

UNIVERSITAT DE VALÈNCIA

Facultad de Física

Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica



Climatología del Índice de Haines y aplicación a los incendios forestales en la Comunidad Valenciana

Doctorado en Física del Medio Ambiente (345D)

TESIS DOCTORAL 2015

MARIA JESÚS BARBERÀ BISBAL

DIRECTORAS: RAQUEL NICLÒS Y MARÍA JOSÉ ESTRELA

Dña. RAQUEL NICLÒS CORTS, Investigadora Contratada del Programa “Ramón y Cajal” en el área de Física de la Tierra, adscrita al Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica de la Universitat de València y

Dña. MARÍA JOSÉ ESTRELA NAVARRO, Profesora Titular del Departamento de Geografía de la Universitat de València,

CERTIFICAN: Que la presente memoria “*Climatología del Índice de Haines y aplicación a los incendios forestales en la Comunidad Valenciana*”, presentada por Maria Jesús Barberà Bisbal ha sido realizada bajo su dirección constituyendo su Tesis Doctoral para optar al grado de Doctora en Física por la Universitat de València.

Y para que así conste, en cumplimiento de la legislación vigente, firman el presente certificado en Burjassot, a 22 de octubre de 2015

Fdo.: Raquel Nicolòs Corts

Fdo.: María José Estrela Navarro

*“Lo hermoso del desierto es que en
cualquier parte esconde un pozo”*

A mi familia

No quiero dejar pasar esta oportunidad para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que con su ayuda han hecho posible la elaboración de esta tesis.

En primer lugar a mis directoras, la Dra. *María José Estrela Navarro* y la Dra. *Raquel Niclòs Corts* porque si es grande su calidad científica aún mayor es la humana. Gracias por vuestro tiempo y esfuerzo, sin vosotras esto no hubiera sido posible.

Al CEAM por la oportunidad que me dio de dedicarme a la investigación en un ambiente que ojala algún día vuelva a encontrar en mi vida laboral. Gracias a la gran familia de “meteorolocos”, *Josean, Paco, Javi, David, Igor, César, María José Marín, Raquel y Estrela* ha sido un verdadero placer conocerlos y trabajar con vosotros.

Me gustaría dar las gracias al resto de amigos del CEAM, en particular al gran experto en SIG *Eloi*, así como a *José Antonio Alloza* y *Teresa* por facilitarme toda la información que he necesitado.

A *Raúl Quílez* por sus apreciables aportaciones y transmitirme la inquietud en este tema.

Al grupo de Teledetección Térmica del Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica. A *Vicente Caselles* agradecerle su disponibilidad y la confianza depositada en mí. A *Enric, Cesar, Vicente García, Juanma, Carol, Celia, Edu, Diego, Xumi, Mar, María, Eva, Raúl*, gracias por vuestro apoyo y por tan buena acogida. Agradecer también a *Paula, Guillem, Niobe, Amparo Coll, Roberto, Amparo Sebastiá, Enrique Villaescusa, Pilar Utrillas* y al resto de compañeros de departamento su ayuda y los momentos compartidos.

A *Marc Lawrence* por sus recomendaciones en el cálculo de las temperaturas y a *Wesley Ebisuzaki* por su asistencia en la elección de la base de datos.

A toda mi familia especialmente a mi *padre*, ese gran luchador (seguro que saldremos de ésta campeón), mis *hermanos* (la mejor herencia del mundo), mis *cuñadas*, mi *tía, suegra* y *Sanchis* por apoyarme y animarme en todas las decisiones y estar siempre a mi lado. A mis “chiquitines” *Mar, Arnau, Alba, Pau, Vicent y Ximo* por tanto amor y hacerme sentir tan bien.

Agradecer a *Nurieta, el Manyet, Jaz, Eva, Geles*, al resto de “*pitonas*”, *Remediets, Pati, Marta*, y en general a todos mis amigos por su compañía y sustento, ha sido una gran suerte que nuestros caminos se cruzaran.

A todos mis familiares y amigos que ya no están aquí sobre todo, a dos de mis ángeles de la guarda, mi *madre* y mi *abuela*.

Al conjunto de doctores expertos encargados de evaluar esta tesis y al tribunal por su tiempo y dedicación en esta tarea.

Finalmente, agradecer al Ministerio de Educación y Ciencia la financiación recibida a través del proyecto CGL2011-30433-C02-02: "Impacto térmico en fenómenos meteorológicos de ecosistemas mediterráneos: desarrollo de técnicas de teledetección y una red automática de radiometría angular de campo".

ÍNDICE

Capítulo 1: Introducción	1
1.1) <i>Justificación del estudio</i>	3
1.2) <i>Introducción a los métodos para la predicción de inicio y comportamiento de los incendios forestales</i>	6
1.2.1 Método Canadiense. Fire Weather System (FWI)	7
1.2.1.a <i>Índice de propagación (ISI) e índice de combustión (BUI)</i>	9
1.2.1.b <i>Índices de predicción del estado del combustible</i>	9
1.2.2 Método Estadounidense. National Fire Danger Rating System (NFRS)	10
1.2.2.a <i>Índices para la predicción del comportamiento de los incendios forestales</i>	12
1.2.2.b <i>Índices para la predicción de la ocurrencia de los incendios forestales</i>	13
1.2.2.c <i>Índice de carga de fuego (FLI)</i>	14
1.2.3 El Índice de riesgo australiano (FFDI)	15
1.2.4 La predicción del riesgo en la Cuenca Mediterránea	15
1.2.5. El Índice de Haines	19
1.3) <i>Objetivos y novedades</i>	20

Capítulo 2: Caracterización de los incendios forestales y área de estudio	25
<i>2.1) Características de los incendios forestales</i>	<i>27</i>
2.1.1 Propagación del fuego	28
2.1.2 Factores que influyen en la propagación y el comportamiento del fuego	28
2.1.2.a Factores del combustible	28
2.1.2.b Factores meteorológicos	29
2.1.2.c Factores topográficos	29
2.1.3 Tipos de fuego según la propagación	30
2.1.4 Tipos de fuego por patrones de movimiento	31
2.1.5 Partes de un incendio	32
2.1.6 Variables de comportamiento del incendio	33
<i>2.2) La Comunidad Valenciana: características, riesgo y estadística de los incendios forestales</i>	<i>34</i>
2.2.1 Información territorial	34
2.2.1.a Orografía	35
2.2.1.b Sustrato geológico	37

2.2.1.c	<i>Climatología</i>	38
2.2.1.d	<i>Vegetación</i>	40
2.2.2	Análisis del riesgo y la vulnerabilidad en la Comunidad Valenciana	42
2.2.2.a	<i>Zonificación del territorio</i>	43
2.2.2.b	<i>Índice de peligrosidad de incendios forestales</i>	45
2.2.2.c	<i>Épocas de peligro</i>	49
2.2.3	Evaluación de la frecuencia de incendios	49
	Capítulo 3: Climatología del HI y análisis sinóptico	55
3.1)	<i>Características del HI</i>	57
3.2)	<i>Metodología</i>	62
3.2.1	Patrones espaciales del HI a nivel climático	68
3.2.2	Patrones temporales del HI a nivel climático	69
3.2.3	Patrones espaciales y temporales de los eventos extremos	70
3.2.4	Análisis sinóptico asociado a los valores del HI	70

3.3) <i>Resultados</i>	74
3.3.1 Climatología del HI	74
3.3.1.a <i>Patrones espaciales del HI a nivel climático</i>	74
3.3.1.b <i>Patrones temporales del HI a nivel climático</i>	78
3.3.1.c <i>Patrones espaciales y temporales de los eventos extremos</i>	82
3.3.2 Análisis sinóptico asociado a los valores del HI	88
Capítulo 4: Análisis de nuevas fuentes de datos para el cálculo del HI	91
4.1) <i>Caracterización de los incendios de estudio</i>	94
4.2) <i>Metodología</i>	103
4.2.1 Sondeadores atmosféricos	103
4.2.1.a <i>Atmospheric Infrared Sounder (AIRS)</i>	103
4.2.1.b <i>Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)</i>	105
4.2.2 Procesado de las imágenes y extracción de la información	107
4.2.3 Comparación de diferentes fuentes de datos en la estimación del HI	109

<i>4.3) Resultados</i>	<i>112</i>
4.3.1 Mapas de previsión obtenidos mediante los datos de los sondeadores atmosféricos	112
4.3.2 Resultados estadísticos para el conjunto de los perímetros de los incendios	124
4.3.3 Evolución del HI para los incendios de estudio	128
Capítulo 5: Conclusiones	133
Bibliografía	139
Anexo (publicación)	151

Capítulo 1:

Introducción

1.1) *Justificación del estudio.*

Los incendios forestales son un fenómeno habitual a lo largo de la historia de la cuenca mediterránea. Estos incendios se han visto favorecidos tanto por las condiciones climáticas mediterráneas como por las prácticas tradicionales de explotación del suelo. Como es sabido, la Comunidad Valenciana (CV) es una de las regiones españolas que en la última parte del siglo pasado experimentó un notable incremento tanto en el número de incendios forestales como en la superficie quemada, (Vallejo y Alloza, 1998; Pausas y Vallejo, 1999). Un análisis de los datos correspondientes a los incendios de los últimos 30 años indica que los accidentes con pérdidas humanas son, en su mayoría, resultado de cambios repentinos en la dinámica del fuego. Por tanto, un buen conocimiento de las condiciones meteorológicas y su evolución podría contribuir a evitar catástrofes y la pérdida de vidas humanas (Estrela et al., 2015).

Una revisión de la literatura científica en incendios forestales indica que muchos estudios se centran en los efectos del fuego en la vegetación, en los cambios en las propiedades del suelo y en los procesos de regeneración de los ecosistemas (Trabaud, 1982; Moreno y Oechel, 1994; Vallejo, 1996). Otros trabajos tratan de modelizar la propagación de los incendios forestales atendiendo tanto a los procesos puramente físicos que los caracterizan como a los que han de determinarse desde un punto de vista empírico dada la complejidad del fenómeno (Simeoni et al., 2001; Santoni et al., 2000; Andre y Viegas, 1998; Viegas et al., 1998). El principal objetivo de la modelización del comportamiento del fuego es la descripción del mismo basándose en la forma del frente de llama y en la velocidad de propagación en cualquier momento del fenómeno, es decir la predicción de sus propiedades macroscópicas a tiempo real según unas condiciones de contorno que deben conocerse durante la aplicación del modelo. Entre las principales condiciones de contorno que afectan a la propagación del fuego se encuentran: la pendiente del terreno,

como el elemento topográfico más importante, el tipo y cantidad de combustible presente en tres posibles capas o niveles así como su contenido en humedad, y finalmente las condiciones meteorológicas, con especial atención tanto a los efectos a largo y corto plazo producidos por la precipitación como al papel fundamental del viento en las condiciones de propagación.

Existen distintos índices meteorológicos de riesgo de incendios forestales (algunos descritos en las siguientes secciones de este capítulo y el posterior), unos más generales a escala global (Carrega, 1991; Van Wagner, 1987) y otros de ámbito regional, como el aplicado en el Plan de Prevención de Incendios en la CV (PREVIFOC, Mediavilla et al., 1994). Estos índices meteorológicos se elaboran a tiempo real haciendo uso de datos correspondientes a diferentes variables meteorológicas que se registran en distintas estaciones repartidas a lo largo de un territorio. En su mayoría tratan de evaluar el contenido de humedad de las distintas capas en las que se encuentra el combustible, no obstante también incorporan la velocidad del viento para la estimación de la propagación del frente de llama en un posible incendio. Concretamente el índice desarrollado en la CV (PREVIFOC) distingue incluso entre dos tipos de viento según su dirección de procedencia: terrales y no terrales, dadas sus distintas características en la región.

La capacidad de proporcionar previsiones espaciales y temporales adecuadas del riesgo de ignición y propagación de los incendios forestales es crucial en la planificación de la extensión del fuego y la minimización de riesgos de incendio. Los esquemas de previsión de riesgo de incendios actuales están elaborados principalmente a partir de variables meteorológicas, además de otras asociadas al combustible presente.

Sin embargo, estos índices se calculan a partir de las variables meteorológicas en superficie (McArthur, 1967; Deeming et al., 1977; Turner y Lawson, 1978; Vélez, 1982; Van Wagner y Pickett, 1985) que, por otra parte, no son las únicas que marcan la extensión del fuego. De hecho, cuando las

condiciones meteorológicas, la cantidad de combustible y la topografía se mantienen constantes, la inestabilidad atmosférica y la sequedad del aire pueden promover la propagación de un incendio forestal mediante la generación de calor por columnas de convección dentro y alrededor de la columna de humo, que producen fuertes corrientes de aire y puede provocar la ignición de nuevos fuegos (Werth y Ochoa, 1993). La inestabilidad atmosférica y la sequedad han sido asociada a grandes incendios forestales durante muchos años (Brotak y Reifsnnyder, 1977; Brotak, 1980; Werth y Ochoa, 1993; Potter, 1996; Jones y Maxwell, 1998; Reges y Alden, 1998; Werth y Werth, 1998; Croft et al., 2002a, 2002b; Jenkins, 2002, 2004; Choi et al., 2006; Long, 2006; Mokoric y Kalin, 2006; Weber y Dold, 2006; McCaw et al., 2007; Winkler et al., 2007; Trouet et al., 2009, Peace et al., 2012). Haines (1988) fue el primero en desarrollar un índice de riesgo de incendio basado en el contenido de humedad y la estabilidad en las capas atmosféricas más bajas. El HI es un indicador del riesgo potencial de incendios forestales cuando el penacho convectivo vertical es más importante que la vientos horizontales, es decir, los llamados incendios dominados por columna (Haines, 1988).

Se han llevado a cabo multitud de estudios para evaluar el HI en diferentes países. No obstante, el HI no se ha aplicado en el Cuenca del Mediterráneo occidental, a pesar de que se han identificado incendios dominados por columna en varias campañas experimentales de diversos proyectos de investigación europeos realizados en áreas de la CV, como Land use changes interactions with fire in Mediterranean landscapes (LUCIFER), 1996–2000; Forest fire spread prevention and mitigation (SPREAD), 2002–2004, y Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory: A ‘wall-less’ Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region (EUROFIRELAB), 2003–2006. Durante la última década, el Consorcio provincial de bomberos de Valencia ha observado un aumento significativo de incendios dominados por columna, por lo que es importante disponer de información fiable para predecir e identificar este tipo de incendios debido a que

la extinción de estos puede resultar compleja debido a su comportamiento errático (Quílez, 2007; Barberà et al., 2009, 2010a, 2010b; Peace et al., 2012).

1.2) Métodos para la predicción de inicio y comportamiento de los incendios forestales.

Predecir el riesgo de incendio forestal, es decir, valorar con antelación la probabilidad de su inicio y la forma en que se propagará, es de gran importancia con el fin de:

- ✓ Distribuir adecuadamente los medios de prevención para lograr la mayor efectividad en el control de las causas y en la detección de los incendios.
- ✓ Movilizar con anticipación los equipos de lucha a fin de llegar lo más rápido posible a los incendios y evitar su propagación.
- ✓ Concentrar los esfuerzos de prevención y lucha en las zonas que lo precisan, reduciendo los costes de estas acciones y las pérdidas causadas por los incendios.
- ✓ Alertar a la población.

Todos los métodos de predicción tienen en común el uso, principalmente de datos meteorológicos y de humedad del combustible (*Turner y Lawson, 1978 y Van Wagner y Pickett, 1985, Deeming et al., 1977*). Debido a que estos factores no son los únicos que influyen en el inicio y comportamiento de los incendios forestales, en algunos métodos se introducen otros parámetros para mejorar su fiabilidad, como por ejemplo la acumulación de agua en el suelo y la periodicidad de ocurrencia de incendios (*Arnaldos et al., 2004*).

En general la predicción se realiza calculando:

- ✓ En primer lugar, los valores numéricos de diferentes tipos de índices existentes, descritos brevemente en las secciones siguientes. Para obtener estos índices se utilizan las distintas ecuaciones de los modelos matemáticos desarrollados a tal efecto, que relacionan los diferentes factores considerados en cada uno de ellos.
- ✓ Estos índices se comparan con valores de diferentes tablas cualitativas, obtenidas esencialmente a través de experimentación, pasándose así de los valores numéricos a valores cualitativos de predicción. De este modo, se obtienen expresiones como por ejemplo “riesgo muy alto” o “riesgo muy bajo”.

Finalmente, en algunos casos, se relacionan estos índices para obtener un índice final de síntesis con objetivos distintos según los métodos. Generalmente, para su mayor divulgación y comprensión, estos índices finales son representados gráficamente por medio de mapas.

1.2.1 Método Canadiense. Fire Weather System (FWI)

El sistema canadiense (*Turner y Lawson, 1978 y Van Wagner y Pickett, 1985*) puede representarse como una pirámide de tres niveles que tiene en su vértice inferior el índice meteorológico de incendio (*Fire Weather System, FWI*) de carácter general para la información pública y, en el resto de niveles, distintos índices especializados para el uso por parte de los gestores de la prevención y extinción de los incendios (Figura 1).

El *FWI* está concebido para valorar el riesgo de propagación del incendio a partir de la evaluación de la *intensidad lineal del frente del incendio* o *Intensidad de Byram*, haciendo especial hincapié en dos de sus componentes esenciales, la velocidad de propagación y la masa de combustible quemada. Los distintos rangos de valores de dicho índice se asocian a la clasificación de clase de riesgo mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1 Clase de riesgo de propagación FWI.

