

LOS INCENDIOS FORESTALES Y LAS CONDICIONES METEOROLÓGICAS EN ARAGÓN

Evelio Álvarez Lamata

Meteorólogo Superior del Estado.

Centro Meteorológico Territorial en Aragón, La Rioja y Navarra.

Instituto Nacional de Meteorología. C/ Argualas, 40 - 2º. Zaragoza –50071.

Correo electrónico: ealvarez@inm.es

Resumen

Cada vez está más ampliamente reconocido, económica o medioambientalmente, el papel de la lucha contra los incendios forestales y su necesidad para conseguir la sostenibilidad de los recursos naturales y su adecuada gestión. Los incendios se producen durante todo el año debido a causas que van desde negligencias, hasta motivos intencionados, incluidos los causados por accidentes de todo tipo. En la Comunidad Autónoma de Aragón en los meses centrales del año se produce un aumento sustancial del número de siniestros con origen predominantemente natural. Este aumento viene determinado fundamentalmente por unas condiciones meteorológicas y climatológicas particulares, caracterizadas por elevadas temperaturas, fuerte estrés hídrico, abundante número de descargas eléctricas o episodios de viento fuerte y racheado. Este estudio de las condiciones ambientales ha permitido la confección de un Índice Combinado de Riesgo de Incendios Forestales en Aragón que se viene utilizando de forma operativa desde hace varios años.

Palabras clave: Índice de riesgo, climatología, meteorología, sostenibilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Ya en tiempos pretéritos se tenía constancia de la fuerte correlación existente entre las condiciones meteorológicas presentes en una zona en un momento dado y el grado de ocurrencia de incendios en las masas forestales del área afectada por aquellas. Asimismo eran conocidas las condiciones particularmente propicias que algunos episodios climáticos proporcionaban para la ocurrencia y repetición de incendios durante prolongados periodos de tiempo, y que podían afectar extensas áreas de territorio, incluyendo las áreas forestales.

Dada la infraestructura existente en la Comunidad Autónoma de Aragón, tanto a nivel organizativo como material y humano para la lucha contra los incendios, se creyó conveniente implementar una herramienta de predicción con funciones de alerta temprana, sobre condiciones meteorológicas adversas desde el punto de vista de la ignición y propagación de los incendios forestales en zonas diferenciadas del territorio aragonés. Con este objetivo se llegó a la firma de un Acuerdo entre la Dirección General del Medio Natural de la Diputación General de Aragón y la Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología para la elaboración, validación y puesta en operación de un nuevo Índice combinado de riesgo de incendios forestales.

Los trabajos comenzaron en noviembre de 1996 y durante las campañas estivales de 1998 y 1999 estuvo en fase preoperacional de validación, encontrándose el Índice en la actualidad totalmente desarrollado y operativo. Diariamente, hacia las 8 horas oficiales, se envía toda la información al Centro de Emergencias (SOS Aragón) a través de un enlace informático, desde el que se distribuye a las distintas dependencias con responsabilidades en la lucha contra incendios. A su vez, en el Centro Meteorológico, se recibe diariamente la información de retorno sobre los incendios detectados el día anterior. Esta información permite realizar un seguimiento del índice en tiempo real e incorporar sucesivas mejoras al ir ajustando los resultados.

En esta presentación se repasan los pasos seguidos para el diseño y construcción del citado Índice. En la sección 2 se explican los métodos utilizados para determinar y caracterizar las variables significativas en la ocurrencia de incendios forestales, con especial interés en el estudio de las descargas eléctricas de origen tormentoso. En la sección 3 se analizan y modelizan las características termohídricas, el estrés hídrico y el estado vegetativo de la cubierta forestal para determinar un Índice de Ignición, realizándose una verificación de los algoritmos utilizados mediante las campañas de dos años consecutivos. Asimismo, se calcula un Factor de propagación por el viento, un Índice Combinado de Peligrosidad y un producto de seguimiento de incendios forestales. En la sección 4 se explican los métodos operativos diarios y en la sección 5 unas breves conclusiones y perspectivas de trabajo futuro.

