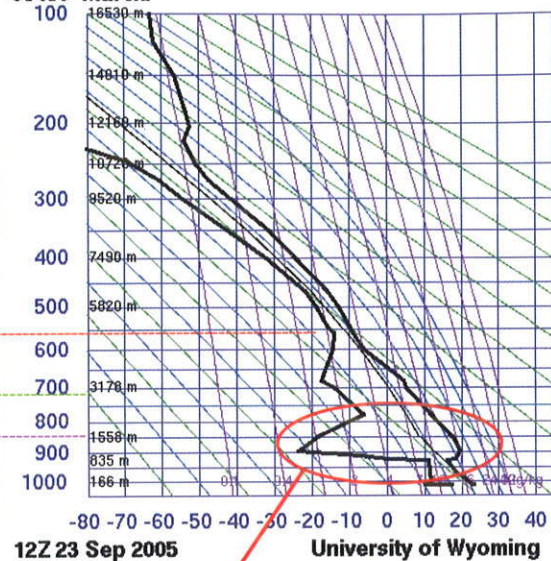


Fotografía desde Vélez Benaudalla (23-9-2005), a mediodía.



08430 Murcia



SLAT 38.00
SLON -1.16
SELV 62.00
SHOW 10.83
LIFT 3.81
LFTV 3.76
SWET 51.01
KINX -7.10
CTOT -5.70
VTOT 30.30
TOTL 24.60
CAPE 0.00
CAPV 0.00
CINS 0.00
CINV 0.00
EGLV -9999
EGTV -9999
LFCT -9999
LFCV -9999
BRCH 0.00
BRCV 0.00
LCLT 282.5
LCLP 662.9
MLTH 294.7
MLMR 8.68
THCK 5654
PWAT 17.83

Estrato "muy seco y más cálido"

Fig 1.- Correlación incendio Lanjarón (Granada, 23-9-2005) y radiosondeo estación Murcia. Inicio incendio paraje "Tello". Las referencias de altitud sobre fotografía son aproximadas ya que la escala de presiones (altura geopotencial) es logarítmica. Eje X: temperatura (°C). Eje Y: presión atm. (hPa) y altitudes referencia (m). (Fotografía orientada al N). Fuente: University of Wyoming

Análisis de radiosondeos en extinción de incendios forestales

A. Sánchez Anguita

Técnico Extinción Plan INFOCA. COP Granada
Consejería de Medio Ambiente y Ordenación
del Territorio. Junta de Andalucía.
Ingeniero Técnico Forestal
antonio.sanchez.anguita@juntadeandalucia.es

RESUMEN

Se presentan las correlaciones que se pueden extraer entre la interpretación de resultados de la potente herramienta meteorológica que son los radiosondeos, y el comportamiento del fuego en un incendio forestal, para una mayor eficacia en su extinción y en su análisis posterior.

Asimismo se exponen una serie de índices que se pueden calcular utilizando los radiosondeos para pronosticar el potencial de grandes incendios forestales.

Palabras clave: meteorología, radiosondeo, comportamiento del fuego, inversión térmica, índices convectivos.

INTRODUCCIÓN

Para conocer la estructura vertical de la atmósfera se emplean radiosondeos que miden la temperatura, presión, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Consiste en el lanzamiento de un globo son-

da que mide y transmite datos de dichas variables a lo largo de su recorrido ascendente; realizándose normalmente dos lanzamientos diarios (00:00 y 12:00 h UTC).

Los resultados de estas radiosondas se pueden consultar en la *Universidad de Wyoming* (UW, 2014). La re-

presentación de los datos obtenidos se realiza mediante diagramas termodinámicos, destacando el de Stüve por la facilidad para realizar cálculos.

En la Península Ibérica, Islas Baleares y Canarias se dispone de las estaciones de lanzamiento indicadas en la Tabla 1.