Clase de riesgo de propagación	Valor de FWI
Extremo	30 +
Muy alto	17 - 29
Alto	9 - 16
Moderado	5 - 8
Bajo	2 - 4
Muy bajo	0 - 1

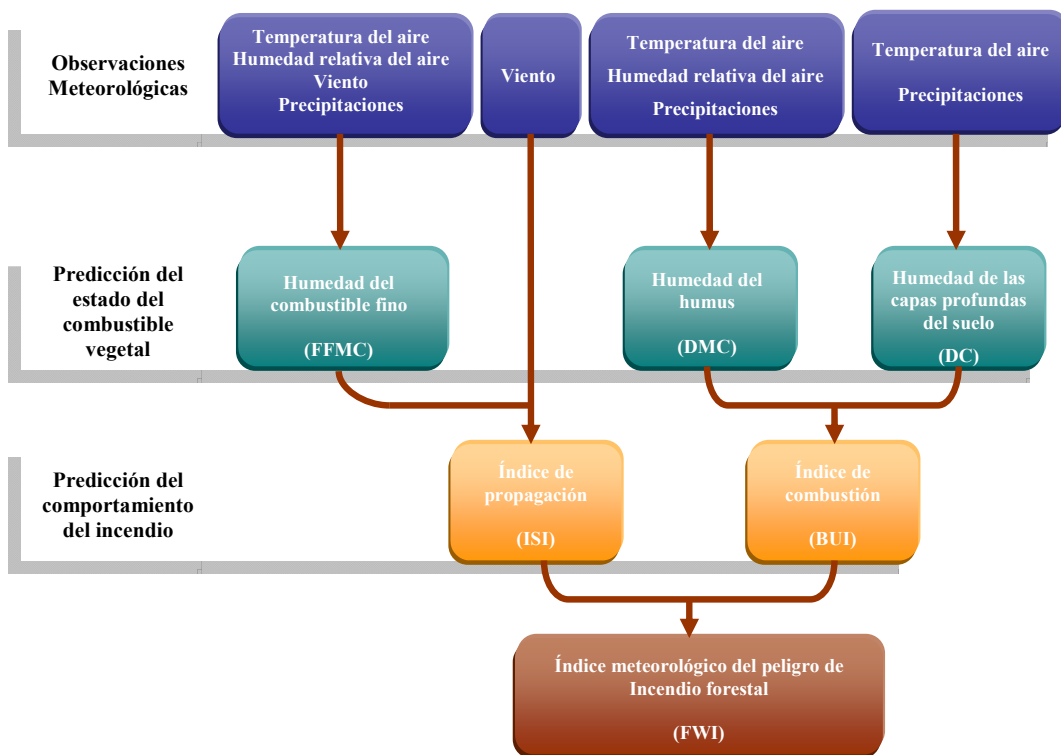


Figura 1 Esquema del método canadiense. Fuente: Arnaldos et al., 2014.

1.2.1.a Índice de propagación (ISI) e índice de combustión (BUI)

El cálculo del *FWI* requiere, de este modo, las evaluaciones previas de dos índices de riesgo correspondientes a la propagación y a la combustión denominados respectivamente con las siglas *ISI* (*Inicial Spread Index*) y *BUI* (*Building Index*).

- ✓ El índice de riesgo para la propagación (*ISI*) evalúa la peligrosidad del avance de un frente de incendio combinando la velocidad del viento con el índice de humedad del combustible fino (*Fine Fuel Moisture Code, FFMC*).
- ✓ El índice de combustión (*BUI*) predice la cantidad total de combustible disponible para quemar. Se calcula relacionando el índice del contenido de humedad de las primeras capas del suelo (*Duff Moisture Code, DMC*), correspondientes a los estratos medios del mantillo en descomposición, con el índice de sequía (*Drought Code, DC*), el cual valora el contenido de humedad de los estratos profundos, adyacentes al suelo mineral, de este mantillo.

1.2.1.b Índices de predicción del estado del combustible

En el tercer nivel de predicción, los índices de humedad del combustible fino (*FFMC*), del contenido de humedad del mantillo (*DMC*) y de las capas profundas del suelo (*DC*) indican las influencias de la sequía de superficie sobre la velocidad potencial de propagación, y la influencia de la sequía a medio y largo plazo sobre el potencial de consumo de combustible.

- ✓ El índice de humedad del combustible fino (*FFMC*) predice la susceptibilidad relativa de ignición de los estratos superficiales del mantillo (materiales con un diámetro inferior a 0,6 cm). Se obtiene a partir de los datos diarios de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y precipitación.
- ✓ El índice de humedad del mantillo (*DMC*) predice el consumo, durante la combustión, de los materiales de los estratos medios del

mantillo. Se calcula con los valores diarios de la precipitación, humedad relativa y temperatura.

- ✓ El índice de sequía (*DC*) predice los efectos estacionales o acumulativos de la sequía en los combustibles forestales. Se evalúa con la precipitación y la temperatura.

1.2.2 Método Estadounidense. National Fire Danger Rating System (NFRS).

El sistema de predicción de los Estados Unidos (*Deeming et al., 1977*) tiene una estructura parecida al canadiense (Figura 2). Se inicia con la recogida y el procesado de datos meteorológicos y territoriales, continúa con el cálculo de dos grandes bloques, el primero referido a la ocurrencia de incendios forestales y el segundo al comportamiento de los incendios forestales, y finaliza con un valor de síntesis, el *Índice de carga de fuego (Fuel Load Index, FLI)*. Dicho índice predice la dificultad de contención de los incendios que pueden producirse en un área y tiempo determinados. Este índice se usa para elaborar la predicción general de todo el país. El resto de componentes son utilizados por los servicios de prevención y extinción para predicciones locales de peligro de incendio y de comportamiento del mismo.

A continuación se interpretan los diferentes niveles de cálculo empezando por las primeras fases y terminando en el índice de síntesis. El proceso de cálculo se inicia con el estudio de los siguientes índices:

- ✓ El *Índice de sequedad de Keetch-Byram (Keetch-Byram Drought Index, KBDI)*, que predice el balance neto de la evapotranspiración y de la precipitación, con el objeto de valorar la deficiencia acumulativa de humedad en el suelo. Este índice se obtiene a partir de observaciones diarias, de la media anual de precipitación, de las temperaturas máximas del día y de la precipitación diaria (*Keetch y*

Byram, 1968). La escala utilizada en dicho índice va de 0 a 800, donde 0 corresponde al valor de saturación absoluta de agua en el suelo, y 800 a unas condiciones de sequedad extrema.

- ✓ *Factor de vitalidad (Greenness factor, GF)*, que predice el estado de marchitez de los combustibles forestales vivos, tanto leñosos como herbáceos. El *factor de vitalidad* se obtiene a partir de la observación del combustible forestal leñoso o herbáceo vivo. Comprendido entre 0 y 20, 0 indica sequedad absoluta del combustible y 20 refleja su estado de mayor turgencia (*Burgan, 1988*).

Conocidos estos valores (*KBDI* y *GF*) se predice el comportamiento de los incendios y de su ocurrencia a través de los índices que se describen a continuación.

La predicción del comportamiento de los incendios forestales se realiza a través del *Índice de combustión (Burning Index, BI)*, que valora la dificultad de contención de un incendio forestal relacionando la intensidad del frente del incendio (*Intensidad de Byram*) y la longitud de llama. Su cálculo se obtiene integrando los siguientes componentes:

- ✓ *Componente de energía liberada (Energy Release Component, ERC)*, que predice la cantidad de energía disponible que puede ser emitida por unidad de área del frente del incendio forestal (kW/m^2). Su cálculo sigue la modelización matemática de propagación de incendio de superficie desarrollada esencialmente por *Rothermel (1972)*.
- ✓ *Componente de velocidad de propagación (Spread Component, SC)*, que predice la velocidad de propagación del frente del incendio forestal (m/min). Para su cálculo se utiliza la misma modelización matemática anterior.

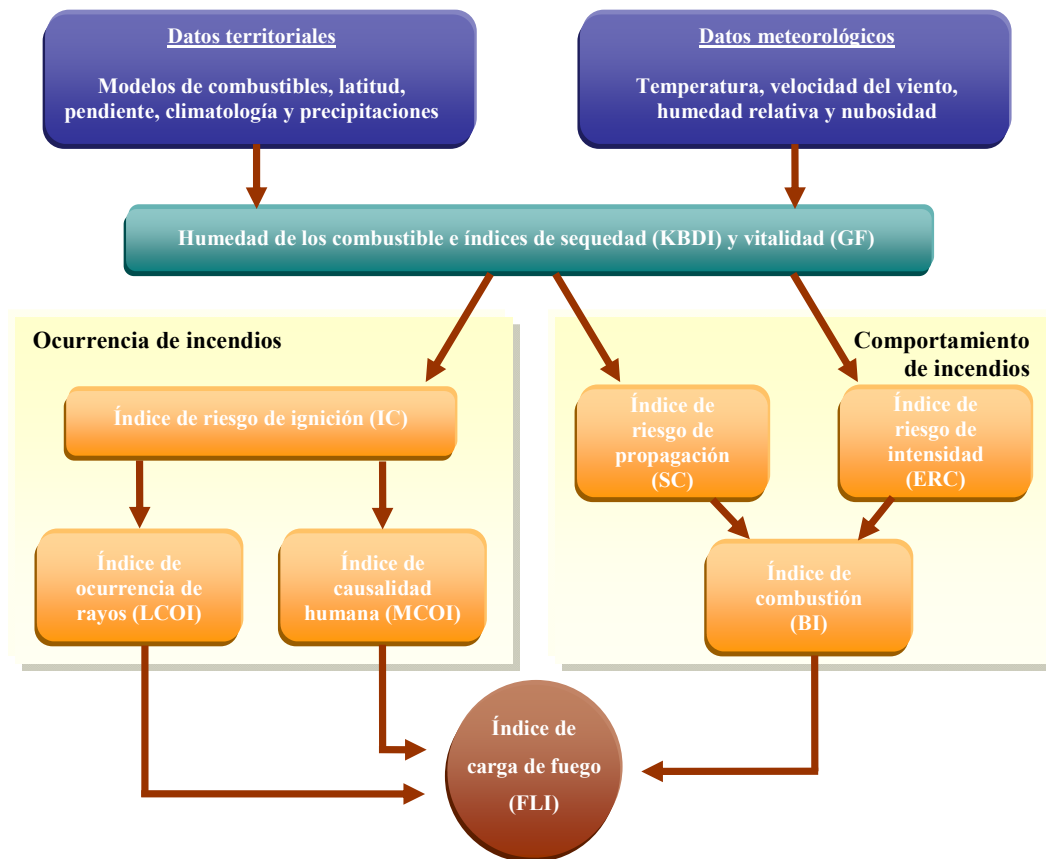


Figura 2 Esquema del método estadounidense. Fuente: Amaldos et al., 2014.

1.2.2.a Índices para la predicción del comportamiento de los incendios forestales

Los valores de SC y ERC se aplican a una versión modificada de la ecuación de longitud de llama de Byram (F_L):

$$F_L = j \left[\left(\frac{SC}{60} \right) x [25x(ERC)] \right]^{0,46}$$

donde j es un factor de escala.

A partir del valor de F_L se deduce el índice de combustión (BI) de acuerdo con la Tabla 2.

Tabla 2 Escala del Índice de combustión BI.

Longitud de llama (F _L)	Índice de combustión (BI)
2,8	0 – 28
3,8	38
7,8	78
9,2	92
10,8	108

Este índice integra, en definitiva, parámetros característicos de los combustibles como la carga, su compactación, el calor de combustión, el contenido de minerales, etc., con la humedad de estos combustibles medida de forma indirecta a partir de datos meteorológicos (temperatura del aire, humedad relativa del aire, velocidad del viento, porcentaje de nubosidad y precipitación).

1.2.2.b Índices para la predicción de la ocurrencia de los incendios forestales.

Para una mayor efectividad en la predicción se valora también, a través de distintos índices, el número de incendios forestales que se esperan en una zona y tiempo determinados.

Para obtenerlo se halla, en primer lugar, el *componente de ignición* (*Ignition Component, IC*). Su valor permite determinar la probabilidad de que una zona pueda entrar en ignición, por la llegada de una fuente de calor externa (rayo, cerilla, brasa en estado incandescente, etc.). Su cálculo sólo considera el estado de los combustibles forestales finos muertos (diámetro inferior a 0,6 cm), por ser los que más fácilmente entran en combustión.

Conocido el *componente de ignición, IC*, pueden calcularse los siguientes parámetros:

- ✓ *Índice de ocurrencia de rayos (lightning-caused occurrence index, LCOI)*, que evalúa el peligro de inicio de un incendio forestal, en una zona y período delimitado, a causa de los rayos.
- ✓ *Índice de causalidad humana (man-caused occurrence index, MCOI)*, que evalúa el peligro de inicio de un incendio forestal, en una zona y período de tiempo delimitado, a causa de la intencionalidad o negligencia humana.

1.2.2.c *Índice de carga de fuego (FLI).*

Finalmente, combinando los índices de ocurrencia y de combustión, se calcula el *Índice de carga de fuego, FLI*, índice de síntesis, que predice la dificultad de extinción o contención de los posibles incendios que pueden ocurrir dentro de un área específica, en un día determinado.

La expresión de cálculo es la siguiente:

$$FLI = \sqrt{\frac{(BI^2 + (MCOI + LCOI)^2)}{1,41}}$$

Para los distintos valores de *FLI*, que varían entre 1 y 100, se ha establecido una evaluación cualitativa del riesgo y un código de colores que se recoge en la Tabla 3.

Tabla 3 Valoración cualitativa de *FLI*.

Valoración y código de color				
Bajo	Moderado	Alto	Muy alto	Extremo
Verde oscuro	Azul	Amarillo	Naranja	Rojo
<i>FLI</i> : 0 - 4	<i>FLI</i> : 5 - 11	<i>FLI</i> : 12 - 23	<i>FLI</i> : 24 - 49	<i>FLI</i> :50 - 100

Cabe señalar que el *FLI* tiene un carácter general y se calcula para todo el país. Sin embargo, este índice por sí sólo no da una predicción local

detallada. Para pronósticos más concretos a escalas inferiores, el analista debe considerar los valores particulares de los distintos índices del método.

1.2.3 El Índice de riesgo australiano (FFDI)

En Australia se desarrolló el FFDI (Forest Fire Danger Index) siendo McArthur (1967) uno de los investigadores más relevantes en la construcción del índice fundamentándose en una base de datos experimentales. Resulta también un índice complejo, denominado Índice de Peligro, que como resultado final puede presentar las siguientes categorías de 0 a 100 (Tabla 3).

Tabla 3 Valores del FFDI para cada clasificación de peligro (Luke and McArthur 1986).

Clase	Valor del Índice de Peligro
Bajo	0-5
Moderado	5-12
Alto	12-24
Muy Alto	24-50
Extremo	50-100

Se requieren para el cálculo datos de temperatura máxima, precipitación, humedad relativa, velocidad del viento, estabilidad atmosférica, sequía previa y cantidad de combustible. A partir de una serie de tablas de origen estadístico-empírico se obtienen los índices y factores intermedios que darán lugar al Índice de Peligro final.

1.2.4 La predicción del riesgo en la Cuenca Mediterránea.

En la mayoría de servicios forestales y administraciones competentes del arco mediterráneo europeo se realizan predicciones diarias de riesgo de incendio. Se utilizan métodos más o menos desarrollados y efectivos, basados,

cada uno de ellos, en las particularidades del territorio y de la gestión forestal de cada país. Se hallaría una prueba ilustrativa de ello realizando una comparación exhaustiva de los distintos métodos empleados tradicionalmente en Francia, *Orieux (1974)*, en Italia, *Palmieri et al. (1993)*, y en España, *Vélez (1982)*, por ejemplo. Así se identificarían diferentes variables de estudio en cada caso (*Viegas, 2000*).

Aunque esta diversidad es aún manifiesta, en los últimos años se han dedicado esfuerzos para homogeneizar e implantar métodos estándares y suficientemente elaborados para modelizar el riesgo de incendio en el Sur de Europa. Una de las tendencias más claras ha sido, la adaptación de los modelos norteamericanos descritos, ya que son muy completos y fiables. Un ejemplo evidente se encuentra en el caso francés. Desde 1995, se aplica el método denominado *Forêt-Météo*, basado en gran medida en el método canadiense. Se describe también en fases secuenciales (*Bidet 2001*) que comprenden: el análisis del estado de sequedad del combustible, el análisis de la situación meteorológica y el cálculo de los distintos índices de riesgo con su consecuente interpretación y divulgación. La implantación de este método se lleva a cabo paralelamente con trabajos de experimentación y validación que contribuyen a incrementar su eficacia operacional. En este sentido, pueden citarse la medición sistemática del contenido hídrico de los combustibles forestales, que realiza desde el año 1996 la *Office Nacional des Forêts* (Servicio Nacional de Bosques) durante el verano en más de 30 puntos de muestreo repartidos por los departamentos mediterráneos franceses, y las mediciones de la inflamabilidad de los combustibles efectuadas durante muchos años por el *INRA, Institut National de la Recherche Agronomique* (Instituto Nacional de Investigación Agraria), de Avignon.

La predicción en el sistema francés se realiza a dos escalas temporales: corto plazo y tiempo real; para las distintas unidades climáticas en las que se divide el territorio. El análisis a corto plazo se elabora dos veces al día. El primer examen se realiza a las 9:30 horas, para predecir el riesgo para la tarde

del mismo día. El segundo, a las 17:00 horas, evalúa el riesgo para la tarde del día siguiente. El análisis a tiempo real se puede efectuar a cualquier hora del día introduciendo los datos meteorológicos del momento. Los cálculos se ejecutan para cada una de las unidades básicas de predicción, de condiciones climáticas homogéneas, en que se ha dividido el territorio. El tamaño medio de estas zonas es de 20-30km x 20-30km y disponen, como mínimo, de una estación meteorológica automática a tiempo real que mide la velocidad y dirección del viento, la temperatura y humedad del aire, la nubosidad y las alturas de lluvia. El arco mediterráneo francés se ha dividido en 96 zonas climáticas y la interpretación final de riesgo la realiza un experto calificando cada una de las zonas climáticas en un nivel de riesgo según una escala de seis niveles.

La tendencia en España ha seguido también esta dirección. A mediados de los años 80 la administración forestal española desarrolló un sistema denominado *Índice de Alerta (IA)* que predice, al mismo tiempo, la facilidad de inicio de un incendio y su capacidad de propagación.

Este método se basa en el cálculo indirecto de la humedad del combustible fino muerto a través de la humedad relativa del aire y la temperatura. Las tablas de conversión utilizadas son las elaboradas por el *Missoula Fire Science Laboratory* del Servicio Forestal de los Estados Unidos de América (EUA). Para adaptarlas a la realidad de la Península Ibérica, se han introducido diferentes sumandos correctores que consideran las sequías prolongadas y el efecto desencadenante de los vientos terrales.