2. ESTUDIOS PREVIOS

El punto de partida lo constituye la base de datos de estadística de incendios forestales de Aragón, proporcionada por la Dirección General del Medio Natural de la Diputación General de Aragón, que comprende información sobre localización, causa, superficie afectada, día y hora de detección, entre otras características de los incendios ocurridos. Se ha considerado el período de 1983 a 1996, incluyendo únicamente los meses de mayo a octubre, de mayor riesgo de incendios forestales. Los datos de esta base se han cruzado con los de la

base climatológica (precipitación, temperatura, etc.) existente en el Centro Meteorológico, realizándose el estudio estadístico de las variables relacionadas al nivel de término municipal.

Los resultados de los primeros análisis pusieron de manifiesto la heterogeneidad del territorio aragonés a efectos de incendios, lo que condujo a una zonificación de la Comunidad, por regiones afines. Las variables discriminantes de las distintas zonas resultaron ser latitud, longitud, altitud, número de incendios, proporción de superficie forestal y proporción de superficie forestal arbolada. Un análisis estadístico, mediante técnicas de agrupamiento, permitió diferenciar nueve zonas, sometidas a la aprobación de los técnicos forestales usuarios del índice (Figura 1).

2.1 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. Se ha utilizado una rejilla de 0.2 grados de latitud de brazo, como cuadrícula base para efectuar los conteos y contorneos.

Con el cálculo del número de incendios originados por rayo y comarca (Figura 2) se ve que donde más incendios por rayo han ocurrido son la zona de Teruel, la zona de Jaca y la zona del Bajo Aragón, siendo la del Moncayo la que menos. No obstante, hay que tener en cuenta la diferente superficie en las distintas zonas y que se trata de incendios exclusivamente forestales por lo que también tendrá su influencia el tanto por ciento de superficie arbolada.

Para ver como el área de las zonas modifica los anteriores resultados se puede calcular el (Número de incendios producidos por rayo) / (Número total de cuadrículas de la zona) con lo que el orden creciente es Bajo Aragón, Teruel y Jaca. Pero 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 y posiblemente 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.

Con vistas a la obtención de unos pesos que nos puedan resultar útiles a la hora de discretizar las diferentes zonas se procede a normalizar estos resultados y suavizar el fuerte gradiente que se obtiene entre zonas adyacentes a la hora de asignar densidades a las cuadrículas situadas que participan de dos zonas mediante un algoritmo del tipo: $\text{Proporción del (número de incendios + máximo) / (2 * máximo)}$. (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 son 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, resultan propicias aquellas zonas con carácter de frontera de los núcleos compactos con actividad tormentosa, pues en ellas la precipitación recogida suele ser baja (con poca capacidad de extinción) y los rayos (que no necesitan ser numerosos) si que pueden dar origen a incendios.

Así, en la figura 3 se pueden observar diferentes tipos de distribuciones espaciales:

- Núcleos compactos de precipitación con alta densidad de descargas eléctricas.
- Zonas de precipitación moderada con alta densidad de descargas eléctricas.
- Zonas de precipitación moderada o fuerte con baja densidad de descargas eléctricas.
- Zonas residuales con precipitaciones débiles y baja densidad de descargas eléctricas.

En este ejemplo de la figura 3 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.

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 secas productoras de descargas eléctricas mediante la cuantificación de ascensos en la atmósfera usando como variables iniciales un conjunto de campos básicos o derivados relacionados con la inestabilidad atmosférica, y siendo particularizados para esta zona a partir de climatologías ya existentes. Estos campos son adaptaciones locales de salidas de los modelos de predicción del Instituto Nacional de Meteorología y se agrupan en dos subconjuntos dependiendo de la diferente escala espacio temporal (HIRLAM-0,5 para la escala sinóptica y HIRLAM-0,2 para la escala meso-beta).