**Tabla 1.- Estaciones de Radiosondeo en España, Portugal y Gibraltar
WMO: World Meteorological Organization**

Estación	Nº WMO	Estación	Nº WMO
Tenerife-Güímar	60018	Madrid-Barajas	08221
La Coruña	08001	Palma de Mallorca	08302
Santander	08023	Murcia	08430
Zaragoza	08160	Gibraltar	08495
Barcelona	08190	Lisboa	08579

En la Figura 1 se representan: en el eje de abscisas, las isotermas (en °C, líneas verticales violetas, separación constante); y en el de ordenadas, la presión atmosférica (en hPa., líneas horizontales violetas, espaciadas logarímicamente), con altitudes de referencia en m. Destacan las siguientes representaciones:

- **Perfil de temperatura** o curva de estado (línea negra derecha): temperatura medida conforme asciende la radiosonda.
- **Perfil de temperatura de rocío** (línea negra izquierda): temperatura a partir de la cual condensa el agua.
- **Adiabáticas secas** (líneas verdes): temperatura de una partícula no saturada en movimiento ascendente; enfriándose -0,98 °C/100 m.
- **Adiabáticas húmedas** (líneas inclinadas azules): cuando dicha partícula está saturada; -0,65 °C/100 m.
- **Líneas de razón de mezcla** (trazas inclinadas granate): vapor de agua en un volumen de aire seco (g/Kg).

Se asume una representatividad de los radiosondeos, salvo que haya cambio de masa de aire, de 6 horas después de efectuarlos y una superficie de unos 200 Km de radio (DACC, 2014). Cuando no se dispone de radiosondeo para la zona de estudio o se está demasiado alejado de su alcance espacial y/o temporal, se pueden interpretar los estimados por satélites de las series GOES y NOAA (ARL-NOAA, 2013), resultando radiosondeos estimados cada 3 h, y los pronosticados por el modelo GFS, de validez comprobada (MEULENERT *et al.*, 2006).

Según la forma de los perfiles de temperatura destaca la tipología explosiva cuando se asemeja a un reloj de arena (Fig. 1 y 4). Si la forma es de *V invertida* (Fig. 6) se pueden pro-

ducir fenómenos convectivos y ráfagas intensas descendentes secas o *downburst* (AZORÍN MOLINA, 2005; UCAR, 2013).

El objeto del presente artículo es relacionar dichos radiosondeos con el comportamiento de los incendios forestales.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se utilizaron por un lado fotografías de incendios forestales en las que se conocía su localización geográfica y temporal, preferiblemente orientadas al N por su mayor capacidad ilustrativa, y por otro lado los radiosondeos proporcionados por la *Universidad de Wyoming* o, cuando se excedían de su ámbito de aplicación, los estimados por el *Air Resources Laboratory* de la *National Oceanic and Atmospheric Administration* (ARL-NOAA); destacando las correspondencias más relevantes en la evolución del fuego y del humo generado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN: APLICACIÓN OPERATIVA

1.- Temperatura, Humedad y Estabilidad Atmosférica

Cuanto mayor sea la separación horizontal entre perfiles de temperatura, menor será la humedad. Así, el estrato muy seco y más cálido de la Fig. 1 se corresponde con grandes intensidades de fuego (color negrozco del humo), favorecidas además por enormes cargas de combustible (pinos muy densos de unos 15 m de altura) y su alta disponibilidad (finales de un año hidrológico extremadamente seco).

En dicha Fig. 1 se observa la existencia de una capa donde la columna de humo cambia claramente de color, a partir de la cual se forma piro-

cúmulo por condensación del vapor de agua contenido en aquella; existiendo gran proximidad entre dichos perfiles a partir de 560 hPa. Una capa de aire, cuando tiene una separación entre las citadas líneas alrededor a 5 °C, o con humedad relativa superior al 70%, es susceptible de formar nubes ya que la saturación se alcanza a humedades relativas menores que 100 por presencia de núcleos de condensación (URJC, 2006).

Cuando el peso del pirocúmulo supere la fuerza de las corrientes ascendentes se desplomará, aportando fuertes corrientes de viento descendentes, incrementando en extremo la velocidad de propagación; produciendo lanzamiento masivo de focos secundarios y ensanchamiento del incendio en todas direcciones (CASTELLNOU *et al.*, 2009; QUÍLEZ MORAGA, 2013).

Se puede conocer la variación de la estabilidad atmosférica con la altitud. Si fijamos un punto (altitud del

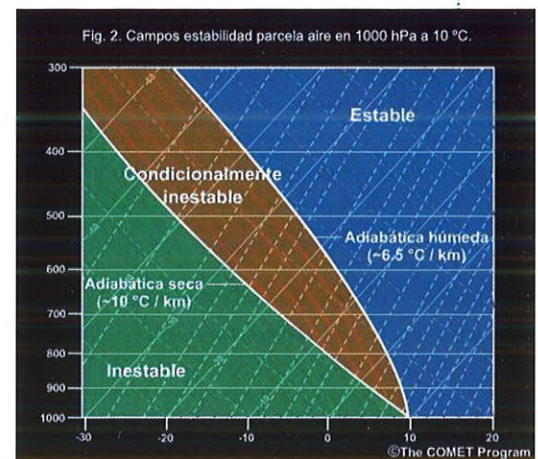


Fig. 2.- Campos de estabilidad de una parcela de aire en 1.000 hPa a 10°C. Eje X: temperatura (°C). Eje Y: presión atmosférica (hPa)