Una vez hallada la humedad del combustible fino, se relaciona con la temperatura y el porcentaje de combustible en umbría, obteniéndose un valor en tanto por ciento de la *probabilidad de ignición*. Esta *probabilidad de ignición* valora la capacidad de provocar la combustión que tiene una pavesa o brasa, al caer sobre el combustible ligero muerto.

La *probabilidad de ignición* correlacionada con la *velocidad del viento* establece un *Índice de Alerta* de acuerdo con la Tabla 4.

Tabla 4 Índice de Alerta (IA). ¹ Riesgo bajo o moderado, ² Riesgo moderado, ³ Riesgo alto y ⁴ Riesgo extremo

Probabilidad de ignición (%)	Velocidad de los vientos no terrales (km/h)			
	0 - 9	10 - 19	20 - 39	> 40
10 - 20	Prealerta ¹	Prealerta	Prealerta	Alerta
20 - 50	Prealerta	Alerta ²	Alerta	Alerta
50 - 70	Alarma ³	Alarma	Alarma	Alarma
> 70	Alarma	Alarma	Alarma	Alarma Extrema ⁴

Actualmente se están desarrollando nuevos sistemas de predicción que se asemejan más a los métodos actuales *FWI* y *NFDRS*, como el caso de la *Generalitat de Catalunya* que utiliza para la predicción del riesgo una adaptación del método canadiense entre otros.

Sin embargo, la adaptación de los métodos canadiense y estadounidense resultan ser de gran complejidad debido a los propios requisitos de estos métodos, que exigen estudios exhaustivos de los combustibles locales y precisan parámetros operacionalmente difíciles de obtener.

En conjunto, los sistemas de riesgo constituyen una herramienta de soporte útil para el programa de vigilancia y movilización de los equipos de intervención inmediata en el tiempo y puntos de máximo riesgo.

Como se describe en el capítulo siguiente existen administraciones regionales que han desarrollado su propio sistema. En la CV hay definido un sistema de riesgo de incendio, descrito en detalle en la sección 2.2.2 del capítulo siguiente, que permite la obtención de mapas automáticos de riesgo potencial para el territorio. Este sistema está basado en parámetros estadísticos de riesgo y peligrosidad asociada a los combustibles y las condiciones meteorológicas. Aun así, el consorcio de bomberos provincial está

interesado en índices asociados a incendios dominados por columna, por su peligro y dificultad de extinción, como el que se describe a continuación.

1.2.5 El Índice de Haines.

Durante años, la inestabilidad y el aire seco se han asociado con el desarrollo de grandes incendios forestales en los EUA. *Brotak y Reifsnyder (1977)* analizaron los valores característicos de la diferencia de temperatura en bajos niveles atmosféricos para un gran número de incendios en el Este de EUA y encontraron que la mayoría de los grandes incendios forestales ocurrían en días en los que la diferencia de temperatura en las proximidades de los incendios excedía la diferencia de temperatura estándar. En posteriores estudios, *Brotak (1980)* comparó las características atmosféricas de dos días en los que se producían grandes incendios forestales en el Este de EUA y el Sureste de Australia, encontrando similitudes en las condiciones, tales como bajas humedades, altas temperaturas y fuertes vientos, considerando estas situaciones como representativas de riesgo de incendios forestales. *Haines en 1988* llevó a cabo una rudimentaria comparación de las diferencias de temperatura y sequedad inmediatamente después o durante grandes incendios forestales. Los resultados de este estudio evidenciaron una gran relación entre diferencias de temperatura y sequedad ambiental en altura y el crecimiento de grandes incendios. Más tarde, *Potter (1996)* dirigió un detallado análisis estadístico en gran número de propiedades atmosféricas para determinar los parámetros que varían significativamente de la climatología en los días de gran crecimiento de incendios forestales, concluyendo que esos días la temperatura de la superficie, la depresión del punto de rocío y la humedad relativa en superficie también difieren significativamente de los valores climáticos.

No obstante, *Haines (1988)* fue el primer científico que concibió un índice de riesgo de incendios meteorológico basado en la estabilidad y contenido de

humedad en la baja atmósfera. Este índice fue llamado originariamente *LASI* (*Lower Atmospheric Severity Index*), pero desde hace años es más conocido como *Índice de Haines (HI)*, y fue construido de forma similar a la de los índices clásicos empleados en la predicción de tormentas, como el índice *K* (George 1960) o el *Total Totals* (Miller 1972). Al igual que en estos índices, Haines utilizó datos de temperatura y humedad a determinados niveles atmosféricos, con lo que el índice quedó definido a unos determinados niveles de presión. Debido a las grandes diferencias en la elevación en EUA, para construir el índice se usaron tres combinaciones de niveles atmosféricos que dieron lugar a las tres variantes del índice. Los niveles tomados para cada región se pensaron para que fueran lo suficientemente elevados sobre la superficie evitando así los principales cambios diurnos en la temperatura y humedad relativa causados por la insolación solar, o los efectos de inversiones térmicas o de humedad relativa en superficie.

Para el cálculo del *HI* son necesarios, como se ha mencionado, datos de perfiles atmosféricos y, aunque históricamente se han utilizado datos de radiosondeo o datos de reanálisis, como los ofrecidos por el National Centers for Environmental Prediction (NCEP), utilizados en esta tesis para el desarrollo del primer objetivo, el desarrollo de una climatología del índice para la CV y su análisis sinóptico, el segundo objetivo de la tesis es el análisis de datos procedentes de sondeadores atmosféricos situados a bordo de satélites de observación de la Tierra para la obtención del *HI* y la generación de mapas complementarios de este índice de riesgo.

1.3) Objetivos y novedades.

Habitualmente en el cálculo de los índices de riesgo meteorológico, se implementan variables meteorológicas tales como: humedad, temperatura, viento, precipitación y nubosidad, cuyos datos hacen referencia a los valores a

nivel de superficie sin tener en cuenta los perfiles verticales de la atmósfera. Sin embargo, la presente tesis doctoral tiene como objetivo fundamental y novedad estudiar las características climatológicas asociadas a las capas bajas de la atmósfera que pueden influir en el comportamiento de determinados incendios forestales. Para ello se hace uso del índice *LASI (Lower Atmospheric Severity Index)*, más conocido como *Índice de Haines (HI)*, que combina dos términos, uno de estabilidad y otro de humedad en las capas bajas de la atmósfera. El índice fue desarrollado por Donald Haines (Haines, 1988) para evaluar la influencia de estos dos factores en el crecimiento de incendios forestales dominados por columna. Estos incendios vienen caracterizados por poseer una gran columna de convección que domina el crecimiento del fuego, sin influir en ellos el viento en superficie. Así pues, los incendios dominados por columna difieren de los dominados por viento, ya que en ellos los vientos son débiles y fundamentalmente inducidos por el propio incendio. A diferencia de los incendios dominados por viento, en los que un estudio de los vientos predominantes sería esencial para predecir su propagación, los incendios dominados por columna pueden propagarse de forma errática creando situaciones de gran peligro, la mayoría de las veces, con resultados catastróficos para las brigadas de extinción. Por ello, es importante prever su ocurrencia o establecimiento.

Este objetivo principal se determinará a partir de otros objetivos específicos como son evaluar los patrones espaciales y temporales del *HI*, analizando, en primer lugar, la evolución interanual, intermensual y diaria tanto del promedio como de los valores extremos del *HI*. Con ello, se realiza por un lado, un análisis sinóptico para los distintos valores que puede tomar el índice y, en segundo lugar, se analizan y explotan los datos procedentes de diferentes sensores de teledetección con el objetivo de complementar y mejorar la predicción del *HI* tanto a nivel espacial como temporal. En el presente capítulo se realiza una introducción del tema de estudio y se plantea la justificación y los objetivos del trabajo. En el capítulo 2 se lleva a cabo una caracterización de los incendios forestales y del área de estudio. El capítulo 3 presenta la

metodología definida para generar una climatología del *HI* para la región de estudio, la CV, a la vez que presenta los resultados de esta y las pautas para la interpretación de los valores de *HI* en esta región, así como el análisis sinóptico de los valores de *HI*. El capítulo 4 muestra la capacidad de los productos de sondeadores atmosféricos a bordo de satélite como fuente de datos de gran interés para la estimación y seguimiento del *HI*. Finalmente, en el capítulo 5 se expone las principales conclusiones alcanzadas con la investigación desarrollada en esta tesis doctoral.

En la Figura 4 se incluye, para mayor claridad, un esquema del marco conceptual y la investigación realizada en la presente tesis.

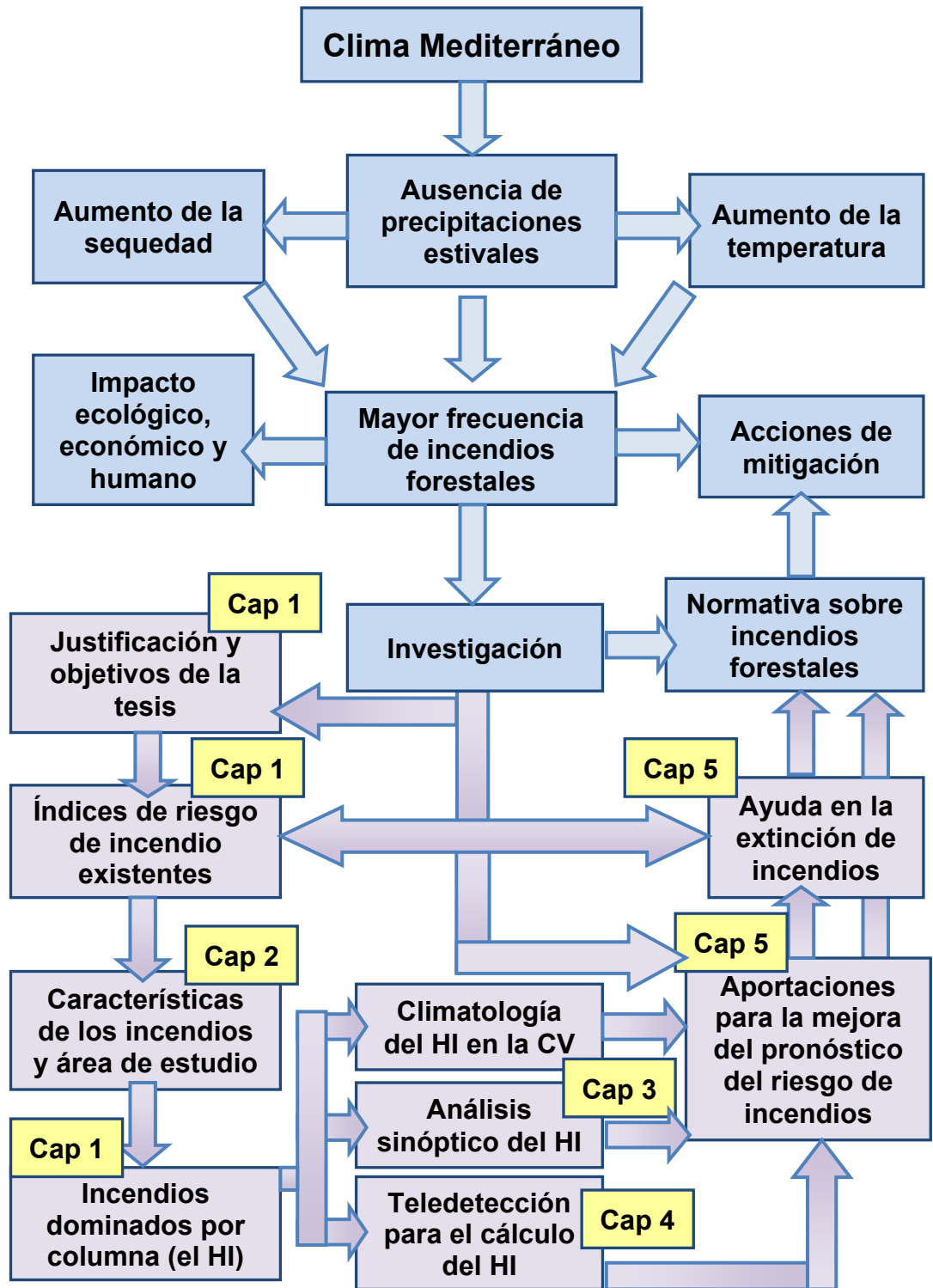


Figura 4 Marco conceptual y esquema de trabajo.

Capítulo 2:

**Caracterización de los
incendios forestales y
del área de estudio**

2.1) Características de los incendios forestales.

El fuego es un agente natural que ha estado presente de manera espontánea y desde tiempo inmemorial en la mayor parte de ecosistemas terrestres, contribuyendo a modelar el paisaje vegetal de determinadas zonas de la tierra como las de clima mediterráneo. A los fuegos espontáneos de la naturaleza, causados por volcanes, rayos o autocombustión, hay que añadir los provocados históricamente por el hombre, bien para deforestar áreas boscosas con fines agrícolas o para conseguir más pastos. Sin embargo, el problema de los incendios forestales se ha ido agravando en los últimos años en muchos países, sobre todo en los de clima mediterráneo, debido a la presencia de una estación lluviosa en la que se produce combustible vegetal y otra seca con un alto riesgo de propagación del fuego entre este combustible (*Pausas 2004a, Piñol et al., 1998*). Este aumento en el número y superficie incendiada se debe a una conjugación de factores, entre los que cabe citar: la acumulación de combustibles en los montes debido a la ausencia de extracciones antaño habituales, como las leñas o los pastos; el mayor uso de los terrenos forestales para el ocio por parte de la población precisamente en épocas de alto riesgo como el verano; el frecuente uso del fuego para la realización de tareas culturales en el campo, como la quema de rastrojos u otros residuos agrícolas, etc. El incremento de la frecuencia de incendios provoca graves daños ecológicos y económicos, pérdida de cubierta vegetal potenciando la erosión, cambios microclimáticos, alteraciones paisajísticas y a veces la pérdida de vidas humanas.

El incendio forestal se produce cuando el fuego afecta a combustibles vegetales naturales, situados en el monte, cuya quema no estaba prevista, siendo necesaria su extinción. El fuego es el fenómeno que se produce al aplicar calor a un combustible en presencia de aire, elevando su temperatura y propiciando el desprendimiento de gases, que mezclados con el oxígeno del aire, proporciona la energía necesaria para que el proceso continúe. Se

entiende por combustible cualquier materia que pueda arder, mientras que combustión es el proceso por el que un combustible emite calor, luz y gases. Para que se produzca un incendio se necesitan tres elementos: calor, aire y combustible, y que todos ellos coincidan en el tiempo y lugar. La relación entre estos tres elementos es lo que se denomina *triángulo del fuego*.

2.1.1 Propagación del fuego.

El calor, y por lo tanto el fuego, una vez iniciado, se propaga de tres formas:

- ✓ Por convección: a través del aire que, calentado por el fuego, tiende a elevarse debido a su menor densidad. El aire caliente tiene mucha importancia en la transmisión del fuego ladera arriba de un incendio.
- ✓ Conducción: por el interior del combustible, para lo que se necesita su continuidad; si se retiran los combustibles se detiene el fuego.
- ✓ Radiación: a través del aire pero sin que éste se desplace. En los incendios forestales sólo afecta cuando entre los combustibles hay distancias cortas.

2.1.2 Factores que influyen en la propagación y el comportamiento del fuego.

No todos los incendios son iguales ya que existen una serie de factores que influyen en su comportamiento, entre los que se pueden citar:

2.1.2.a Factores del combustible.

- a) Grado de combustibilidad. Es la mayor o menor facilidad para arder que tienen los combustibles y depende tanto del tipo de combustible como de la presencia de determinadas sustancias volátiles inflamables como las resinas.

- b) Cantidad de combustible. En ocasiones el abandono de los restos tras cortas o podas incrementa peligrosamente la combustibilidad.
- c) Densidad de la vegetación. Depende de la continuidad horizontal del combustible.
- d) Estratificación de la vegetación. Está relacionada con la continuidad vertical del combustible.
- e) Humedad del combustible. Los combustibles secos arden más deprisa ya que el fuego no tiene que emplear calorías en evaporar agua.

2.1.2.b Factores meteorológicos.

- a) Humedad del aire. Si el aire es seco la combustión es más rápida porque absorbe el vapor de agua desprendido por el combustible. Durante el día la humedad atmosférica disminuye, por lo que la vegetación presenta mayor facilidad para arder que por la noche.
- b) Viento. Aporta oxígeno para la combustión, aumenta la velocidad de propagación, deseca los combustibles al trasladar aire caliente por delante del frente y dispersa partículas de ignición a zonas más alejadas no incendiadas, dando lugar a nuevos focos. Durante el día el aire se calienta formando corrientes de convección que ascienden; sin embargo, por la noche, se producen vientos descendentes.
- c) Temperatura. Influye modificando la humedad y las corrientes de aire, siendo las primeras horas de la tarde las más favorables para la propagación del incendio.

2.1.2.c Factores topográficos.

- a) Pendiente. El fuego avanza más rápido en terreno con pendiente, ya que el aire en ascenso va desecando la vegetación ladera arriba. Hay que tener en cuenta que las vaguadas también favorecen el fuego, al actuar como chimeneas para el aire caliente.

- b) Exposición. Ya que incide en la exposición del Sol y por lo tanto en el grado de humedad del aire y de los combustibles así como en la temperatura.
- c) Relieve. Tiene que ver con los efectos del viento, el efecto chimenea, la posibilidad de inversión térmica, etc.

Estos tres factores forman lo que se denomina la Gran Triada, siendo los combustibles el único factor sobre el que se puede actuar directamente.

2.1.3 Tipos de fuego según la propagación.

En función de su propagación, se pueden clasificar los incendios en:

- a) Incendio de suelo o de superficie: es el más frecuente. El fuego comienza en los combustibles ligeros y puede pasar a la copa de los árboles o bien permanecer en la superficie. Este tipo de incendio se materializa en la muerte de las herbáceas, leñosas de poco porte y heridas en las raíces o bases de los troncos de los árboles.
- b) Incendio de copas: pasa desde la superficie hasta la copa de los árboles, pudiendo transmitirse de copa a copa. Son de efectos devastadores ya que defolian e incluso matan a los árboles.
- c) Incendio de subsuelo: se propaga bajo la superficie, quemando la materia orgánica del suelo. Es poco frecuente y, aunque su desplazamiento es muy lento, su extinción es a veces imposible.
- d) Incendio integral: aquel que afecta a todos los estratos de un sistema vegetal.