3. ÍNDICE COMBINADO DE RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

Con el fin de englobar la totalidad de los fenómenos meteorológicos influyentes en el inicio y propagación de los incendios, se decidió elaborar un índice combinado de riesgo de incendios forestales, definido a través de los cuatro resultados parciales siguientes: Índice de Ignición, Factor de Propagación, Índice de Peligrosidad e Imagen de Seguimiento.

3.1 Índice de ignición.

El Índice de Ignición trata de determinar las condiciones ambientales que definen las circunstancias propicias para el desencadenamiento de los incendios por cualquiera de las posibles causas. Los resultados del análisis estadístico muestran que las variables más correlacionadas son: la existencia de rayos, la temperatura máxima (tmax), la humedad relativa (humedad) y la cantidad de precipitación recogida en los últimos tres días (acum).

Al ser el rayo la principal causa de incendio en Aragón se realiza en primer lugar una predicción de las tormentas con descargas eléctricas, esperadas para el periodo de validez del índice. Este periodo cubre las 24 horas siguientes, realizándose actualmente los cálculos para las horas 14h, 17h, 20h y 23h oficiales y reteniendo en cada punto geográfico el máximo valor de las cuatro predicciones.

Para el resto de las variables, también se parte de las salidas de los dos modelos numéricos de predicción operativos en el INM y los resultados se presentan en una imagen compuesta.

La influencia de las variables anteriores es distinta para cada una de las nueve zonas definidas y ha sido determinada a partir de un análisis de regresión múltiple. Las fórmulas obtenidas mediante este análisis han sido de uno de los dos tipos siguientes:

$$Y=A-B*acum-C*\ln(humedad)+D*(tmax)^2 : [\text{Ecuación 1}]$$

$$Y=A'-B'*acum-C'*humedad+D'*(tmax)^2 : [\text{Ecuación 2}]$$

donde las constantes A, B, C, D, A', B', C', D' son específicas para las distintas zonas.

A su vez, se determina el estado de humedad de la cubierta vegetal, a partir del "Índice de Vegetación por Diferencia Normalizadas" (NDVI) obtenido mediante imágenes del satélite (TIROS-NOAA). Se utiliza una combinación de dos productos: Diferencias Relativas Semanales de NDVI y Máximo Semanal de NDVI. Para eliminar la superficie no forestal, con el fin de que los cultivos agrícolas no distorsionen los resultados, se ha logrado que la base de datos sobre "usos del suelo" del Ministerio de Agricultura en la zona de Aragón, sea interpretada como un área por el sistema SAIDAS, utilizando dicha imagen como máscara (Figura 4)

Estas diferentes contribuciones se combinan adecuadamente con diferentes pesos dando como resultado el Índice de Ignición con una resolución de cuadrícula de 17 por 22 kilómetros, que se presenta ploteado sobre el mapa de Aragón según una escala de 0 a 5. (Riesgo mínimo, debil, moderado, notable o fuerte).

A efectos de facilitar la interpretación por parte del usuario de cuál es el porcentaje del Índice debido a la actividad tormentosa, además del valor del Índice de Ignición, en el ploteado diario se presenta como fondo coloreado rojo el riesgo máximo de tormentas del día, de acuerdo a su propia escala cromática (Riesgo mínimo, ...,fuerte) a pie de página (Figura 5).

Se ha realizado la verificación de las fórmulas con los datos de los incendios registrados en los años 1998 y 1999 en cada una de las zonas. Esta verificación se ha hecho para cada uno de los distintos factores del Índice. Las técnicas estadísticas utilizadas han sido: test de normalidad (test de Shapiro-Wilk), tablas de contingencia y tests de diferencias de medias (test de Kruskal-Wallis y test suponiendo normalidad). Todos estos cálculos se han realizado para cada una de las zonas obteniéndose resultados similares. En la Tabla 1 se presentan como ejemplo, los resultados obtenidos para la zona de Teruel, dividiendo los valores predichos en dos clases según sean mayores o menores de 2 en la escala de 5 niveles de riesgo.