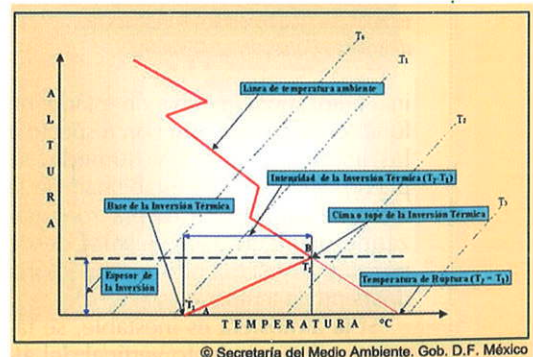


Fig. 3.- Parámetros que definen una inversión térmica

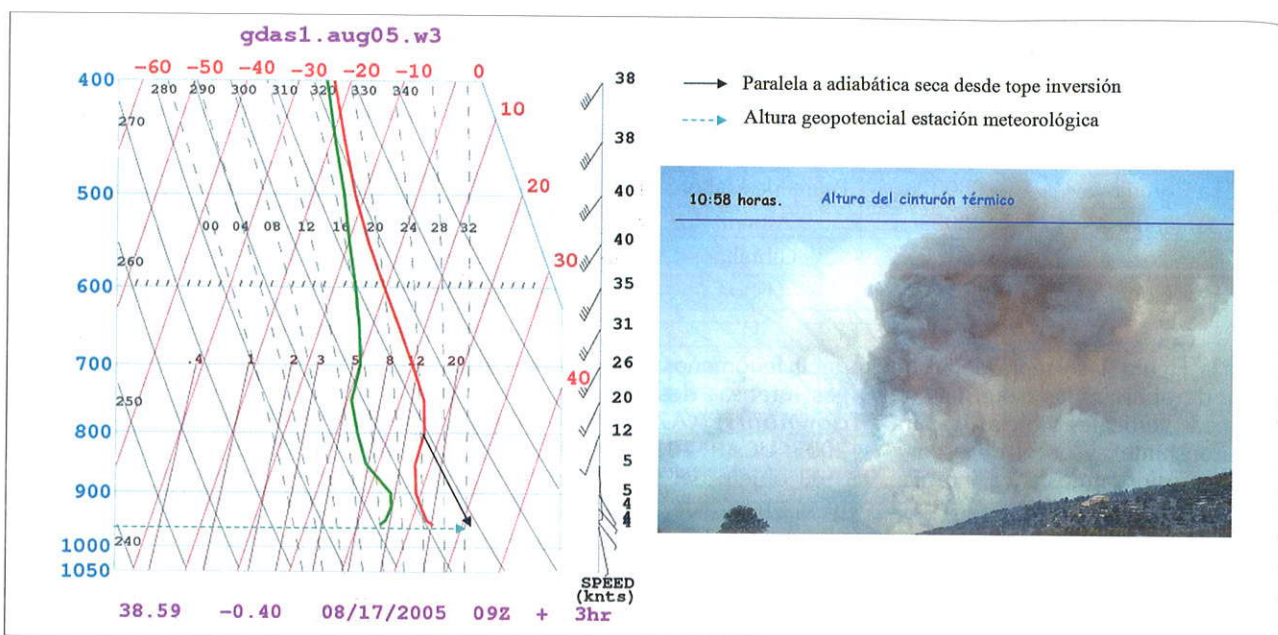


Fig. 4.- Comienzo ruptura cinturón térmico, 10:58 h incendio Torremanzanas (Alicante, 17-8-2005; Lat: 38,59. Long: -0,40). $T_{11h} = 27,02\text{ }^{\circ}\text{C}$ en estación de Relleu, $h = 400\text{ m}$ ($\approx 970\text{ hPa}$ según datos de texto radiosondeo). Temperatura ruptura inversión: $27,02 + 5$ (isla calor) $\approx 32\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eje X: temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Eje Y: presión atm. (hPa). Foto: Tomás Cremades Pastor en QUÍLEZ MORAGA (2006). Radiosondeo ARL-NOAA