2.1.4 Tipos de fuego por patrones de movimiento.

La propagación del fuego, como se ha comentado en el apartado 2.1.2, depende de los factores topográficos, los combustibles y la meteorología. Asimilando estos factores a la observación de medidas directas, estas variables se podrían relacionar respectivamente con la pendiente, la orientación y el viento. Cuando se analiza un incendio se deben estudiar cada una de ellas para determinar su peso en el sistema, es decir, si suman o restan fuerza al sistema. Campbell (2005) que ideó este sistema asignó un sistema binario para describir la propagación, atribuyendo un valor de 1 si la fuerza es positiva y 0 en caso contrario (Tabla 5).

Claramente, en la Tabla 5 se observa que la máxima puntuación en la propagación correspondería a tener 3/3 que haría referencia a todas las fuerzas a favor, y la mínima a 0/3. Así pues, para valorar la evolución del incendio en un área habrá que evaluar los posibles cambios de estas variables.

Tabla 5 Valoración de fuerzas en el sistema de Campbell (2005)

FACTOR	Pendiente	Exposición	Dirección del viento
A favor	1	1	1
En contra	0	0	0

Partiendo de estas ideas se ha desarrollado una nueva clasificación de incendios forestales en función de la variable que domina. Los tipos son los siguientes:

- ✓ Incendios neutros: en los que ninguna fuerza domina sobre el resto.
- ✓ Incendios topográficos: la propagación viene determinada por la microtopografía y los vientos topográficos.

- ✓ Incendios conducidos por viento: el viento es el principal factor de propagación, creando focos secundarios en la dirección de éste y propagándose en general por los ejes principales de las divisorias de agua.
- ✓ Incendios conducidos por convección: Dependen de la disponibilidad de combustible, de las condiciones atmosféricas y de la macrotopografía siguiendo los valles y barrancos. En adelante también se hará referencia a ellos como incendios dominados por columna.

2.1.5 Partes de un incendio.

Una vez iniciado el fuego en un punto, las llamas se van extendiendo a su alrededor formándose una línea perimetral que va ardiendo y quedando en su interior una zona ya quemada. Si el terreno fuese llano, la vegetación uniforme y no soplase viento, el fuego avanzaría por igual en todas las direcciones, entonces el perímetro del incendio sería circular. Cuando sopla viento o el terreno es inclinado el perímetro en llamas suele adoptar una forma elíptica. El fuego tiene distinta intensidad y velocidad en distintos puntos de dicho perímetro y por ello se pueden distinguir las siguientes partes:

- ✓ Borde: Línea perimetral que está ardiendo.
- ✓ Cabeza o frente: Extremo de la elipse por donde avanza más rápidamente el fuego.
- ✓ Flancos: Bordes laterales de la elipse.
- ✓ Cola: Extremo de la elipse en donde el fuego avanza con lentitud.

El frente avanza más rápido cuanto más fuerte es el viento o más inclinado es el terreno pues las llamas van desecando el combustible que está sin arder, lo que facilita su ignición. Por ello, la elipse se va haciendo más alargada.

En los flancos y la cola el fuego no encuentra las mismas condiciones en la vegetación y avanza más despacio. Por esta razón, normalmente será por los lados por donde se podrá atacar el fuego directamente.

En general la forma del fuego no será elíptica debido a la existencia de cambios en la composición de la vegetación, barreras naturales y variaciones del terreno. El borde del incendio adquirirá un contorno irregular con la aparición de dedos o lenguas de frente y entrantes o bolsas en los que la progresión del fuego será menor.

2.1.6 Variables de comportamiento del incendio.

Se entiende por comportamiento la forma cómo actúa el fuego. Las variables que lo caracterizan son:

- a) Velocidad de propagación: es la velocidad de avance de la cabeza del incendio de mayor rapidez. Se entiende por velocidad de avance la distancia recorrida por el incendio en un tiempo determinado. Se puede considerar el siguiente rango objetivo:
 - ✓ Lenta: de 0 a 2 metros/minuto.
 - ✓ Media: de 2 a 10 metros/minuto.
 - ✓ Alta: de 10 a 40 metros/minuto.
 - ✓ Muy alta: de 40 a 70 metros/minuto.
 - ✓ Extremada: más de 70 metros/minuto.
- b) Calor por unidad de área: es el calor generado por unidad de superficie durante el tiempo que esta área está dentro del frente de llamas.
- c) Intensidad lineal del fuego: es la cantidad de calor generado por el fuego por unidad de tiempo y por unidad de longitud del frente de llamas. Se mide en kcal/m/seg.

d) Longitud de las llamas: es el largo medio de la cabeza del incendio que será la longitud de la llama si no existe viento ni pendiente.

2.2) La Comunidad Valenciana: características, riesgo y estadística de los incendios forestales.

2.2.1 Información territorial.

La región de estudio objeto de la presente tesis es la CV. A efectos de la investigación realizada, interesa poner de relieve algunos aspectos sobre las características existentes en dicha región, tales como orografía, climatología, vegetación, etc. La CV se encuentra situada en la parte Oriental de la Península, con cerca de 500km de costa bañada por el Mar Mediterráneo y una anchura media de 80km, o sea una franja de tierra estrecha y alargada, comprimida entre el mar y las altiplanicies del interior peninsular, que se caracteriza por poseer una gran diversidad de ambientes y paisajes, lo que constituye un medio natural rico y variado (*Plan de Prevención y Extinción de Incendios Forestales en la Comunidad Valenciana*, <http://www.gva.es>).

Son cuatro los aspectos del territorio forestal que afectan de una manera más directa a la prevención y extinción de incendios forestales:

- ✓ Topografía compleja.
- ✓ Meteorología muy adversa, tanto en sus valores medios como extremos.
- ✓ Existencia de formaciones vegetales con una composición y estructura favorecedora de la progresión y propagación del fuego.
- ✓ Uso cultural del fuego fuertemente arraigado tanto en la sociedad rural como en la urbana.

2.2.1.a Orografía.

En la CV, el relieve viene marcado por la existencia de dos sistemas montañosos, el Ibérico y el Pre-Bético (Figura 5). Así pues, en el Norte de la Comunidad, coincidiendo con la comarca del Maestrat, encontramos el Sistema Ibérico de influencia costero-catalana, que se extiende paralelamente a la costa, en dirección Norte a Sur y escalonadamente hacia el mar. Destacan el Monte Turmell con 1.281m y el Peñagolosa con 1813m Siguiendo más al Sur, encontramos las últimas estribaciones del sistema Ibérico, que desde la provincia de Teruel, (Sierra de Javalambre), se extiende hasta aproximadamente la cuenca del río Júcar, en dirección Noroeste a Sureste, destacando las sierras de Espadán y el sistema Javalambre-Calderona, ambos caracterizados por sus elevadas pendientes, sobrepasando muchas veces el 45% y destacando las cumbres de Vértice Salada (1585m) o el Pico del Remedio (1053m). El Sistema Pre-Bético recorre casi toda la provincia de Alicante y Sur de la de Valencia, en dirección Suroeste a Nordeste. El Norte de la provincia de Alicante se caracteriza por su abrupto relieve montañoso, con altitudes normalmente superiores a los 500m, que se precipitan hasta el mar en rocosos acantilados (Montgó o Peñón de Ifach). Cabe mencionar las sierras de Mariola, Menejador, Sierra del Almirant, Aitana, etc., entre las que se intercalan algunos valles de relativa extensión. Como cumbres más emblemáticas se mencionarán Aitana (1568m), Montcabrer (1390m) y el Puig Campana (1410m).

Por su parte, la provincia de Valencia, se encuentra marcada por la confluencia de los dos sistemas citados anteriormente, que aunque más variada y menos abrupta, no por ello definen condiciones orográficas sensiblemente mejores. En el interior de esta provincia destaca el altiplano de Requena-Utiel, con una altitud media entre los 600m-900m, prolongación de la Meseta Castellana en territorio de la Comunidad rodeado por las Sierras Martes (por el Sur), Cabrillas (Este) y Negrete (Norte). Más al Sur se encuentra el Valle de Ayora, definido por la confluencia del Sistema Ibérico y Pre-bético, situado en alturas iguales o superiores, en su mayor parte, a los 1000m y en

general, áspera, abrupta y de difícil comunicabilidad con la costa y la Canal de Navarrés-Enguera, como área de transición entre el interior valenciano y la costa, que aunque de superficie irregular, muestra una superficie relativamente llana, y entre ambas depresiones se encuentra el Macizo del Caroig con el pico del mismo nombre (1216m).

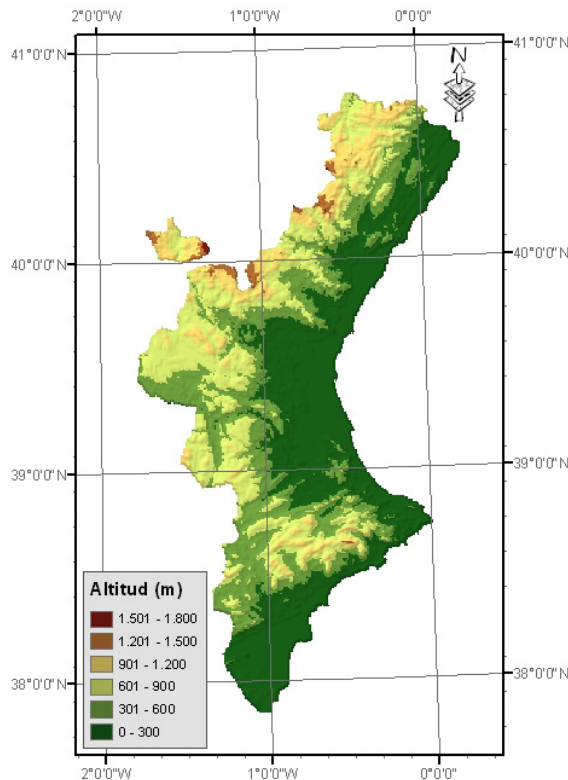


Figura 5 Orografía de la CV.

La existencia de los sistemas montañosos descritos configura a la CV, especialmente a las provincias de Alicante y Castellón, como una de las más montañosas del conjunto del estado Español. Conviene resaltar que según datos de la *Conselleria de Medio Ambiente*, en 1995 el terreno forestal ocupaba 1219108 ha lo que supone el 52% de la superficie geográfica de la Comunidad, proporción que es notablemente superior a la correspondiente al conjunto nacional que tan solo alcanzaba un promedio del 30,9%. Dicha

característica se traduce, a efectos de la planificación de la intervención, en la enorme dificultad de acceso al incendio que tienen los medios de extinción.

Resaltar igualmente la existencia de una larga y llana franja costera, de irregular amplitud, que configuran la Plana de Castellón, la huerta de Valencia, con la Albufera, y el Sur de la provincia de Alicante, donde se asienta la mayor parte de la población.

2.2.1.b Sustrato geológico.

En los montes de la CV predominan los sustratos calcáreos. Las rocas calizas duras, incluyendo las dolomías y calizas dolomíticas, dan lugar a abundantes afloramientos de rocas, suelos superficiales y muy pedregosos. Son ejemplos característicos del paisaje calizo los extensos altiplanos y las muelas, como el Macizo Caroig-Muela de Cortes, Sierra de Murta-Mondúver, Mariola, Aitana, el Montgó, gran parte del Maestrazgo y muchos otros relieves diseminados por toda la CV.

Otro sustrato rico en cal es la marga, de consistencia blanda pero muy compacta e impermeable. Este tipo de rocas con frecuencia alternan con las calizas, y en las laderas producen sedimentos mixtos donde la mayor parte de la tierra fina proviene de la marga y las piedras proceden de la caliza. Los suelos sobre estas formaciones suelen ser moderadamente profundos y pedregosos. Estos materiales se encuentran en las laderas de gran parte de los macizos calizos.

La arenisca o rodano es otro sustrato importante por su especificidad, aunque ocupa extensiones limitadas en la CV. Suelen ser rocas no calizas que producen suelos ligeramente ácidos, arenosos y muy superficiales, especialmente sensibles a la erosión. Los ejemplos más importantes se sitúan en las sierras de Espadán y Calderona.

Por último, cabe destacar el caso de los yesos. Estas rocas, abundantes al Sur de Alicante, dan lugar a suelos de baja fertilidad que difícilmente soportan una vegetación continua o arbolada.

Además de las características de los suelos forestales atribuibles a los factores físicos, tiene una gran importancia el factor humano. En primer lugar, los suelos destinados a vegetación forestal han sido seleccionados a tal fin en la medida en que no eran aptos para la agricultura. Por lo tanto suelen presentar atributos negativos, como por ejemplo, una excesiva pendiente, pedregosidad o una profundidad escasa. En segundo lugar, los suelos de los montes actuales han sufrido en gran medida transformaciones y en muchos casos degradación, por una explotación secular, desde el laboreo intermitente a la construcción de terrazas de cultivo, en muchos casos hoy abandonadas y recolonizadas por la vegetación forestal, hasta el deterioro asociado a una explotación excesiva de la vegetación por sobrepastoreo o extracción de arbustos y árboles de raíz para carboneos o leñas. Todos estos factores relativos al suelo son importantes en la evaluación de la afección de un incendio y, por supuesto, en la posterior regeneración de las zonas incendiadas.

2.2.1.c Climatología.

Desde el punto de vista de la vegetación, la climatología Valenciana, es extremadamente variada y así, por ejemplo, nos encontramos con formaciones subdesérticas en el Sur de la provincia de Alicante en contraposición a grupos de hayas, al Norte de Castellón, en el límite con la provincia de Tarragona. Esta variabilidad en la vegetación, la encontramos igualmente en las lluvias y así, por ejemplo, en un mismo año se recogen precipitaciones superiores a 1400 litros en Pego, cuando en otras zonas rondan los 300 litros.

En líneas generales hay un aumento de precipitaciones de Sur a Norte, sin que ello suponga restar importancia, en cuanto al régimen de lluvias, a la orografía que influye notablemente. En las temperaturas tenemos un patrón inverso e igualmente una progresiva continentalidad en función de la

proximidad o lejanía del mar, además de una disminución de las temperaturas con la altitud.

La Comunidad se encuentra en el sector meridional de las latitudes templadas, en una zona de alternancia entre las penetraciones ligadas al frente polar (determinantes del clima en Europa central) y en influjo del sector septentrional de las altas presiones subtropicales, determinantes del clima norteafricano. Esta situación límite es la que marca importantes matices entre el Norte y el Sur de la Comunidad.

Otro factor a considerar es la influencia del Mar Mediterráneo sobre la climatología del territorio, actuando por un lado como atenuante de las oscilaciones térmicas y por otro como fuente de humedad. Igualmente, presenta una influencia básica, más o menos directa, en las temperaturas, las lluvias, el relieve (pudiéndose producir microclimas especiales) siendo el contraste climático entre las planas litorales y el interior mucho mayor que el que se produce entre el Norte y Sur.

Otra característica importante dentro de la climatología de la CV, y en relación con los incendios forestales, es que, al estar situada a espaldas de la Península Ibérica respecto a situaciones atmosféricas de componente Oeste, y con un claro desnivel altitudinal respecto al interior peninsular, determinan que los vientos terrales secos de componente Oeste, al descender al litoral, sufran una modificación de sus parámetros meteorológicos, produciéndose un calentamiento adiabático de 1° C cada 100m, lo cual, unido al efecto Foëhn que produce temperaturas mas cálidas a sotavento y una menor humedad relativa, a consecuencia del relieve, origina los temibles y peligrosos vientos de poniente.

En resumen los caracteres más destacados que definen el clima son:

- ✓ Tipo de clima mediterráneo.
- ✓ Predominio de tiempo seco y soleado.
- ✓ Lluvias con carácter torrencial, especialmente en otoño.

- ✓ Precipitaciones irregulares.
- ✓ Temperaturas con valores anuales altos.
- ✓ Vientos terrales con componente Oeste secos.
- ✓ Fenómenos tormentosos con gran aparato eléctrico y carácter seco.

2.2.1.d Vegetación.

La CV posee una destacada significación forestal, correspondiéndole el 5% del total de la superficie forestal del estado Español. Así, según fuentes de la *Conselleria de Medio Ambiente*, en 1985 la superficie forestal representaba el 40,2% del total del territorio. En 1995, según nuevos datos del *II Inventario Forestal de la Comunidad*, la superficie forestal se incrementó, siendo del 52%, frente al 44% de la superficie destinada a cultivo y el 4% de la superficie improductiva.

La distribución del terreno forestal entre arbolada y desarbolada, presenta como nota característica una menor significación del área arbolada, que durante los últimos años parece haber experimentado una cierta disminución, según fuentes de la *Conselleria de Medio Ambiente*, en beneficio del matorral, como consecuencia del impacto de los incendios forestales, que ha superado ampliamente el proceso de repoblación y regeneración forestal natural.

Así, del total de la superficie forestal de la CV, (52% del territorio), el 17% es superficie forestal arbolada, el 26% es forestal desarbolada, el 5% es forestal arbolado ralo y el 4% forestal en período de regeneración tras ser afectada por los incendios del periodo de 1990 a 1994.

En las áreas arboladas destaca la manifiesta superioridad de las especies coníferas, que ocupan el 78% de la superficie arbolada frente al 22% de las frondosas, contrastando dicha situación con la existente en el conjunto nacional, en el que se da una mayor igualdad entre coníferas y frondosas e

incluso una ligera superioridad de estas últimas. No obstante, en Castellón, las frondosas suponen el 42% del total del arbolado, frente al 58% de las coníferas. Dentro de las coníferas destaca la superioridad del pino carrasco, el 48% del total de la vegetación, seguido del pino laricio, el 7%, del pino negral o rodeno, 3%, y del silvestre, el 1%. En cuanto a las frondosas, la especie más abundante es la encina (40%), presentando proporciones mucho más bajas el alcornoque y quejigo (1%).