Se obtiene una Probabilidad de detección de incendio (P.O.D) = 0.70. De los 142 días solamente en 6 casos se produjo incendio (y de muy poca extensión) habiéndose dado un índice menor que dos. El que se produzcan falsas alarmas es debido a la forma elegida a propósito para la construcción del índice: Se han utilizado solamente los días de verano en los que ha ocurrido algún incendio, días por lo general de temperatura máxima alta, humedad relativa baja y poca precipitación acumulada, características que en el verano en Aragón se dan con mucha frecuencia y por lo tanto el índice refleja la elevada peligrosidad, independientemente de que se produzcan o no incendios para un lugar y momento determinado.

Del estudio del estadístico (Chi-cuadrado) se deduce que existe una dependencia entre la ocurrencia o no de incendios y cada una de las categorías en que se ha dividido al Índice, con un p-valor asociado de 0,0002, muy bajo e inferior al 0,05 (Nivel de confianza del 95%).

Asimismo, al realizar "estadísticas descriptivas" se observa que el valor promedio del Índice de Ignición es mayor en los días en los que ha ocurrido algún incendio (2,2566), frente a los días en los que no ha ocurrido ningún incendio (1,6376) pudiéndose comprobar que esta diferencia de medias es significativa puesto que el Estadístico de Kruskal - Wallis = 16,98039 con p-valor = 0,00004 < 0,05 usando una distribución Chi-cuadrado con un grado de libertad y habiéndose utilizado el test de Kruskal - Wallis debido a que no se puede suponer una distribución normal del índice de ignición. Dado que el p_valor es considerablemente inferior a 0,05 se puede decir que la probabilidad de que las dos medias sean iguales es muy pequeña y por lo tanto, con un nivel de confianza del 95% se puede afirmar que la media del Índice de los días en los que ha ocurrido algún incendio es mayor que la de los días en los que no ha ocurrido ninguno.

También se ha enfocado la verificación de las predicciones desde un punto de vista probabilístico definiendo cinco clases que coinciden con los cinco valores que puede tomar el índice y enfrentandolos a la ocurrencia o no de incendios. Los resultados obtenidos con un p-valor de Pearson de 0.0005 se presentan en la tabla 2.

Tomando el valor de 5 como una probabilidad de 100% de que ocurran incendios, se puede pensar en una

predicción probabilística y calcular como parámetro de calidad el Índice de Brier Score = 0.14, que resulta próximo a cero y por lo tanto muy bueno.

Dados los resultados obtenidos, a partir del año 2000 se construyó únicamente un Índice representativo para todo el día, sin considerar intervalos, en el cual se utilizó la temperatura máxima prevista del día y la humedad relativa a las 15 horas por ser el periodo que ofrecía mayores riesgo de incendio independientemente de la actividad tormentosa. Esto hizo que las zonas de Jaca y de Sobrarbe, donde el Índice ofrecía valores bajos, alcanzaran valores más altos y se ajustaran mucho mejor a los incendios que se detectaron.

3.2 Factor de Propagación.

Si bien, el viento no contribuye a la ignición propiamente dicha, en la Comunidad Autónoma de Aragón si son frecuentes los episodios con vientos fuertes, que siguen al paso de las tormentas que se generan los días con altas temperaturas y bajas humedades relativas. Estos vientos, normalmente racheados y de componente norte, pueden perdurar varios días, convirtiéndose en el principal vector de propagación de los focos originados por dichas tormentas u otras causas.

Con el fin de proporcionar una perspectiva, tanto espacial como temporal del viento a lo largo del día, se suministran, gráficamente y con la misma resolución de cuadrícula, predicciones de dirección y fuerza con intervalos de 6 horas, a partir de las 8 horas oficiales.

3.3 Índice Combinado de Peligrosidad.