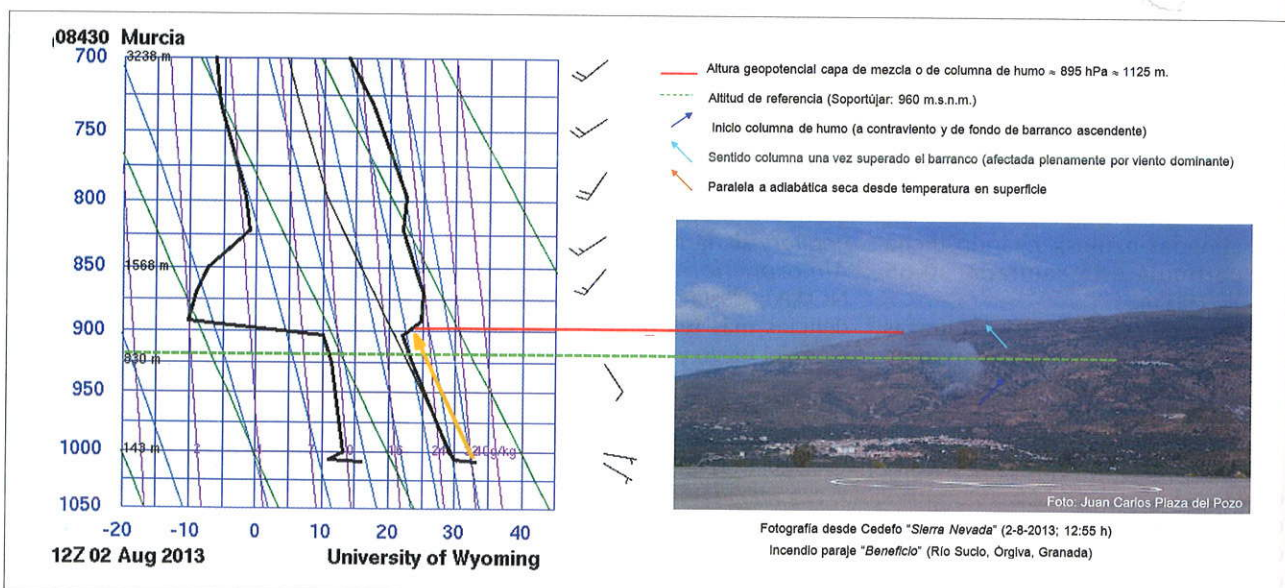


Fig. 5.- Inversión térmica y altura capa de mezcla. Radiosondeo estación Murcia. $T_{13h} = 29\text{ }^{\circ}\text{C}$ en zona inicio ($\approx 950\text{ hPa}$) según Sistema de Información Meteorológica para Incendios Forestales de AEMET. Eje X: temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Eje Y: presión atm. (hPa) y altitudes referencia (m). (Fotografía orientada al N). Radiosondeo University of Wyoming

incendio) sobre la curva de estado, en función de su posición con respecto a las adiabáticas seca y húmeda, se puede determinar la estabilidad de la masa de aire a partir de esa zona trazando paralelas a las mismas desde ese punto y siguiendo la trayectoria del perfil de temperatura (Fig. 2).

Si la atmósfera es inestable, se favorece el movimiento vertical del aire, permitiendo el desarrollo de extensas columnas de humo y fuego

así como aparición de fenómenos convectivos. En la capa condicionalmente inestable, la parcela de aire sería estable si estuviese seco, e inestable si húmedo.

En la Fig.1. existe atmósfera condicionalmente inestable, desde la zona de inicio del incendio hasta unos 600 hPa, que pasaría a estable (pendiente de la curva de estado superior a adiabática seca). No obstante, al existir gran cantidad de vapor

de agua procedente del proceso de combustión de la zona incendiada, aquella capa atmosférica se comporta como inestable.

2.- Inversiones Térmicas

Una inversión se produce cuando la temperatura aumenta con la altitud en vez de disminuir, identificándose claramente a través del perfil de temperatura del diagrama termo-