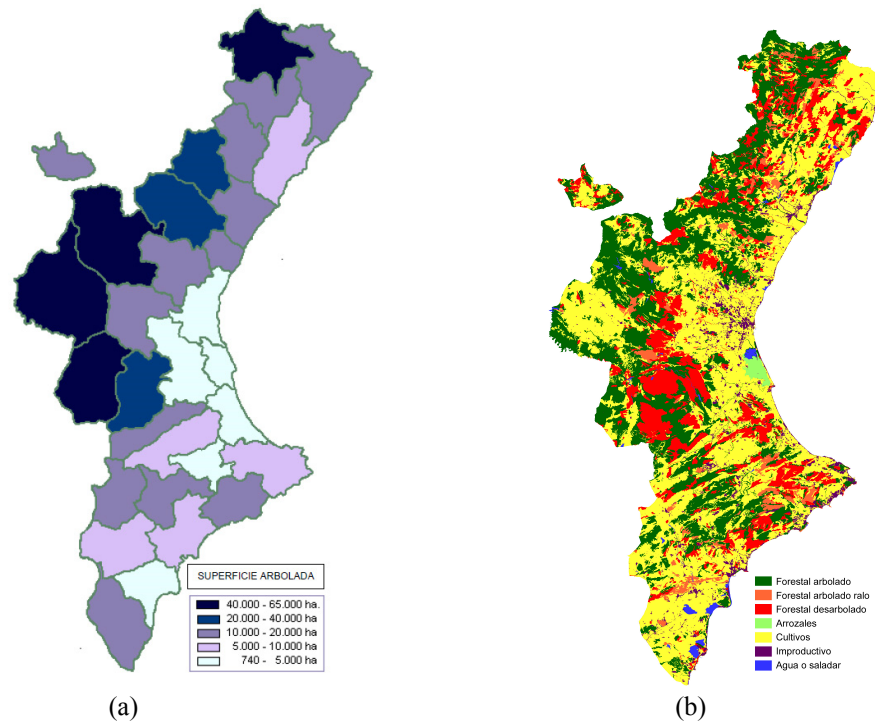


Figura 6 (a) Superficie forestal arbolada (Fuente: Plan Especial frente al Riesgo de incendios forestales) y (b) Usos del suelo en la Comunidad Valenciana (Fuente: II Inventario Forestal de la Comunidad Valenciana: Generalitat Valenciana, 1995).

Las comarcas interiores de la provincia de Valencia son las menos pobladas, y con una menor incidencia humana. Los Serranos, la Plana de Requena-Utiel y el Valle de Ayora, junto con la comarca de Els Ports, el Alto Palancia y el Alto Mijares en Castellón son las que aportan mayor superficie

forestal arbolada. En Alicante son las comarcas del Norte, l'Alcoia y la Marina Baixa, las de mayor superficie forestal.

En la Figura 6 se puede observar un mapa de la CV en el que se refleja los rangos de superficie forestal arbolada (a) y un mapa de usos del suelo (b).

En resumen, los sistemas forestales de la CV están formados en su mayor parte por:

- ✓ Monte joven, con origen en repoblaciones, regeneración y abandono de tierras agrícolas. Modelos de combustible de alto peligro.
- ✓ Monte adulto, el principal factor es el hecho de que las especies arbóreas propias de la CV no llegan a desarrollar formaciones que supongan una competencia al matorral.

2.2.2 Análisis del riesgo y la vulnerabilidad en la CV.

Para llevar a cabo el análisis del riesgo en la CV se han estudiado las circunstancias o factores que facilitan la ignición y contribuyen a la propagación del fuego. El punto de calor que posibilita la ignición del combustible forestal, en presencia de aire, es aportado de manera natural por el rayo, y de manera artificial por el hombre (negligencias e intencionalidad). El estudio de la frecuencia y causalidad de la serie histórica de incendios forestales aporta información para el cálculo del riesgo estadístico de incendios.

La capacidad de los combustibles para mantener y extender el fuego define su combustibilidad, que se ha analizado a partir de (Mediavilla, et al., 1994):

- ✓ Los Modelos de Combustible del *Forest Service* (EUA) adaptados a las condiciones españolas de manera general por el *Ministerio de Medio Ambiente*.

- ✓ La pendiente como indicadora del relieve que ha sido introducida en el sistema mediante modelos digitales del terreno.
- ✓ Las condiciones meteorológicas, y sus indicadores viento-temperatura-humedad, se han estudiado en sus valores extremos para cada una de las zonas homogéneas definidas por el *Centro Meteorológico Territorial de Valencia*.

La conjunción de estos factores define la *Peligrosidad* de un terreno forestal, mediante la simulación automática en distintas condiciones. Las condiciones estudiadas son:

- ✓ longitud de llama para cada modelo de combustible.
- ✓ velocidad de propagación del fuego en función de la pendiente.
- ✓ velocidad de propagación en función de la meteorología.

Por último la intersección mediante Sistemas de Información Geográfica de los parámetros estadísticos y la *Peligrosidad* determinan el *Riesgo potencial* de Incendio Forestal para el territorio forestal de la CV.

En el esquema que se adjunta en la Figura 7, se especifican los parámetros sobre los que incide el *Riesgo Potencial*.

El sistema así definido permite la obtención de mapas automáticos de riesgo para cualquier porción del territorio de la CV, los cuales deben ser siempre entendidos dentro de un contexto, de tal manera que aquellos territorios con un menor riesgo, son de un alto riesgo si se analizan en comparación con buena parte del resto de España o en referencia a la Unión Europea.

2.2.2.a Zonificación del territorio.

De un análisis detallado de los mapas del riesgo y vegetación, se puede desprender que los terrenos con el máximo riesgo potencial se encuentran muy repartidos y difuminados por toda la Comunidad, a excepción del Sur de la provincia de Alicante y todo el centro costero de la provincia de Valencia.

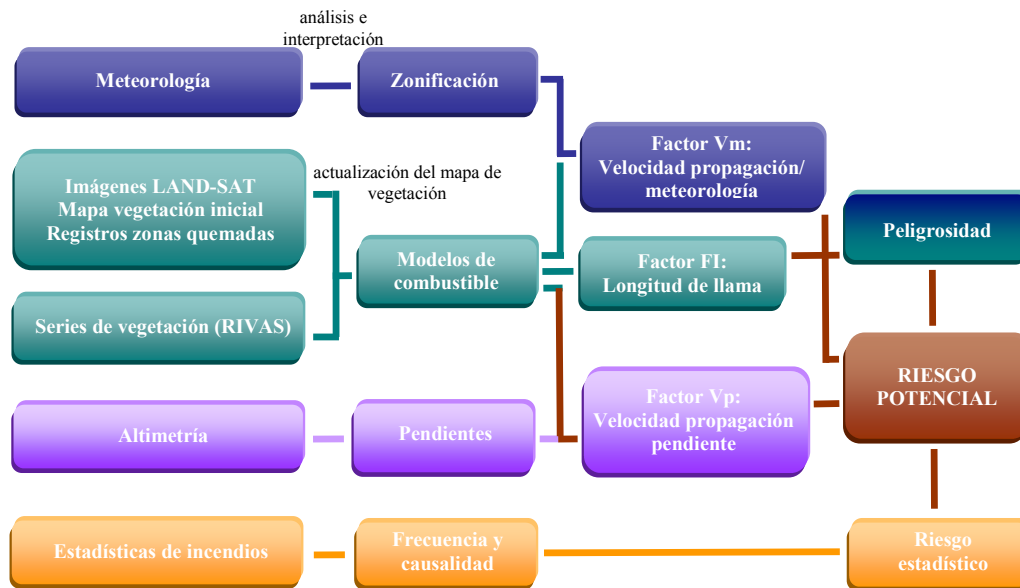


Figura 7 Esquema del Riesgo Potencial de incendios forestales en la Comunidad Valenciana. Fuente: Plan Especial frente al Riesgo de Incendios Forestales de la Generalitat Valenciana.

Dado que en casi todo el territorio de la CV, en mayor o menor medida, el peligro de un incendio forestal y que los recursos para la extinción de incendios dependen de varias administraciones, se concluye que la mejor manera de zonificar el territorio, es seguir el criterio administrativo de la provincia, en tanto que aúna los intereses de las diferentes administraciones involucradas y permite una organización adecuada de los recursos disponibles. En consecuencia, el despliegue de los medios y recursos, se ha hecho con un criterio provincial en las zonas o comarcas con un mayor riesgo potencial de incendios, no justificándose la creación de zonas o ámbitos inferiores a la provincia con prioridades de defensa.

En cuanto a la zonificación de los recursos que colaboran y actúan en la vigilancia y detección de los incendios forestales, queda contemplada en el *Plan de Vigilancia Preventiva* que anualmente elabora la Consellería competente en materia de medio ambiente, en el cual se concretan los recursos asignados a cada paraje en función de su especial vulnerabilidad o de la vegetación existente.

2.2.2.b Índice de peligrosidad de incendios forestales.

El Centro Territorial de Valencia de la Agencia Estatal de Meteorología ha desarrollado un *Índice de Peligrosidad* de incendios forestales (combinación del *Índice de Ignición* y de *Propagación*) adaptado a las especiales condiciones de la CV. Este índice es determinado diariamente y difundido en un boletín (Figura 8) antes de las 10:00 h con una previsión hasta las 24:00 h y para el día siguiente.

Se indica en tres niveles de preemergencia para cada una de las 7 zonas homogéneas en las que dividen el territorio durante la época de mayor riesgo (zonas *PREVIFOC*). En los restantes meses del año, la predicción se efectúa globalmente para cada una de las tres provincias. Este índice se calcula exclusivamente a través de datos meteorológicos representativos de las distintas zonas, junto con la participación de un meteorólogo para la predicción en el día de las variables medioambientales, y presenta una variación de 0 a 100, con el que es posible definir tres niveles de alerta según los umbrales siguientes:

$IP < 40$ Nivel de Alerta 1

$40 \leq IP < 60$ Nivel de Alerta 2

$IP \geq 60$ Nivel de Alerta 3

con *IP*: *Índice de Peligrosidad* de los incendios.

Adicionalmente se genera otro índice complementario denominado *Índice de Ignición* de los incendios que toma también valores entre 0 y 100, pero que se alerta en el boletín diario en caso de tomar los siguientes valores:

60 < *I* < 80 Índice Alto de Ignición
I ≥ 80 Índice Muy Alto de Ignición
 con *I*: Índice de Ignición de los incendios.

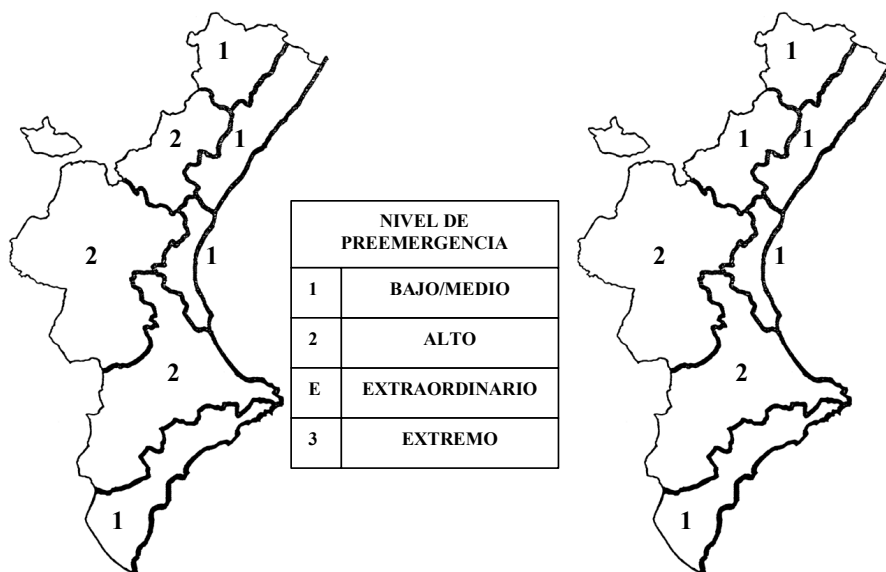


CONSELLERIA DE JUSTICIA I ADMINISTRACIONS PÚBLIQUES
 DIRECCIÓ GENERAL D'INTERIOR
 CENTRE DE COORDINACIÓ D'EMERGÈNCIES
 Tlf. 96 275 90 60 (24 hores)
 112 (Emergències)
 Fax 96 275 90 12

NOTIFICACIÓN DEL NIVEL DE PREEMERGENCIA ANTE EL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES

PARA HOY DÍA: 28/06/04

PREVISIÓN PARA MAÑANA(*)



<p>COMENTARIOS SIGNIFICATIVOS: Vientos flojos del Este con brisas. Temperaturas sin cambios. Índices de ignición altos en todas las zonas. Posibilidad de tormentas secas en las zonas 1,3 y 5.</p>	<p>COMENTARIOS SIGNIFICATIVOS: Tormentas en el interior de la provincia de Castellón. Sin cambios en el resto.</p>
--	---

(*) Esta previsión es susceptible de sufrir modificaciones, debiendo ser confirmada con la previsión diaria.

Figura 8 Ejemplo de boletín para la diseminación de los niveles de alerta ante el riesgo de incendios forestales proporcionado por el Centro de Coordinación de Emergencias 112 de la CV.

La descripción completa del índice empleado por el Gobierno Valenciano puede encontrarse en la *“Nota Técnica nº2 del GPV de Valencia – Índice Meteorológico de Peligrosidad de los Incendios Forestales” (ALC-94)*. El índice estima las condiciones de peligro durante todo el día en que está vigente, determinando el valor extremo para ese día. Es función de las distintas zonas geográficas en las que se ha dividido la CV según sus características de homogeneidad, aunque estas pueden subdividirse si es aconsejable. El cálculo del índice se realiza con los datos extremos previstos para el día, concretamente con la humedad mínima, la temperatura máxima y la racha máxima de viento, variables que se correlacionan bien con la potencial peligrosidad de los incendios. En la estimación del índice se tiene en cuenta la circulación del viento para ese día (terral o no terreal) que influye fuertemente en el cálculo, así como la precipitación registrada en los días anteriores hasta el momento de la predicción lo que proporciona junto con una estimación de la evapotranspiración la reserva de agua en el suelo.

Las actuaciones que se contemplan por parte del Gobierno Valenciano en cada uno de los niveles de preemergencia se recogen en el *Plan de Vigilancia Preventiva contra los Incendios Forestales* elaborado por la *Consellería de Medio Ambiente*. En las zonas en las que se declara un Nivel 1 de Preemergencia, las labores de detección corren a cargo de la red de vigilancia fija de la *Consellería de Medio Ambiente*, que de forma específica ya es parte de su cometido. Serán complementadas con la vigilancia móvil de Agentes Forestales y Unidades de Vigilancia Forestal. En el caso de declararse un Nivel 2 de Preemergencia, además de las actuaciones del nivel anterior, se movilizará a las Brigadas Forestales de la *Consellería de Presidencia*. Cuando se considere oportuno, podrán mobilizarse así mismo medios aéreos tanto de la *Consellería de Presidencia* como de la *Dirección General de Conservación de la Naturaleza*. En el Nivel 3 de Preemergencia, además de los recursos movilizados en los niveles 1 y 2, se moviliza y/o alerta para que presten especial atención a la vigilancia dentro de sus misiones cotidianas a la Guardia Civil, la Policía Autonómica, las Brigadas Forestales de la Diputación de

Valencia y los Ayuntamientos de las zonas afectadas para que estos últimos realicen labores de vigilancia en las zonas más sensibles de su término municipal dentro de las posibilidades de sus recursos propios.

Las fórmulas para el cálculo del *Índice de Peligrosidad, IP*, pueden resumirse de forma general en una serie de correlaciones demostradas entre la extensión de superficie arrasada durante un día en el caso hipotético de que ocurriera un incendio forestal en la zona y determinadas variables atmosféricas que representan extremos de las condiciones ambientales. Se diferencian dos situaciones de las condiciones atmosféricas que llevan a correlaciones distintas: si los vientos dominantes son terrales o si no lo son. Se define la situación "Terral" cuando la dirección predominante del viento durante las 24 horas procede de la franja Noroeste-Oeste-Suroeste. Se define situación "No Terral" cuando el viento predominante procede de cualquier otra dirección. Adicionalmente se calcula el *Índice de Ignición, II*, por medio de otra correlación pero que en este caso es independiente de las características del viento. Las correlaciones pueden escribirse como:

$$IP = (3+0,15V_{max}+0,1T_{max}-0,1H_{min}+W)/0,15 \quad \text{para situaciones Terrales}$$

$$IP = (3,9+0,07V_{max}+0,1T_{max}-0,1H_{min}+W)/0,15 \quad \text{para No Terrales}$$

$$II = (5,5+0,12(T_{max}-30)-0,06H_{min}) \times 18$$

donde:

V_{max} es la racha máxima del viento en km/h durante las 24 horas de vigencia del índice.

T_{max} es la temperatura máxima en °C para ese mismo periodo.

H_{min} es la humedad relativa mínima en % en las 24 horas.

W es una variable que depende del día y del mes y que se halla tabulada.

Los índices así calculados, precisan todavía de ciertas correcciones adicionales. Deben sumarse aún unos coeficientes en el caso de situaciones terrales atendiendo a las zonas en las que se ha dividido la CV. Finalmente, si la reserva de agua en el suelo como consecuencia de precipitaciones pasadas

no es cero, es decir el suelo se encuentra húmedo, los índices deben ser drásticamente corregidos multiplicando por el valor de 0,67. Todas estas correcciones se hallan perfectamente documentadas en los manuales para el cálculo del *Índice de Peligrosidad* del Gobierno Valenciano.

2.2.2.c Épocas de peligro.

Las condiciones del medio forestal determinan que en la CV a lo largo de todo el año se den las circunstancias que determinan un alto riesgo de incendios forestales. No obstante, dentro del Reglamento de la Ley (3/1.993) Forestal de la CV, se establecen los períodos en los que varían las condiciones y los requisitos para el uso del fuego (artículos 145 y 146 y Orden de 2 de marzo de 2.005, de la *Conselleria de Territorio y Vivienda*).