A partir del Índice de Ignición y del Factor de Propagación se obtiene el Índice Combinado de Peligrosidad esperado, presentándose el resultado en el mismo formato y resolución que los productos anteriores. Al igual que en el Índice de Ignición, la escala de este producto también está dividida en cinco intervalos. Para facilitar la interpretación por parte del usuario, además del valor del Índice de Peligrosidad, se presenta como fondo de la imagen la fuerza del viento con una gama de colores marrones de acuerdo a la correspondiente escala cromática que figura a pie de página.

3.4 Imagen de Seguimiento.

El elevado porcentaje de incendios ocasionados por descargas eléctricas nube-tierra y, a veces, la permanencia de sus efectos en estado de latencia por un periodo de varias horas e incluso días antes de detectarse el incendio, indujo a crear un producto para servir de guía en la determinación de las rutas a seguir por los medios destinados a labores de vigilancia de los focos puntuales. Así, diariamente se facilita una imagen en que aparecen ploteados los rayos correspondientes a los datos obtenidos en tiempo real por los sensores de la red de descargas del INM y se añade información complementaria sobre polaridad, intensidad, hora del rayo, número de subdescargas y elipse de error (Figura 6). Como resultado del seguimiento de la situación meteorológica en el Grupo de Predicción y Vigilancia de Zaragoza, a petición se puede reenviar una imagen similar en tiempo real con las últimas descargas registradas.

4. OPERATIVA DIARIA

Diariamente se elaboran y envían de forma automática, mediante conexión directa por red informática, un conjunto de siete mapas. El primero muestra las tormentas previstas por intervalos horarios (14, 17, 20 y 23 horas oficiales). Los dos siguientes, los Índices de Ignición y Peligrosidad, para las nueve zonas en las que se ha dividido la Comunidad de Aragón, referidos a las 17 horas locales. El cuarto es una imagen del Índice de Vegetación, coloreada de acuerdo a una escala previamente definida, que proporciona información con una resolución de 1,1 Km. por 1,1 Km. Los mapas quinto y sexto constituyen el Índice de Propagación (uno facilita el viento en formato vector y el otro la velocidad del viento en kilómetros / hora). Finalmente, en el séptimo, sobre una imagen radar de la precipitación recogida el día anterior, se presentan todos los rayos registrados desde el último envío. Así mismo, el programa permite hacer predicciones para el día siguiente.

5. CONCLUSIONES

En estos momentos el conjunto de Índices que constituyen el Índice Combinado se consideran plenamente operativos. Los resultados que se han ido obteniendo y la continua retroalimentación de información han aconsejado realizar un ajuste de los campos iniciales de temperatura y humedad en las zonas montañosas, con el fin de reproducir más satisfactoriamente las condiciones reales que se dan en estas zonas. Cualquier modificación que se considere pertinente introducir dará como resultado una progresiva optimización del Índice. En el momento actual el Índice combinado reproduce satisfactoriamente fenómenos como olas de calor, tormentas, entradas de aire frío y seco, etc., que, en última instancia, son los responsables meteorológicos de la mayor incidencia de incendios forestales.

6. REFERENCIAS

ÁLVAREZ, E; DE LA FUENTE, C; GARCÍA, A; 2001. Índice de riesgos forestales para Aragón. V Simposio Nacional de Predicción . Sección C: Técnicas y herramientas de análisis, diagnóstico y predicción. Web: <http://www0/wwj/vsimposio/sesionc.html>

ÁLVAREZ, E; 2001. Factor de tormentas. V Simposio Nacional de Predicción . Sección C: Técnicas y herramientas de análisis, diagnóstico y predicción. Web: <http://www0/wwj/vsimposio/sesionc.html>

ABRANTES, T; GOMES, I; TAVARES, C; & MOTA, L; 1993. *Análise de risco de incêndios forestais em Portugal* . Instituto Nacional de Meteorología y Geofísica. Lisboa. Portugal.

MINNICH, R; FRANCO, E; SOSA-RAMIREZ, J; CHOU, Y; 1992. Lightning detection rates and wildland fire in the mountains of northern Baja California, Mexico. *Atmosfera(1993)*,6. pp,235-253.