Tabla 2.- Índices inestabilidad

Índice	Descripción	Guía	Limitaciones
HOW	Índice Showalter	≤ 3 Marginalmente inestable ≤ -3 Actividad convectiva severa	Uso 850-500 hPa No aplicable si inversión de 850 a 500 hPa
LIFT	Índice Levantamiento	< 0 Marginalmente inestable ≤ -8 Inestabilidad extrema	No considerar aisladamente
KINX	Índice K. Pronostica tormentas eléctricas	> 15 Potencial convectivo bajo > 40 Potencial convectivo alto	Idem Uso 850-500 hPa
VTOT	Vertical Total	> 28 Alta probabilidad convectiva	
TOTL	Índice Total de Totales	≥ 44 Posibilidad tormentas ≥ 55 Alta probabilidad tormentas locales severas	Uso 850-500 hPa En masas post-frontales tiende a dar valores extremadamente altos
CAPE	Energía Potencial Convectiva Disponible	> 0 Marginalmente inestable > 3.500 Extremadamente inestable	Considerar junto a CINS
CINS	Inhibición Convectiva	$> 200 $ CAPE severamente inhibido	Magnitudes no directamente proporcionales a CAPE
BRCH	Número Richardson	< 10 Débil inestabilidad y/o fuerte cizalladura vertical (desactiva sistema convectivo) > 10 Desarrollo supercélulas > 50 Inestabilidad y/o débil cizalladura vertical	Considerar junto a CAPE y CINS

dinámico. Presenta unas características (SMA, 2001) de entre las que se destacan (previsión expansiones explosivas):

- *Temperatura de ruptura*: temperatura en superficie en la que se disipará la inversión.
- *Hora de ruptura*: momento en

que se alcanzará la temperatura de ruptura. Este valor se pronostica para saber en qué momento comenzará la dispersión del humo estancado por la inversión, si es que no existe sistema de altas presiones que mantenga la estabilidad o que la pueda reforzar, dando co-

mo resultado, no sólo que no comience la dispersión, sino que la acumulación se haga más fuerte.

Según la Figura 3, para estimar la *temperatura de ruptura*, desde el tope de la inversión se baja por adiabática seca hasta temperatura en superficie, teniendo en cuenta el efecto *isla de calor* producido por el incendio forestal sumando 5 °C (TREJO VÁZQUEZ & VILLAGÓMEZ PARRA, 2011) como aproximación; sin considerar dicho efecto en incendios de poca magnitud. Con ese resultado y una previsión meteorológica horaria fiable se puede pronosticar la hora aproximada en la que se producirá, en su caso, la ruptura de la inversión; dato de extrema importancia a la hora de distribuir el personal interviniente en la extinción, ya que el crecimiento del incendio en ese momento será extraordinario y muy peligroso para dicho personal (QUÍLEZ MORAGA, 2006).

Según HOLZWORTH (1967) se puede estimar la altura de la capa de mezcla, altura máxima a la cual puede desplazarse el humo emitido por un incendio, nivel en el que alcanza una flotabilidad neutra; marcada por la presencia de una inversión de temperatura o de un estrato isotérmico de considerable espesor. Para ello se sigue la adiabática seca desde la temperatura máxima en superficie hasta