2.2.3 Evaluación de la frecuencia de incendios.

En la CV el número de incendios ha aumentado de manera exponencial en las últimas décadas (*Pausas 2004a, 2004b; Moreno et al. 1998; Piñol et al. 1998; Pausas y Vallejo 1999*), mostrando también un incremento en la superficie quemada especialmente a partir de los años 70.

Sin embargo, la superficie afectada por incendios varía notablemente entre años y se observa una cierta tendencia a la disminución en los últimos años. La gran variabilidad interanual de la superficie quemada se relaciona principalmente con las características climáticas del año, observándose que en las últimas décadas, cada año hay más incendios, pero sólo en los años secos los incendios afectan a grandes superficies (*Pausas 2004b*).

Existen tres factores principales que explican la variación de la frecuencia y extensión de los incendios en las últimas décadas: el cambio de usos del suelo, el cambio climático y el aumento de la población, siendo el primero probablemente el más importante. El paisaje de la cuenca mediterránea es el

resultado de muchos siglos de presión humana basados en la tala, quema y pastoreo de las zonas marginales, y en la tala, abanclado, cultivo y después, eventualmente, el abandono de zonas agrícolas.

A partir de la base de datos procedente de la *Conselleria de Medi Ambient, Aigua, Urbanisme i Habitatge de la Generalitat* se realizó un filtrado previo para seleccionar los incendios forestales mayores de 1 ha y se calcularon los promedios anuales (Figura 9), mensuales (Figura 10) y diarios (Figura 11) del número de incendios y de las hectáreas arrasadas. En la Figura 9 se puede observar la estadística anual de los incendios forestales ocurridos entre 1980 y 2007 en la CV. Durante este periodo se produjeron 9416 incendios que calcinaron unas 472826 ha. El máximo absoluto de superficie afectada se puede observar en 1994, con 137521 ha quemadas, mientras que en relación al número de incendios se presenta en 1981 con 1142 incendios. No se distingue una tendencia marcada en la ocurrencia de incendios durante los últimos años, si acaso se podría apreciar una ligera disminución de éstos, a excepción del año 2005, que podría ser explicada por la mejora en la prevención y extinción de incendios o con la disminución de zonas susceptibles de quema en los últimos años. En general la superficie afectada presenta diferencias notables a lo largo de los años mostrándose cierta variabilidad en el número de hectáreas, que va aumentando en los últimos años. A causa de ello, en el último periodo se observa una clara tendencia al ascenso en el promedio del área afectada por incendio.

En la CV aunque en cualquier época del año pueden acontecer incendios forestales, la distribución de éstos a lo largo del año presenta una marcada estacionalidad registrándose el mayor número de incendios y hectáreas quemadas en los meses de verano, esencialmente en Julio y Agosto (*Millán et al, 1998*). Esta estacionalidad en la ocurrencia y afección de incendios se debe a la combinación de diversos factores que favorecen las condiciones para el inicio y la propagación de los incendios. Esta época además de ser la más seca del año, es la temporada alta por excelencia en el

turismo, incluyendo las acampadas y las excursiones, así como la temporada en la que se preparan las tierras, limpiando y quemando los desechos después de la cosecha de cualquier cultivo. En la Figura 10, se puede observar que el mayor número de incendios entre 1980 y 2007 se registra en el mes de Agosto con 2394, que se corresponde con una ocurrencia media anual de unos 86 incendios en dicho mes. En cambio el número de hectáreas máximo se da en Julio con 214000 hectáreas arrasadas durante el periodo de estudio que equivalen a unas 7643 ha por año. No obstante coincide el mes con menor ocurrencia de incendios y hectáreas quemadas siendo éste Noviembre con 274 incendios y 2412 hectáreas quemadas durante todo el período que, realizando el promedio anual, corresponderían unos 10 incendios y 86 ha de media. En cuanto al promedio de área quemada por incendio el máximo valor se da en Julio con unas 127 ha por año y el mínimo en Noviembre con unas 8 ha.

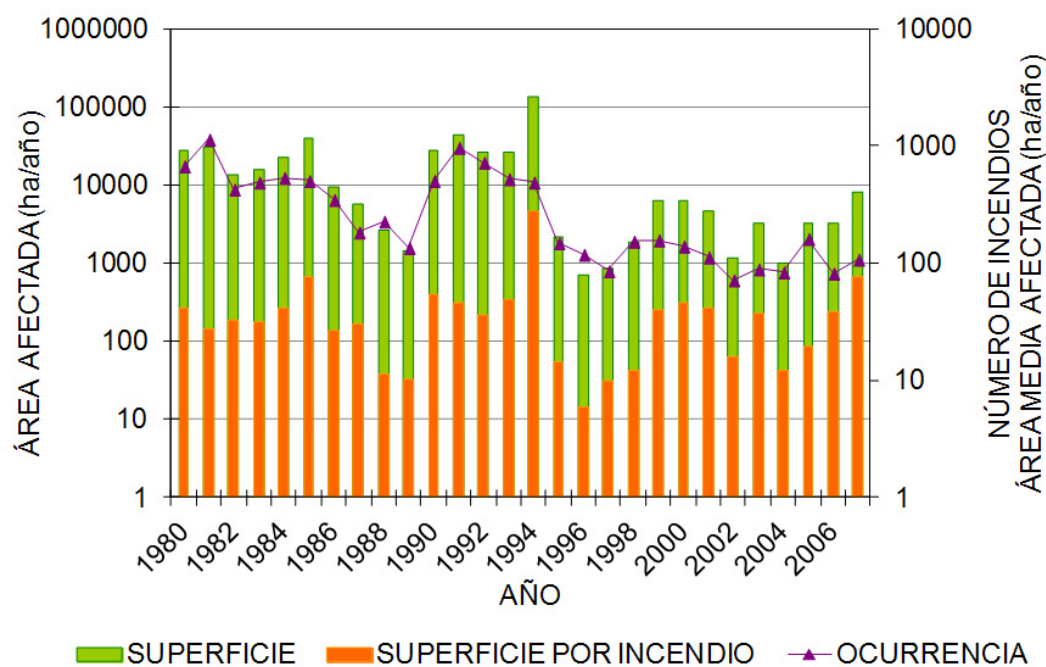


Figura 9 Variabilidad interanual del área afectada (eje principal), número de incendios forestales y promedio de área afectada por incendio (eje secundario) en la CV (escala logarítmica) desde 1980 hasta 2007.

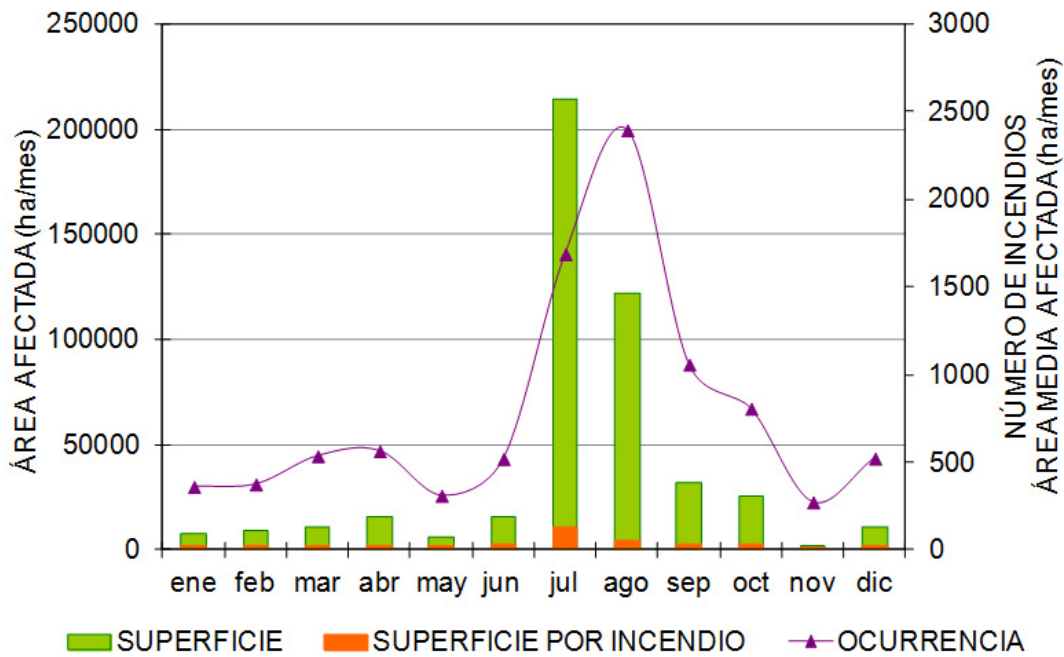


Figura 10 Variabilidad mensual del área afectada (eje principal), número de incendios forestales y promedio de área afectada por incendio (eje secundario) en la CV de 1980 a 2007.

A continuación se representa la ocurrencia media diaria de incendios forestales así como el promedio diario de hectáreas calcinadas en la CV entre los años 1980 y 2007 (Figura 11). De la Figura 11a se puede extraer que la mayor ocurrencia de incendios en la Comunidad acontece en los días de verano, con el máximo absoluto en valor promedio situado en 1.6 incendios el día 211, que se corresponde con el día 29 o 30 de Julio según el año sea bisiesto o no. Además también se puede observar un máximo relativo a inicios de primavera. En relación al promedio diario de hectáreas quemadas (Figura 11b) también se observan los mayores valores en días de verano, aunque hay otras fechas fuera de este período en las que el promedio es significativo (día 92 y 352). La diferencia entre el máximo absoluto, observado el día 183 (2 o 3 de Julio), y el resto de máximos relativos llama la atención y está principalmente causado por la desastrosa jornada de incendios ocurridos el 2 de Julio de 1994 en la que se arrasaron más de 29000 ha en la Comunidad.

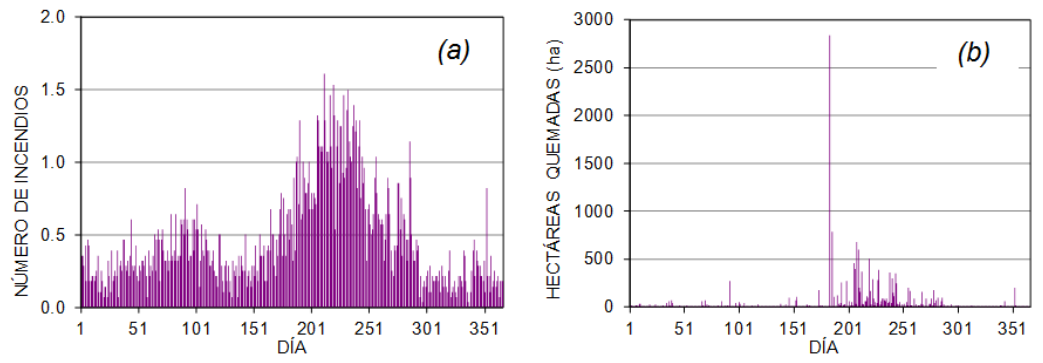


Figura 11 Promedio de (a) la ocurrencia diaria de incendios y (b) hectáreas quemadas en la CV en el período 1980-2007.

Capítulo 3:

**Climatología del HI y
análisis sinóptico**

3.1) Características del HI.

Las condiciones y comportamiento en superficie no son los únicos factores que influyen en el desarrollo de los incendios forestales. Es obvio que los vientos fuertes, temperaturas altas y humedades bajas poseen un gran impacto en el crecimiento de un incendio. Sin embargo, la inestabilidad atmosférica es también un factor a considerar. Si se mantienen los combustibles, la topografía y demás factores meteorológicos constantes, la inestabilidad es capaz de promover el crecimiento y la intensidad de los incendios forestales originando el desarrollo de una columna de humo, de naturaleza convectiva, y promoviendo fuertes corrientes o flujos en el interior de ésta que incrementarán el aporte de oxígeno y por tanto la intensidad del incendio (Figura 12). Además, debido a la convección, las pavesas pueden ser proyectadas fuera del perímetro del incendio creando focos secundarios (fenómeno conocido en EUA con el nombre de *spotting*) que también serán convectivos, con el consiguiente peligro que esto puede suponer (Werth y Ochoa 1993).

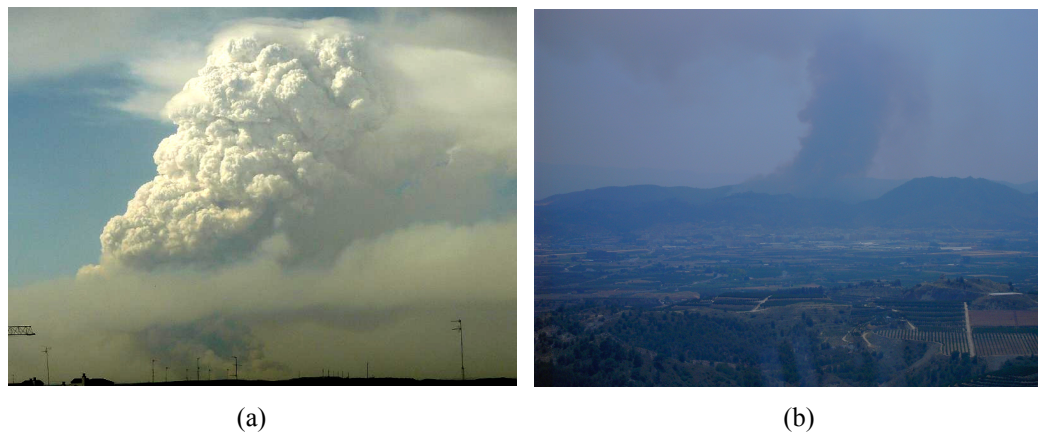


Figura 12 (a) Nube convectiva (pirocúmulo) desarrollada en el incendio de Zuera (Zaragoza) el 5 de Agosto de 2005. (b) Imagen de la columna tomada el 22 de Junio de 2005 en Xàtiva (Valencia). Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana)

El *HI* (Haines, 1988) muestra el impacto potencial de la humedad y estabilidad atmosférica en el comportamiento de un incendio forestal, para que éste pase a estar dominado por columna o no. El *HI* expresa la probabilidad de que en caso de declararse un incendio forestal dominado por columna, éste pueda tomar grandes proporciones y que su comportamiento pueda ser más o menos errático.

El cálculo del *HI* consta de la suma de dos términos: el término de temperatura o estabilidad atmosférica (*A*) y el término de humedad (*B*) (ecuación 1). Se asignan valores de 1 a 3 al término de temperatura dependiendo de la magnitud de la diferencia de ésta entre los niveles predefinidos para cada región según su elevación. Cuanto mayor valor tome el término *A* la inestabilidad en la baja troposfera será mayor, con lo que se incrementará la probabilidad de que los incendios forestales estén dominados por columna. Asimismo se establecen valores de 1 a 3 en el término de humedad, dependiendo de la sequedad de la capa atmosférica de nivel más bajo. Análogamente, los mayores valores del término *B* indican condiciones más secas que son favorables para la extensión de los incendios forestales. Con ello, el *HI* resultante varía entre 2 y 6. Si el índice toma el valor 2 indica que el aire es húmedo y estable mientras que un valor de 6 revela un aire seco e inestable. Por ello, el potencial de crecimiento de grandes incendios dominados por columna es muy bajo cuando el índice es 2, siendo alto cuando es 6, tomando valores iguales o superiores a 5 cuando las condiciones atmosféricas son críticas para favorecer este tipo de incendios forestales.

$$HI = A + B \quad [1]$$

donde $A = (Tp1 - Tp2)$ y $B = (Tp3 - Tdp3)$, siendo Tpi y $Tdpi$ la temperatura y la temperatura de rocío al nivel de presión pi .

Aunque originariamente el *HI* en bajas altitudes se desarrolló para el nivel de presión $p_1 = 950 \text{ hPa}$, debido a que este nivel atmosférico no es habitual en las bases de datos de perfiles atmosféricos, siguiendo las indicaciones de (Potter et al, 2008) se suele considerar $p_1 = 925 \text{ hPa}$ y como umbrales para este nivel los valores mostrados entre paréntesis en la Tabla 6 (Choi et al, 2006). Además, dependiendo de la altitud o elevación del terreno, se consideran unos niveles atmosféricos u otros (ver Tabla 6).

Tabla 6 Variables y escalas para el cálculo del HI de acuerdo con la elevación del terreno Haines, 1988; Choi et al., 2006; Potter et al., 2008).

Elevaciones	Nivel de presión	Inestabilidad (Tp1 - Tp2)	A	Humedad (Tp3 - Tdp3)	B	HI = A + B
< 305m (bajas)	p1 = 950 hPa	< 4°C (2,7°C)	1	< 6°C	1	Potencial de grandes incendios
	(925 hPa)	≥ 4°C (2,7°C)	2	≥ 6°C	2	
	p2 = 850 hPa	< 8°C (6,7°C)	3	< 10°C	3	
305m – 914m (medias)	p3 = 850 hPa	≥ 8°C (6,7°C)	3	≥ 10°C	3	2-3: muy bajo 4: bajo 5: moderado 6: alto
	p1 = 850 hPa	< 6°C	1	< 6°C	1	
	p2 = 700 hPa	≥ 6°C	2	≥ 6 °C	2	
> 914m (altas)	p3 = 850 hPa	< 11 °C	3	< 13°C	3	5: moderado 6: alto
	p1 = 700 hPa	≥ 11°C	3	≥ 13°C	3	
	p2 = 500 hPa	< 18°C	1	< 15°C	1	
> 914m (altas)	p3 = 700 hPa	≥ 18 °C	2	≥ 15°C	2	5: moderado 6: alto
	p2 = 500 hPa	< 22°C	3	< 21°C	3	
	p3 = 700 hPa	≥ 22°C	3	≥ 21°C	3	

Desde que se formuló el *HI* se han llevado a cabo diversos estudios para evaluar las características del índice, tales como su variabilidad espacial y temporal y su influencia en el desarrollo de grandes incendios forestales. Werth y Ochoa (1993) examinaron dos incendios forestales en Idaho, concluyendo que el *HI* es un buen indicador de potencial del riesgo de incendios forestales en los que la pluma convectiva es más importante que los vientos horizontales. A continuación, Werth y Werth (1998) extendieron la climatología original de Haines al Oeste de EUA, encontrando una correlación positiva entre la elevación de la estación y la frecuencia de índices extremos, mientras que Jones y Maxwell (1998) realizaron una climatología estacional en nuevo Méjico y Reges y Alden (1998) estudiaron el uso del *HI* en Alaska. El primer esfuerzo

en elaborar un estudio climatológico en todo EUA lo realizaron *Croft et al. (2002a)* a partir de 30 años de datos de radiosondeo, que posteriormente analizaron mediante análisis estadísticos (*Croft et al., 2002b*). Hasta hace pocos años no existía una climatología completa tanto espacial como temporalmente, ya que los estudios estaban limitados a periodos cortos de tiempo, a datos de radiosondeo o a pequeñas áreas. Debido a esto las personas encargadas de gestionar los incendios no tenían una base fiable con la que comparar los valores observados. Esto motivó a *Wrinkler et al. (2007)* a realizar un estudio climatológico del *HI* para la mayor parte del Norte de América, basándose en 40 años de datos de reanálisis que están disponibles en <http://info.airfire.org/haines/usingatlas.html>. Posteriormente se han analizado las variaciones interanuales del *HI* (*Trouet et al., 2009*) obteniéndose buenas correlaciones entre los años con índices elevados y el desarrollo de grandes incendios forestales.