REIFSNYDER,W; BRYAN, A; 1994, *System for evaluating and predicting the effects of weather and climate on wildland fires*. Special Environmental Report N° 11. Secretariat of the World Meteorological Organization, n° 496. Geneva. Swizerland

SERVICIO DE APLICACIONES CLIMATOLÓGICAS; 1992. *Índices de peligro de incendios forestales*. Sección de Meteorología Agrícola y Fenología. Instituto Nacional de Meteorología.

Figura 1: Zonificación de Aragón a efectos de incendios forestales.

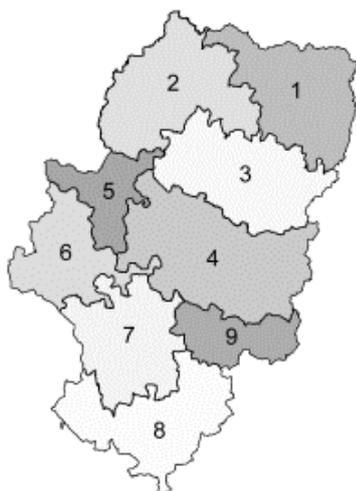


Figura 2: Porcentaje de incendios producidos por rayos

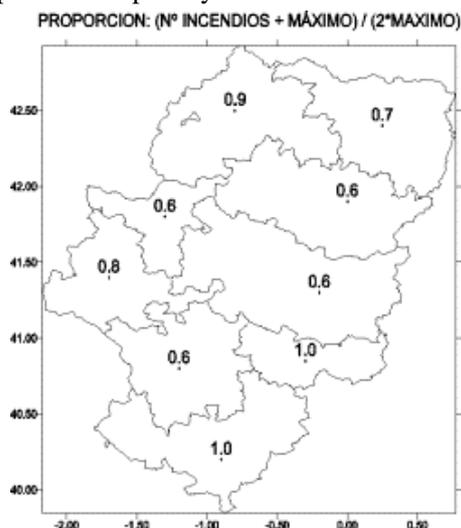


Figura 4: Imagen del NDVI compuesto Semanal para la Comunidad de Aragón.