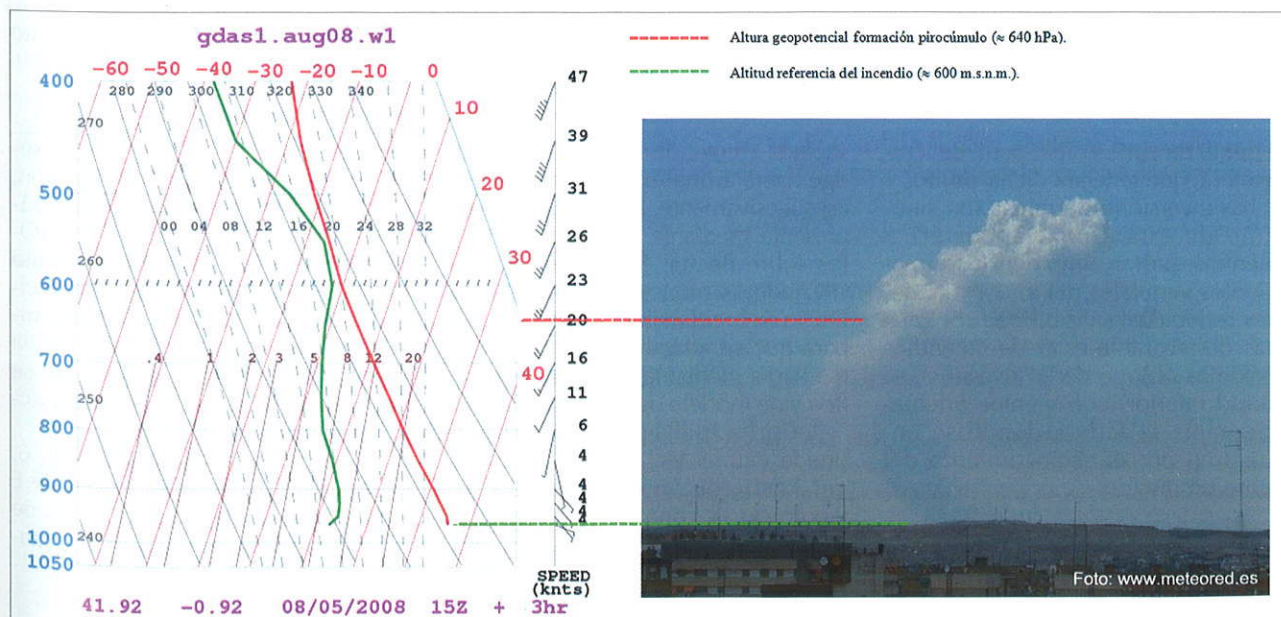


Fig. 6.- Cambio viento en altura (desde 850 hPa) incendio Zuera (Zaragoza, 5-8-2008; Lat: 41,92. Long: -0,92). Fotografía desde Zaragoza (orientada al N.) a las 16:30 h. Eje X: temperatura (°C). Eje Y: presión atm. (hPa). Fuente Datos: GADEX (2009). Radiosondeo ARL-NOAA

Tabla 3.- Cálculo Índice Haines (Tpi y Tdp temperatura y temperatura de rocío al nivel de presión pi)

Altitud	Nivel Presión (hPa)	Inestabilidad (A) (Tp1 - Tp2) (°C)	A	Humedad (B) (Tp3 - Tdp3) (°C)	B	HI = A + B
< 305 m	p1 = 950 p2 = 850 p3 = 850	< 4	1 (Estable)	< 6	1 (Muy húmedo)	Potencial Grandes Incendios
		≥ 4	2 (Poco Estable)	≥ 6	2 (Poco húmedo)	
		< 8	3 (Inestable)	< 10	3 (Seco)	
		≥ 8		≥ 10		
305-914 m	p1 = 850 p2 = 700 p3 = 850	< 6	1	< 6	1	2-3: Muy Bajo 4: Bajo
		≥ 6	2	≥ 6	2	
		< 11	3	< 13	3	
		≥ 11		≥ 13		
> 914 m	p1 = 700 p2 = 500 p3 = 700	< 18	1	< 15	1	5: Moderado 6: Alto
		≥ 18	2	≥ 15	2	
		< 22	3	< 21	3	
		≥ 22		≥ 21		

