explicada por ese factor, de la nube de puntos del conjunto de todas las variables iniciales.

% de Varianza Explicada: Porcentaje de varianza conjunta (nos referimos al hablar de varianza conjunta a la varianza de la nube de puntos del conjunto de todas las variables iniciales) explicada por ese factor.

% de Varianza Acumulada: Porcentaje de varianza conjunta explicada por ese factor más todos los anteriores.

Factor n : Los números que aparecen en esta columna nos indicarían el peso de cada una de las variables en la variable factor n , que se obtendría como combinación lineal de las citadas variables iniciales.

Para seleccionar el número de factores finales, existen distintos criterios, como por ejemplo:

- Considerar aquellos factores cuyo valor propio sea mayor que uno (como en nuestro caso)
- Considerar aquellos factores cuyo porcentaje de varianza conjunta explicada sea mayor que un umbral fijado a priori (90%).

Tabla 1: Análisis de Componentes Principales para las variables a escala sinóptica: Con el umbral del 90% de variabilidad explicada sería suficiente quedarnos con los campos de Advección de vorticidad en niveles altos, Advección de espesores 500 - 1000, Divergencia del vector Q, Índice Total de Totales, Índice K y Convergencias de Humedad en niveles bajos. Desaparecen de la tabla la Desviación de la temperatura en 500 hPa, Nubosidad y las Advecciones térmicas en niveles bajos, que son las zonas no resaltadas en línea gruesa.

	COMUNALIDAD	FACTORES	VALORES PROPIOS	% VARIANZA EXPLICADA	% VARIANZA ACUMULADA
ADV.VORT.300-500	1	1	4,17842	38,0	38,0
ADV.ESP.500-1000	1	2	1,46704	13,3	51,3
DIV.Q.500+850	1	3	1,20543	11,0	62,3
IND.TOTAL.TOTAL	1	4	1,05531	9,6	71,9
INDICE K	1	5	0,88522	8,0	79,9
CONV.HUM.925	1	6	0,71374	6,5	86,4
CONV.HUM.850	1	7	0,54449	4,9	91,4
DESV.TEMP.500	1	8	0,46143	4,2	95,6
NUBOSIDAD	1	9	0,31131	2,8	98,4
ADV.TEMP.925	1	10	0,11543	1,0	99,4
ADV.TEMP.850	1	11	0,06219	0,6	100

Tabla 2: Análisis de Componentes Principales para las variables a escala meso-beta: Para conseguir superar el 90% además de la Tendencia de la presión y la precipitación, debemos también considerar la variable precipitación convectiva, quedándose descolgada únicamente la Divergencia del viento en superficie (Fila no resaltada en tabla 2).

TEND.PRES.3.H.	1	1	2,12395	53,1	53,1
PRECIPITACION	1	2	1,00165	25,0	78,1
PRECIP.CONVECT.	1	3	0,84838	21,2	99,3
DIV.VIENTO.SUP.	1	4	0,02602	0,7	100

Tabla 3: Análisis de Componentes Principales para todas las variables: Considerando todo el conjunto de variables, son las variables de tipo meso escalar las que representan el mayor porcentaje de variabilidad explicada (incluyendo la Divergencia del viento en superficie). De las variables de tipo sinóptico se mantienen las cinco primeras (en el mismo orden que antes), descolgándose el Índice K (que además en la matriz de correlaciones se observa que es linealmente dependiente con el Índice Total de Totales) y las Convergencias de Humedad en niveles bajos.

TEND.PRES.3H.	1	1	5,53050	36,9	36,9
PRECIPITACION	1	2	2,14895	14,3	51,2
PRECIP.CONVECT.	1	3	1,29321	8,6	59,8
DIV.VIENTO.SUP.	1	4	1,21902	8,1	67,9
ADV.VORT.300-500	1	5	1,06540	7,1	75,0
ADV.ESP.500-1000	1	6	0,82464	5,5	80,5
DIV.Q.500+850	1	7	0,77007	5,1	85,7
IND.TOTAL.TOTAL	1	8	0,68210	4,5	90,2
INDICE K	1	9	0,51953	3,5	93,7
CONV.HUM.925	1	10	0,39594	2,6	96,3
CONV.HUM.850	1	11	0,26524	1,8	98,1
DESV.TEMP.500	1	12	0,12067	0,8	98,9
NUBOSIDAD	1	13	0,09411	0,6	99,5
ADV.TEMP.925	1	14	0,05133	0,3	99,9
ADV.TEMP.850	1	15	0,01929	0,1	100

Tabla 4: Análisis de los Componentes Principales finales.

TEND.PRES.3H.	1	1	2,68052	33,5	33,5
PRECIPITACION	1	2	1,79975	22,5	56,0
PRECIP.CONVECT.	1	3	1,11175	13,9	69,9
DIV.VIENTO.SUP.	1	4	0,81298	10,2	80,1
ADV.VORT.300-500	1	5	0,77661	9,7	89,8
ADV.ESP.500-1000	1	6	0,61303	7,7	97,4
DIV.Q.500+850	1	7	0,18246	2,3	99,7
IND.TOTAL.TOTAL	1	8	0,02290	0,3	100

Una vez establecidas las ocho variables que se van a tener en cuenta como predictores en el Índice de Tormentas se realiza un análisis de Componentes Principales con el objeto de obtener otras ocho nuevas variables (factores) que entre si sean linealmente independientes y que como se sabe son una combinación lineal de las ocho primeras con unos coeficientes que pueden verse en la Tabla 4. Determinadas las variables que permanecen se procede a reescalar el Índice de Tormentas con el objeto de que continúe manteniendo el mismo peso relativo dentro del Índice de Ignición.