Igualmente se han realizado estudios relacionados con el *HI* en otros países. *Weber y Dold (2006)* analizaron algunos incendios acaecidos en Canberra el año 2003, concluyendo que en algunas zonas de Australia sería conveniente combinar el índice de riesgo de incendios nacional (*McArthur Grassland Fire, GFDI*) con el *HI*, sobre todo cuando este último toma valores extremos. Igualmente en 2003 se produjeron severos incendios forestales en Croacia, con lo que surgió la necesidad de introducir nuevos productos meteorológicos. Seleccionaron el *HI* (*Mokoric y Kalin, 2006*) y después de comprobar que los resultados eran satisfactorios, se propuso utilizarlo en combinación con el índice de riesgo habitual (el canadiense, *FWI*) y la velocidad del viento. En Corea también se han estudiado los patrones espaciales y temporales del *HI* relacionándose con la ocurrencia de incendios. Los resultados evidenciaron de nuevo la necesidad de considerar las características verticales de la atmósfera en el sistema de predicción existente (*Choi et al., 2006*). De nuevo en Australia surgieron nuevas investigaciones, y *Long (2006)* realizó un estudio climatológico de los días en los que el comportamiento del fuego es extremo (*Extreme Fire Weather Days, EFWD*) y

lo correlacionó, obteniendo buenos resultados, con los días en los que el *HI* es alto. Posteriormente, *McCaw. et al. (2007)* correlacionaron el *HI* y el *GFDI* concluyendo que los valores extremos del *GFDI* están fuertemente asociados con valores altos de *HI*.

En los últimos años, gracias al creciente desarrollo de los modelos de predicción, se han llevado a cabo simulaciones con la finalidad de estudiar la aplicación del índice, su operatividad y posibles limitaciones. Este fue el caso de *Jenkins (2002)* que, utilizando un modelo acoplado atmósfera-incendios, realizó cuatro simulaciones con el fin de estudiar el comportamiento del incendio y el *HI*. En este primer trabajo llegó a la conclusión de que, en condiciones de velocidades de vientos débiles y terrenos llanos, el *HI* era un buen indicador de riesgo de grandes incendios forestales cuando tomaba valores iguales o superiores a 5, siendo críticas para valores de 6. De la misma manera observó que para los incendios en los que el *HI* era de 6, la humedad y estabilidad atmosférica eran sólo factores importantes cuando la humedad cerca de la superficie era bastante baja y la inestabilidad alta. Más tarde (*Jenkins 2004*), propuso una modificación del índice en función de los perfiles verticales de la atmósfera, así como atribuir un mayor peso al término de la estabilidad que al de humedad al calcular el mismo.

En la predicción de incendios forestales, el *HI* es una herramienta muy utilizada en EUA, disponiendo de mapas automáticos desde la década de los 90. A pesar de que algunos autores sugieren modificaciones en dicho índice, la mayoría no están a favor de éstas, y ante la ausencia de mejoras aplicables se recomienda adjuntar al mapa de predicción una explicación narrativa.

No se encuentran evidencias de que en España se hayan realizado estudios climatológicos del *HI*, aunque sí que se han hallado algunos estudios puntuales de determinados incendios en la CV (*Quílez 2007, 2008*). Además, como se ha comentado en el capítulo 1, se han identificado incendios dominados por columna en campañas experimentales de diversos proyectos

Europeos y durante la última década se ha observado una mayor incidencia de incendios dominados por columna, avalada por el Consorcio provincial de bomberos de Valencia, por lo que es importante disponer de información de referencia para predecir, interpretar el riesgo e identificar este tipo de incendios debido a que la extinción de estos puede resultar compleja debido a su comportamiento errático (Barberà et al., 2009, 2010a, 2010b; Peace et al., 2012). Así pues, en lo posterior se procederá a realizar el análisis de la distribución espacial y temporal del índice en la CV y la clasificación sinóptica de los diferentes valores del *HI* desde 1980 a 2008.

3.2) Metodología.

Para llevar a cabo el estudio climatológico del *HI* para nuestra región es necesario tener una base de datos de perfiles atmosféricos. Dado que la red sinóptica de observación en altitud no dispone de estación de radiosondeo en la CV, se ha optado por utilizar los datos de reanálisis del estadounidense National Centers for Environmental Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR), (<http://dss.ucar.edu/pub/reanalysis/>), ya que estos datos ya han sido usados en otros estudios climatológicos obteniendo resultados satisfactorios (Choi et al., 2006, Winkler et al 2007), con lo que se pueden realizar comparaciones entre ellos. Los datos de reanálisis se consideran como híbridos de observaciones y predicciones a corto plazo. Las predicciones a corto plazo sirven como primera aproximación que posteriormente será modificada en función de las observaciones de radiosondeo, satélites, barcos, boyas y aviones. Se han usado datos de reanálisis en lugar de datos procedentes de estaciones de radiosondeo debido a que su cobertura espacial sobre el área de estudio es mayor y más uniforme, evitando así también los problemas relativos a la calidad de los datos de radiosondeo (Winkler et al., 2007). El gran número de discontinuidades en las series temporales de estaciones individuales de radiosondeo como resultado de relocalizaciones, cambios en sensores y prácticas de observación pueden

comprometer el uso de datos de radiosondeo en propósitos climáticos (Elliott and Gaffen, 1991; Elliott et al., 1998; Gaffen et al., 2000; Winkler, 2004). Además, para la región de estudio, solamente se dispone de radiosondeos lanzados de forma continuada en las estaciones de Murcia, Madrid, Barcelona y Mallorca, todas ellas fuera de la CV.

Si bien existen datos a una resolución espacial de 1x1 grados (ds083.2) se ha trabajado con la resolución de 2.5x2.5 grados (ds090.0) ya que la resolución temporal de los primeros estaba muy limitada y no era suficiente para realizar un estudio climatológico (desde el 30 de Julio de 1999). Aunque en la base de datos seleccionada (ds090.0) constan datos desde el 01 de Enero de 1948, se han analizado éstos a partir de 1980 debido a que los datos de reanálisis del NCEP/NCAR anteriores presentan cierta inconsistencia de calidad a causa de la implementación de datos de satélite en 1979 (*Kalnay et al 1996*).

Existen algunas referencias que indican limitaciones en la fiabilidad de las variables de humedad en los datos de reanálisis de perfiles atmosféricos de NCEP/NCAR (Paltridge et al., 2009; Dessler and Davis, 2010). Para analizar esta problemática en la región de Valencia, se han comparado los datos de reanálisis con los de la estación de radiosondeo de Murcia, haciendo uso de los datos de la web de la Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). Esta localización no se encuentra dentro de la región de estudio, concretamente está situada en las coordenadas 38°N y -1.15°E, con lo que se encuentra entre las celdas 3x2 y 3x3 (ver Figura 13). Así pues, se realizó la comparación entre los datos de temperatura y humedad de reanálisis NCEP/NCAR (en las celdas 3x2 y 3x3) y los de radiosondeo de Murcia en los cuatro niveles utilizados para calcular HI (925, 850, 700 y 500 hPa), obteniendo buenas correlaciones. Paltridge *et al.*, (2009) and Dessler and Davis (2010) citan algunos problemas en la humedad específica de los datos de reanálisis de NCEP/NCAR, particularmente en las regiones tropicales y sobre los 500 hPa, pero este no es nuestro caso.

La base de datos NCEP/NCAR utilizada (ds090.0) posee datos en intervalos de 6 horas, a las 00, 06, 12 y a las 18 horas. Si bien en la bibliografía se pueden encontrar distintas opiniones sobre la franja horaria para calcular el índice entre las 00 y las 12, por ser en el tiempo que se dispone de datos de radiosondeo (*Werth y Werth, 1998; Brotak 1992-1993; Jones y Maxwell, 1998; Kochtubajda et al., 2001*), frente a la falta de consenso en este estudio se han usado los datos correspondientes a las 00 por ser la franja horaria en la que originariamente se desarrolló el *HI*. En la base de datos se pueden encontrar 80 variables diferentes (incluyendo altura geopotencial, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, etc.) en diferentes configuraciones, como son 17 niveles de presión a 2.5°x2.5° de resolución, 28 niveles sigma con celdas gaussianas de 192x94 y 11 niveles isentrópicos con celdas de 2.5°x2.5°.

Los archivos se descargan de un servidor donde es posible filtrar los datos para una región concreta del globo, (http://nomad1.ncep.noaa.gov/ncep_data/index.html), con lo que el tamaño de éstos y por consiguiente el tiempo de cálculo, se reducen considerablemente. A pesar de que en este servidor no están presentes todas las variables, sí que podemos encontrar las necesarias para calcular el *HI*, tales como la temperatura y la humedad relativa a partir de las cuales se deduce la temperatura de rocío a los niveles de presión de 925, 850, 700 y 500 hPa.

La humedad relativa (*HR*) y la temperatura de rocío (T_d) están estrechamente relacionadas con la cantidad de humedad en el aire (*Lawrence, 2005*). Recordando que la humedad relativa se puede definir como la proporción entre la presión de vapor actual, e , y la presión de saturación, e_s , tenemos la siguiente expresión:

$$HR = \frac{e}{e_s} 100 \quad [2]$$

La temperatura a la cual una parcela de aire a una temperatura inicial T y una presión P debe ser enfriada isobáricamente hasta llegar a la saturación es T_d , y en términos de la presión de vapor se expresa como:

$$e_s(T_d) = e(T) \quad [3]$$

Para expresar T_d en términos de HR es necesaria una expresión de dependencia entre e_s y T . A lo largo de los últimos dos siglos, fueron propuestas gran número de expresiones para ello, pudiendo encontrar un buen resumen y evaluación de éstas en *Gibbins (1990)*. Una de las expresiones empíricas de gran precisión y de las más utilizadas es la conocida como fórmula de Magnus:

$$e_s = C_1 \exp\left(\frac{A_1 T}{B_1 + T}\right) \quad [4]$$

Alduchov y Eskridge (1996) evaluaron esta expresión basándose en medidas de la presión de vapor y recomendaron utilizar los siguientes valores para los coeficientes: $A_1 = 17.625$; $B_1 = 243.04^\circ\text{C}$; y $C_1 = 610.94 \text{ Pa}$. Con ello, el error relativo de e_s era menor del 0.4% en el rango de temperaturas $-40^\circ\text{C} \leq T \leq 50^\circ\text{C}$.

Sustituyendo la ecuación 4 en la 3 se obtiene T_d en función de la presión de vapor ambiente y de la temperatura:

$$T_d = \frac{B_1 \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)}{A_1 - \ln\left(\frac{e}{C_1}\right)} \quad [5]$$

Por último, combinando esta ecuación con la ecuación 2 obtenemos la conversión entre RH y T_d , que será empleada para los cálculos:

$$T_d = \frac{B_1 \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{A_1 T}{B_1 + T} \right]}{A_1 - \ln \left(\frac{RH}{100} \right) - \frac{A_1 T}{B_1 + T}} \quad [6]$$

La descarga de datos NCEP/NCAR se ha realizado para la región de coordenadas geográficas comprendida entre 5°W y 2.5°E de longitud y de 35°N a 42.5°N de latitud, con ello tenemos una rejilla con 16 puntos en los que la CV se encuentra aproximadamente en el centro. En la Figura 13 se puede apreciar la distribución de las celdas en las que se dispone de información de los perfiles atmosféricos junto con el modelo digital del terreno de la CV con una resolución espacial de 50x50 metros (facilitado por el Departamento de Restauración Forestal de la Fundación CEAM) ya reclasificado para las tres elevaciones de estudio, que en adelante se citarán como bajas, medias y altas elevaciones y que se corresponderán con alturas inferiores a 305 m, entre 305 y 914m, y mayores de 914 m respectivamente. En esta figura también está representada la distribución de las estaciones de radiosondeo, advirtiéndose en ella que las estaciones más cercanas están separadas distancias mayores a 2.5°. Además, la resolución espacial empleada, teniendo en cuenta el perfil de temperatura puede revelar las condiciones de fenómenos convectivos.

En total se han descargado 348 archivos mensuales (29 años), que se corresponden con 10593 registros diarios. Los datos se encuentran en formato GRIB, con lo que se utiliza el software Grid Analysis and Display System (GrADS) para su tratamiento (Doty, 1995). GrADS es una herramienta que se utiliza para el acceso, manipulación y visualización de datos científicos de la Tierra. El formato de los datos es binario, GRIB, NetCDF o HDF-SDS (Scientific Data Sets). Este software utiliza un entorno de 4 dimensiones: longitud, latitud, nivel vertical y tiempo, y además de poseer gran cantidad de funciones intrínsecas, GrADS tiene una interfaz programable (lenguaje de script) que permite a los usuarios realizar análisis más complejos. Así pues, haciendo uso de esta herramienta, se ha elaborado un script para el cálculo del

HI, A y B durante el periodo de estudio (1980-2008) para cada una de las tres elevaciones y en cada una de las 16 celdas del rango de datos de estudio.

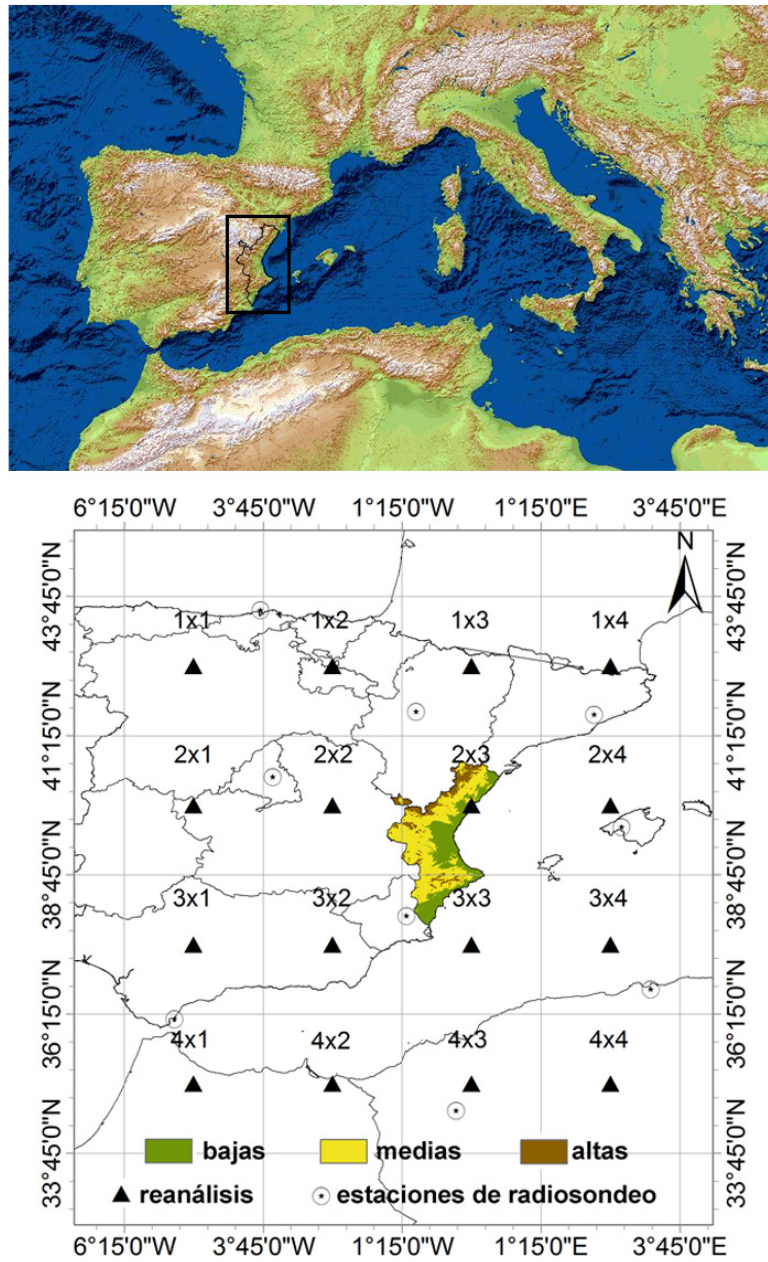


Figura 13 Topografía de la CV reclasificada para las elevaciones de estudio, representación de las celdas en las que se dispone de datos de reanálisis del NCEP/NCAR y de las estaciones de radiosondeo.

Los datos obtenidos como resultado de los diferentes scripts se han organizado en una base de datos en la que, para cada una de las elevaciones, figuran los campos fecha, año, mes, día del año, latitud, longitud, término A, valor en °C de A, término B, valor en °C de B, y el HI.

En la Figura 14 se muestra un ejemplo de la salida del cálculo de las distintas variables directamente en GRADS, términos A y B concretamente para el día 22 de junio de 2005 en elevaciones medias.