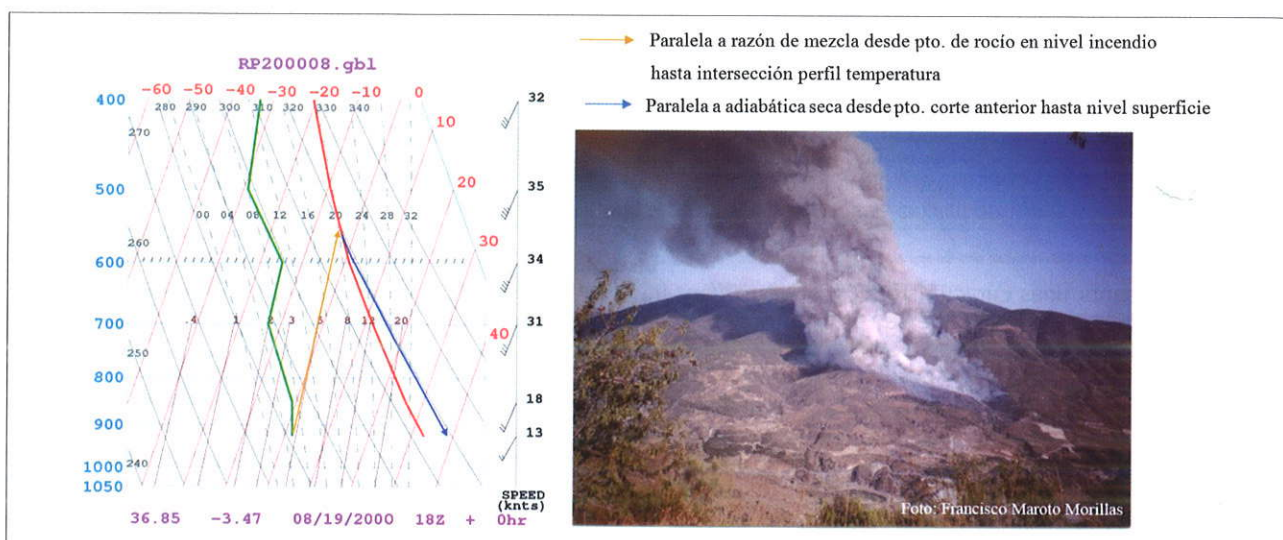


Fig. 7.- Incendio Sierra Lújar (Granada, 19-8-2000; Lat: 36,85, Long: -3,47). Fotografía 19 h (orientación E-SE). Comienzo convección ≈ 18:30 h, al principio del incendio (inicio:16:45 h). Temperatura convectiva ≈ 38 °C. Temp. sup. ≈ 33 + 5 (isla calor) ≈ 38 °C. Eje X: temperatura (°C). Eje Y: presión atm. (hPa). Radiosondeo ARL-NOAA

el punto de corte con el perfil de temperatura, que reflejará dicha altura.

Las inversiones térmicas son sinónimo de estabilidad atmosférica mientras existan, impiden los movimientos verticales del aire y mantienen reducida la visibilidad. El caso más desfavorable es el de incendios próximos al tope de la inversión (en altitud inferior) con vientos orientados hacia la ladera donde se encuentren por el estancamiento del humo producido.

3.- Vientos

A la derecha del diagrama termodinámico se representa el perfil de viento medido (Fig. 6). El extremo de la flecha indica la dirección en la que

sopla el viento, de modo que si se dirige hacia arriba existe viento de S, y así sucesivamente. La velocidad se representa mediante banderas (triángulos sobre flecha: 50 nudos), barbas (10 nudos) y medias barbas (5 nudos). Dicha velocidad hay que corregirla para que se adapte a la altura a media llama mediante su ajuste topográfico y de modelo de combustible.

La principal aplicación que se puede extraer es, además de conocer la dirección e intensidad del viento en la zona del incendio, en su caso, el cambio a diferentes alturas, para así predecir cambios, en el avance del fuego en incendios de ladera, en el transporte de pavesas, y en el humo. Si existe viento en altura de mayor velocidad, por efecto Ven-

turi acelera la entrada de aire en superficie y el proceso de combustión, evacuando la columna de forma rápida por cizalladura (QUÍLEZ MORAGA, 2013) o variación del viento con la altura. Cuando además de cizalladura direccional, también aumenta la velocidad del viento con la altura (cizalladura de velocidad), se dan condiciones favorables para actividad convectiva (Fig. 6).

Tal como se aprecia en la Fig. 6, existen cizalladuras direccional de E a W en el nivel de unos 850 hPa y de velocidad desde esa altitud, formándose pirocúmulos a unos 640 hPa.

4.- Índices Convectivos

Para determinar si los datos de un

radiosondeo permiten concluir si nos encontramos ante una situación atmosférica potencialmente inestable, que puede derivar en grandes incendios incontrolables, se definen diferentes índices cuantitativos. Deben ser usados conjuntamente como orientación y no como umbrales para predecir fenómenos convectivos. A la derecha del perfil de vientos (Fig. 1), existen una serie de parámetros, destacando los de la Tabla 2 (PALENCIA COTO, 2011; UCAR, 2013).

Para uso específico en evaluación de peligro de incendios convectivos se utiliza el *Índice de HAINES* (1988), pudiéndose calcular con los valores de texto ofrecidos por los radiosondeos siguiendo la Tabla 3 (BARBERÀ *et al.*, 2009). Se recomienda evaluarlo de forma conjunta con algún índice de liberación de energía como CAPE y CINS.

Cuando existe piroconvección, en el *Nivel de Condensación por Ascenso* (LCL) se extenderá una densa capa de humo horizontal, existiendo poca visibilidad en dicha zona (McRAE, 2010), tal como se aprecia en Fig. 1 (LCLP: 862,9 hPa; W. para *je Tello*), con gran calor por condensación.

El inicio de la actividad convectiva se puede estimar mediante el cálculo de la *temperatura de disparo o temperatura convectiva* (NWS-NOAA, 2009; UCAR, 2013). Para ello desde el punto de rocío a nivel del incendio se sube por línea de razón de mezcla hasta corte con perfil de temperatura y desde ahí bajamos, por adiabática seca, hasta lectura de temperatura en nivel superficial (Fig. 7); teniendo en cuenta dicho efecto *isla de calor*, especialmente cuando se produzcan grandes carreras de

fuego (plena alineación lenguaje Campbell).