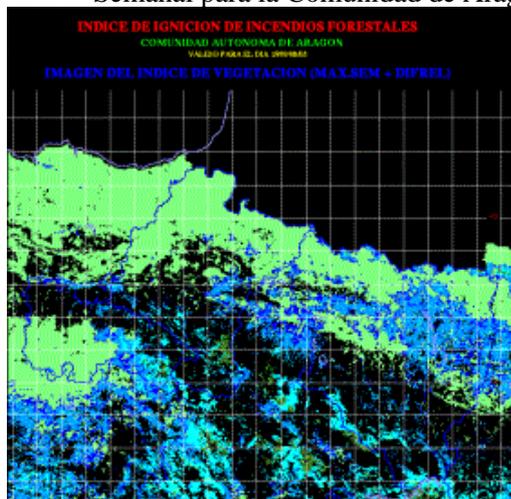


Figura 3: Correlación entre rayos, precipitación e incendios

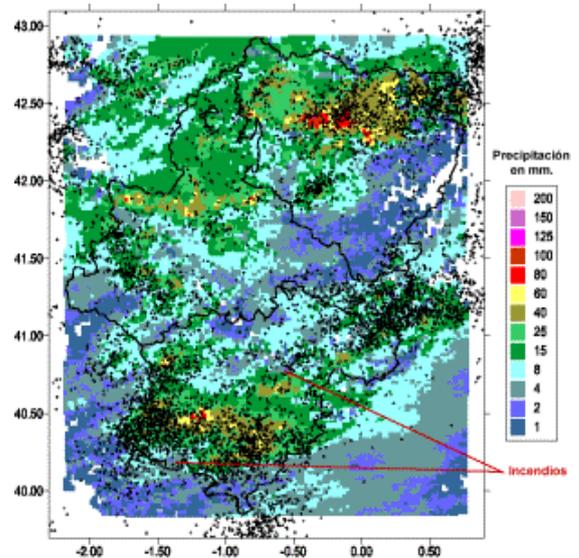


Figura 5: Imagen del Índice de Ignición

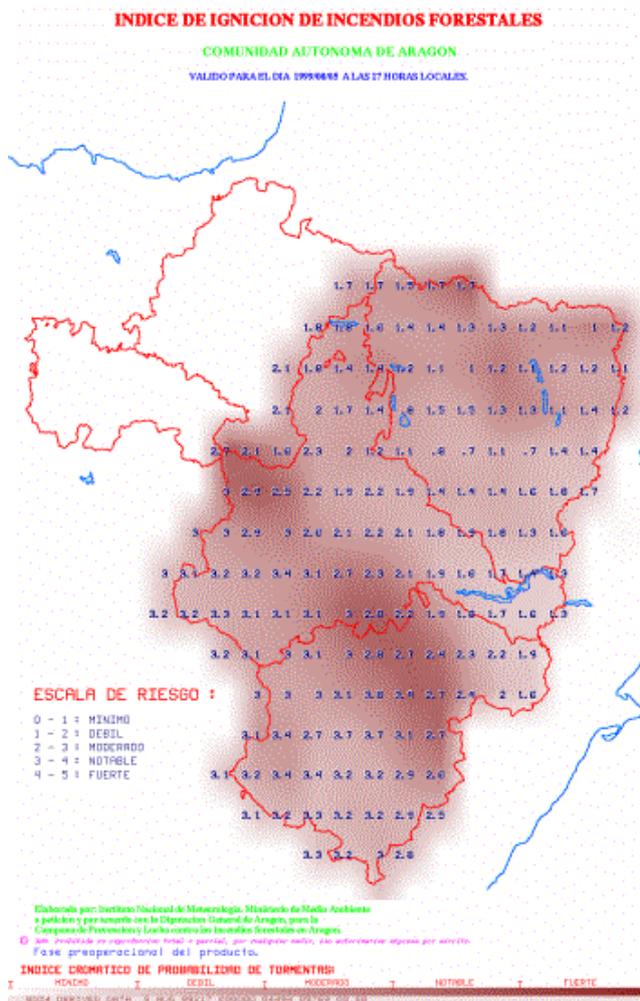


Figura 6: Seguimiento de rayos

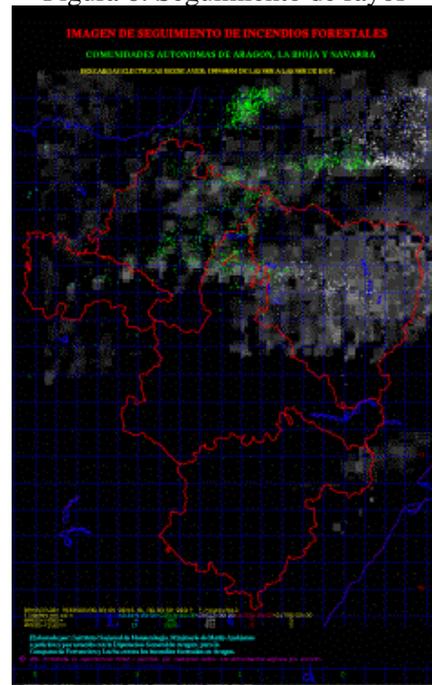


Tabla 1.: De contingencia - ÍNDICE / OCURRENCIA DE INCENDIOS

	NO	SÍ	TOTAL
[0, 2)	88	6	94
[2, 5]	34	14	48

TOTAL	122	20	142
-------	-----	----	-----

Tabla 2 : Valores Obs/Pred Mínimo Débil Moderado Notable Fuerte Total

	MINIMO (1)	DEBIL (2)	MODERADO (3)	NOTABLE (4)	FUERTE (5)	TOTAL
NO INC.	14	73	33	1	0	121
SI INC.	0	6	12	2	0	20
TOTAL	14	79	45	3	0	141