CONCLUSIONES

El análisis de radiosondeos constituye una eficaz herramienta para evaluar el comportamiento de incendios forestales, ofreciéndonos la variación altitudinal de los factores meteorológicos que más influyen. Asimismo sirve para determinar la inestabilidad atmosférica para previsión de incendios extremos de difícil control, como los convectivos, para pronosticar datos de enorme importancia en la gestión de la extinción, como la estimación de las horas de ruptura de inversiones térmicas y de comienzo de la actividad convectiva; así como el comportamiento del humo producido. 🌲

ARL-NOAA; 2013. Air Resources Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. En: <http://ready.arl.noaa.gov/READYmet.php> (2014).

AZORÍN MOLINA, C.; 2005. Situación atmosférica de "beat burst" en la provincia de Alicante. *Ería*, 67, pp. 237-254.

BARBERÀ, M. J.; NICLÒS, R.; ESTRELLA, M. J.; VALIENTE, J. A.; 2009. Análisis del índice de Haines durante los incendios de Xàtiva y Simat (Valencia) y monitorización de la regeneración natural mediante el uso de imágenes MODIS. XIII Congreso Asociación Española Teledetección. Calatayud, Zaragoza, pp.293-296.

CASTELLNOU, M.; PAGES, J.; MIRALLES, M.; PIQUÉ, M.; 2009. Tipificación de los incendios forestales de Cataluña. Elaboración del mapa de incendios de diseño como herramienta para la gestión forestal. V Congreso Forestal Español. Ávila.

DACC; 2014. Programa de lucha antigranizo. Dirección de Agricultura y Contingencias Climáticas. Ministerio de Producción, Tecnología e Innovación. Gobierno de Mendoza. En: <http://www.contingencias.mendoza.gov.ar/lucha.php> (2014)

GADEX; 2009. Informe técnico del incendio de los montes de Zuera y Castejón de Valdejasa. Grupo de Apoyo al Director de Extinción. Departamento de Medio Ambiente. Gobierno de Aragón.

HAINES, D. A.; 1988. A lower atmosphere severity index for wildfire fires. *Fire Weather*, Vol 13, No. 2.

HOLZWORTH, G. C.; 1967. Mixing depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States. *Journal of Applied Meteorology*, v.6, pp. 1039-1044.

McRAE, R.; 2010. Lessons from recent research into fire in the high country: checklist for fire observers. Australian Capital Territory Government, Emergency Services Agency & HighFire Risk Project.

MEULENERT, A. R.; CORNEJO, V. M.; RAMÍREZ, H. U.; GARCÍA, M. E.; GARCÍA, F. O.; ALCALÁ, J.; 2006. Análisis de las inversiones térmicas en la ZMG y su relación con los índices de contaminación. Memorias XI Congreso Internacional y Nacional de Ciencias Ambientales. Oaxtepec, Morelos.

NWS-NOAA; 2009. NOAA technical memorandum NWS SR-145. National Oceanic and Atmospheric Administration. En: <http://www.srb.noaa.gov/oun/?n=spotterglossary2#c> (2014).

PALENCIA COTO, C.; 2011. Tesis: Medida del granizo mediante granizómetros. Universidad de León. León.

QUÍLEZ MORAGA, R.; 2006. Descripción de la rotura de un cinturón térmico durante la extinción del incendio de Torremanzanas (Alicante) España, 17 de agosto de 2005. *Revista Incendios Forestales* No. 14.

QUÍLEZ MORAGA, R.; 2013. Incendios convectivos en España: casos de estudio y recomendaciones en las estrategias de extinción. VI Congreso Forestal Español. Vitoria-Gasteiz.

SMA; 2001. Informe climatológico ambiental de la cuenca del valle de México. Secretaría del Medio Ambiente. Gobierno del Distrito Federal.

TREJO VÁZQUEZ, R.; VILLAGÓMEZ PARRA, R.; 2011. Método propuesto para estimar la altura de capa de mezcla en la atmósfera, con ayuda de la aviación. *Conciencia Tecnológica* No. 44.

UCAR; 2013. Dominio del tefigrama. University Corporation for Atmospheric Research. En: http://www.meted.ucar.edu/mesoprime/tephigram_es (2014)

URJC; 2006. Guión práctica de meteorología: Análisis del estado de la atmósfera mediante el uso de un radiosondeo. Universidad Rey Juan Carlos. Madrid.

UW; 2014. Wyoming Weather Web. University of Wyoming. En: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html> (2014)