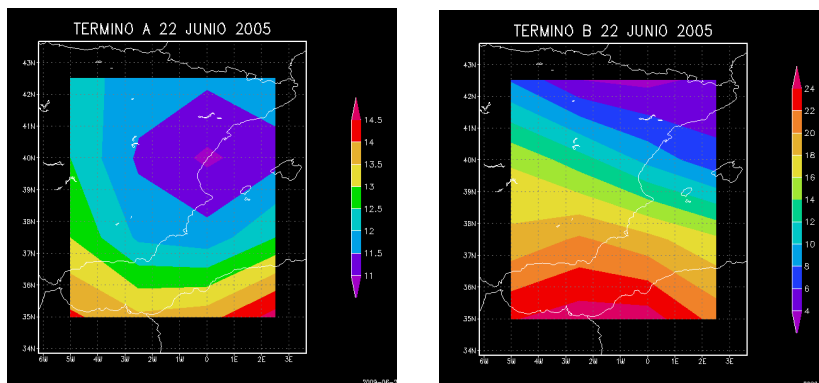


Figura 14 Ejemplos de los términos A y B (en °C) obtenidos con GRADS para el 22 de junio de 2005 en la variante de elevaciones medias.

3.2.1 Patrones espaciales del HI a nivel climático.

Con esta información se ha realizado un análisis estadístico, calculando las medias climáticas del HI, A y B durante el período de estudio (desde 1980 hasta 2008), las de verano (Junio-Septiembre), diarias, mensuales y anuales para cada una de las variantes por elevaciones dentro de la región mostrada en la Figura 13. Con el fin de poder mapear esta información se ha utilizado el software ArcGIS, mediante el que se ha realizado una transformación de la capa de puntos de coordenadas geográficas a UTM (Universal Transversal de Mercator), utilizando el Datum European Mean 1950 Huso 30 N (ED_1950_UTM_Zone_30N). Para obtener una representación continua de los

términos *A*, *B* y *HI* en cada elevación se ha hecho uso de la herramienta *Geostatistical Wizard* de *Geostatistical Analyst*, que permite interpolar la información puntual seleccionando los datos de entrada, el atributo a interpolar y el método de interpolación, utilizando en este caso el *kriging* (Oliver y Webster, 1990). Por último, se han exportado los datos de salida del análisis geoestadístico a *raster*, seleccionando un tamaño de celda de 500 m, que es más que suficiente si se tiene en cuenta la resolución espacial de los datos iniciales.

3.2.2 Patrones temporales del HI a nivel climático.

En lo sucesivo, al analizar la información (excepto en los casos en los que se representen los resultados en mapas) solamente se tendrán en cuenta las celdas de datos de reanálisis del NCEP/NCAR en las que hay información dentro de la CV, sin considerar la proporción de la celda que ocupan. Estas celdas son la 2x2 cuyo centro de coordenadas geográficas se corresponde con (40°N, -2.5°E), 2x3 con centro en (40°N, 0°E) y la 3x3 centrada en (37.5°N, 0°E). Además hay que tener en cuenta las elevaciones de cada una de estas celdas dentro de la Comunidad, haciendo notar que en la celda 2x2 ningún píxel se corresponde con bajas elevaciones mientras que en las otras dos (2x3 y 3x3) se pueden encontrar datos en los tres rangos altitudinales. Considerando esto, se representa la evolución interanual, intermensual y diaria de los términos *A*, *B* y del *HI* y la diaria del *HI* en cada una de las elevaciones de estudio dentro de la CV. Los resultados de este análisis se incluyen en la sección 3.3, donde se incluyen todos los resultados alcanzados en este capítulo.

3.2.3 Patrones espaciales y temporales de los eventos extremos.

Una vez realizado el estudio climatológico del índice en la CV, haciendo uso de la base de datos, se han analizado los casos en que la frecuencia anual, mensual y diaria del *HI* es igual a 5 y 6, que se corresponden con el moderado y alto potencial de crecimiento de un gran incendio forestal dominado por columna. Para ello y siguiendo la metodología del apartado anterior, para sintetizar se representan primero los valores medios para toda la CV en cada elevación, con el propósito de disponer de los resultados globales en toda el área de estudio.

Por último, se calcula el promedio de la ocurrencia anual en los que el *HI* toma valores 5 y 6. Con estos datos se ha mapeado la información para cada variante del índice haciendo de nuevo uso del software *ArcGIS* con la misma metodología descrita anteriormente, obteniéndose como resultado la frecuencia anual con la que el índice toma valores moderados y altos.

3.2.4 Análisis sinóptico asociado a los valores del HI.

El estudio de las condiciones que propician índices con valores extremos requiere un análisis previo de las situaciones meteorológicas que los provocan. Por ello se han analizado los patrones sinópticos, tanto en superficie como en altura, que llevan asociados cada valor del *HI* durante período de estudio (1980-2008).

A partir de la base de datos inicial se han filtrado los registros para cada valor del índice y cada elevación en las celdas de reanálisis que cubren la CV. Como existen días en los que el índice presenta el mismo valor en más de una de las celdas, se seleccionan los únicos datos correspondientes al campo de la fecha y se lleva a cabo el estudio sinóptico en esos días.

Con el fin de efectuar este análisis se ha hecho uso de la base de datos de situaciones sinópticas, tanto en superficie como en altura, realizadas por el departamento de Meteorología y Climatología de la Fundación CEAM (<http://www.ceam.es/ceamet>), mediante el método visual de los mapas de reanálisis a 500 y 850 hPa del NCEP elaborados por el centro meteorológico alemán *Wetterzentrale* (<http://www.wetterzentrale.de/>). El análisis en superficie se realizó a partir de las líneas de isóbaras contenidas en los mapas típicos de presión a nivel del mar, mientras que el análisis en altura se llevó a cabo combinando los mapas de altura geopotencial de 500 hPa y las líneas isotermas de temperatura de los de 850 hPa. La metodología aplicada fue la misma que la utilizada en Millan et al. (2005) obteniéndose una base de datos diaria en la que cada día fue clasificado distinguiéndose los tres tipos de situaciones sinópticas siguientes:

- ✓ Flujos continentales que se corresponden con situaciones en las que el recorrido de la masa de aire no tiene aporte extra de humedad, es decir son flujos horizontales en general del tercer y cuarto cuadrante o generalmente flujos procedentes del Oeste.
- ✓ Flujos marítimos que proceden del primer o segundo cuadrante, o normalmente del Este. Pueden tener mayor aporte de humedad debido a que su trayectoria discurre por el Mar Mediterráneo.
- ✓ Situaciones convectivas caracterizadas por un calentamiento del suelo y por tanto de la masa de aire próxima a éste, predominando así los movimientos verticales de las masas de aire, en lugar de los movimientos horizontales (advección).

A modo de ejemplo, se muestran a continuación los mapas de determinados días que se corresponden a cada una de estas situaciones.

En la Figura 15 se presenta una situación típica con entrada de flujo continental sobre la CV (22 de Junio de 1982). Se puede observar un centro de bajas presiones situado sobre el Atlántico, al Noroeste de la Península, que impulsa una circulación de vientos del Oeste sobre el Norte peninsular que

llegarán a la Comunidad bastante debilitados. En niveles medios y altos de la troposfera la Península se encuentra entre una masa de aire frío, asociada a esta borrasca, cuya inestabilidad alcanza al Noroeste peninsular, y una masa de aire más cálida y seca asociada a una cresta de aire sahariana que se extiende desde el Norte de África.

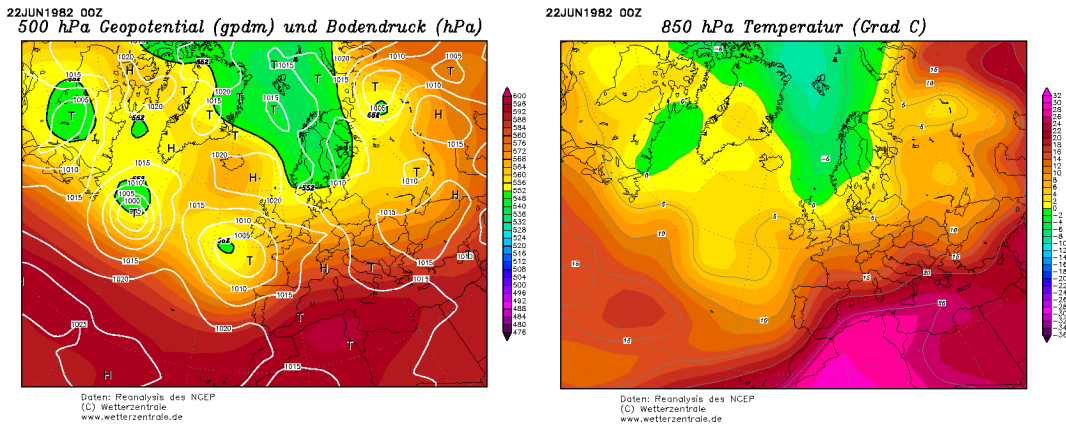


Figura 15 Ejemplo de situación de flujo continental. Izquierda: altura geopotencial a 500 hPa y presión media a nivel del mar (Nota: T representan bajas presiones). Derecha: Temperatura a 850 hPa. Fuente: www.wetterzentrale.de.

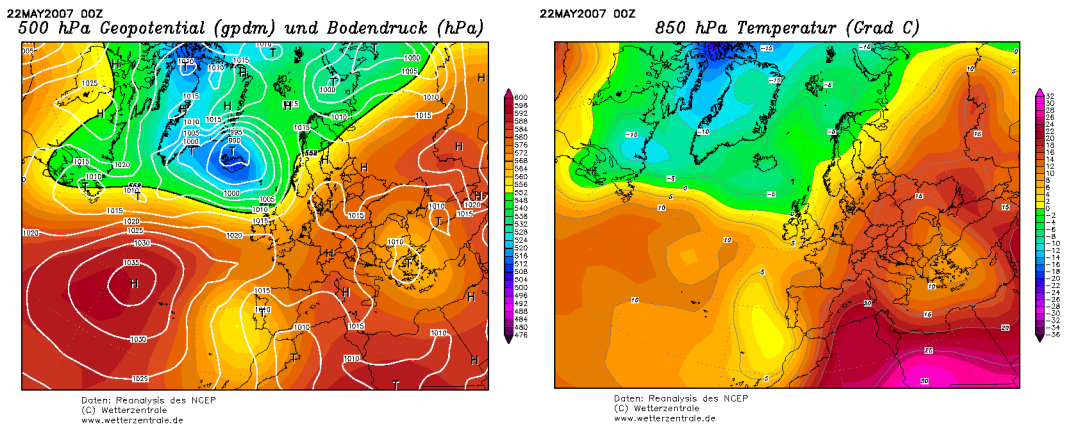


Figura 16 Situación de flujo marítimo. Izquierda: altura geopotencial a 500 hPa y presión media a nivel del mar (Nota: T representan bajas presiones). Derecha: Temperatura a 850 hPa. Fuente: www.wetterzentrale.de.

En la Figura 16 se presenta una situación de flujo marítimo (22 de Mayo de 2007) donde las altas presiones se extienden en superficie desde el Noroeste de las Azores hacia el Norte de Europa estableciéndose un flujo de vientos de componente Este en la CV. En niveles medios y altos de la troposfera se puede observar un embolsamiento de aire frío al Suroeste de la Península, extendiéndose una cresta de aire más estable, cálido y seco sobre la cuenca del Mediterráneo Occidental.

Por último, la Figura 17 muestra la situación sinóptica el día 21 de agosto del 2000 clasificada como convectiva. En ella se puede observar una vaguada al Oeste de la Península, extendiéndose de Norte a Sur y una expansión de aire cálido tropical continental desde el Norte de Argelia sobre el Este de la Península, de Sur a Norte, con una situación de pantano barométrico sobre la Península, o baja térmica relativa diurna en el interior, y brisas muy débiles, con eventuales entradas de terrales.

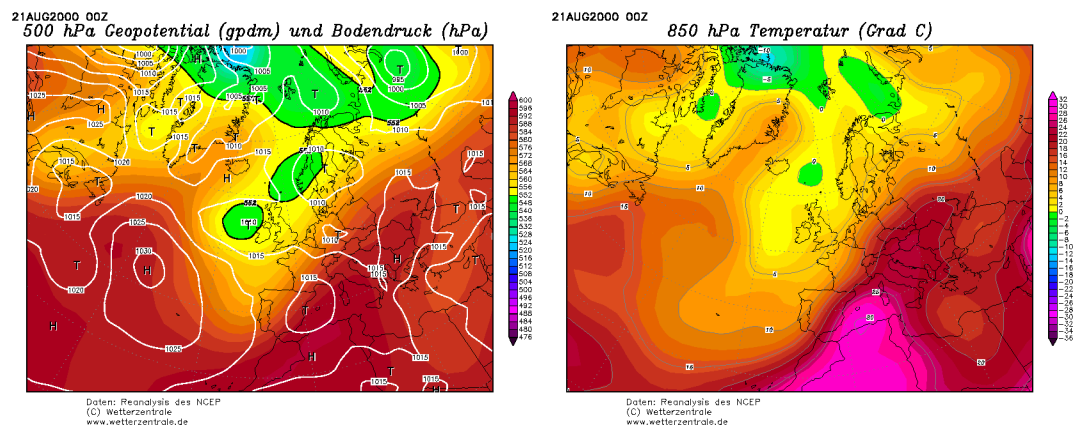


Figura 17 Situación sinóptica convectiva. Izquierda: altura geopotencial a 500 hPa y presión media a nivel del mar (Nota: T representan bajas presiones). Derecha: Temperatura a 850 hPa. Fuente: www.wetterzentrale.de.

3.3) Resultados.

En esta sección se presentan los resultados de la climatología y análisis sinóptico del HI que ya han sido publicados en revista internacional indexada en *ISI Web of Knowledge – Journal Citation Reports*, como publicación del primer cuartil (Barberà et al., 2015; incluida como anexo).

3.3.1 Climatología del HI.

3.3.1.a Patrones espaciales del HI a nivel climático.

Con la finalidad de ilustrar las variaciones espaciales medias del *HI* en el período 1980-2008, se presentan a continuación una serie de parámetros incluidos en el estudio climatológico. En las Figuras 18 y 19 se muestran los términos A y B (ver Tabla 6) obtenidos para los valores climáticos calculados durante todo el periodo de estudio en bajas elevaciones. Se observa un ligero gradiente Norte-Sur en el término A en la CV, con los mayores valores en el Norte, mientras que el término B también presenta un ligero gradiente positivo de Noroeste a Sudeste.

Las Figuras 20, 21 y 22 muestran las medias climáticas para cada variante del HI (bajas, medias y altas elevaciones) en el rango de 2 a 6 (según Tabla 6) durante el periodo de estudio completo (izquierda) y durante el verano (derecha), por ser la estación de mayor riesgo de producirse incendios forestales, en concreto durante los meses de Junio a Septiembre. La variabilidad del HI en bajas elevaciones (Figura 20 izquierda) es muy pequeña en la región de estudio, con un valor medio alrededor de 3.8. En medias elevaciones (Figura 21 izquierda), el valor de HI es mayor entre 4 en el Norte de la Comunidad y 4.3 en el Sur. Para la variante de altas elevaciones se obtienen los menores valores climáticos de HI, que aumentan de Norte a Sur (Figura 22, medias alrededor de 2.8 en el Norte y menores de 3.2 en el Sur).

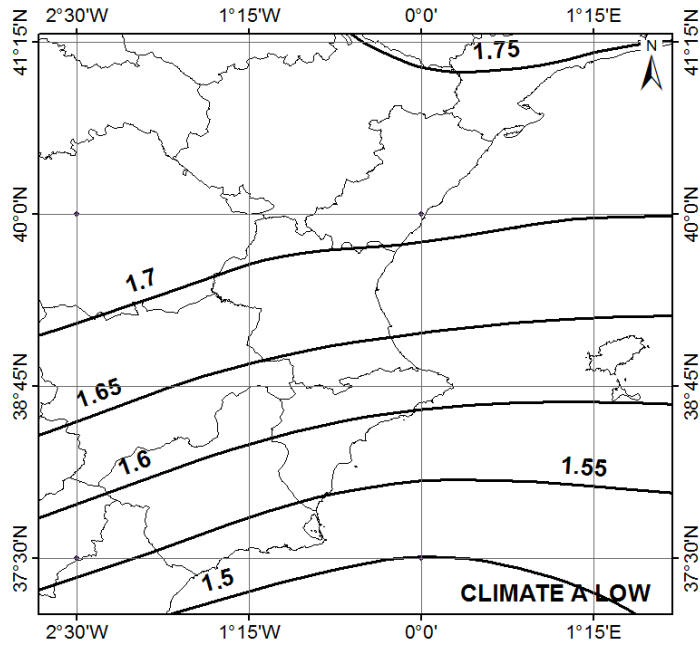


Figura 18 Medias climáticas (1980-2008) del término A en bajas elevaciones.

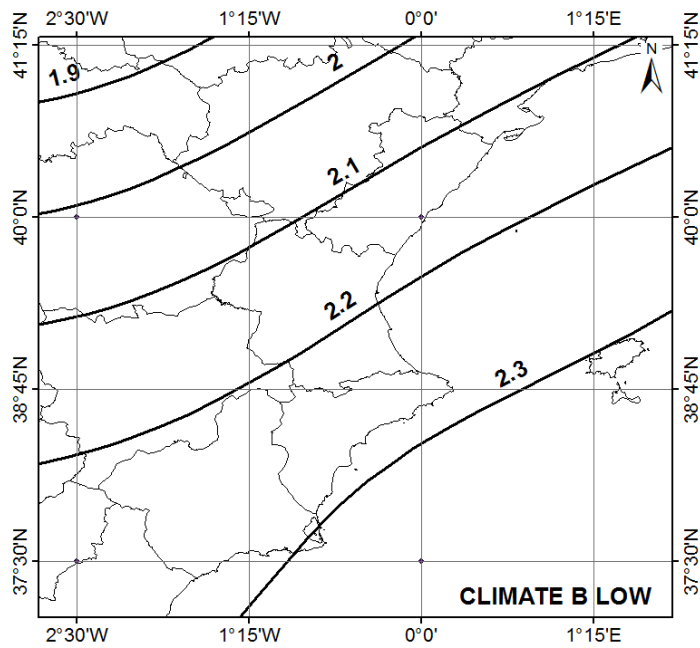


Figura 19 Medias climáticas (1980-2008) del término B en bajas elevaciones.

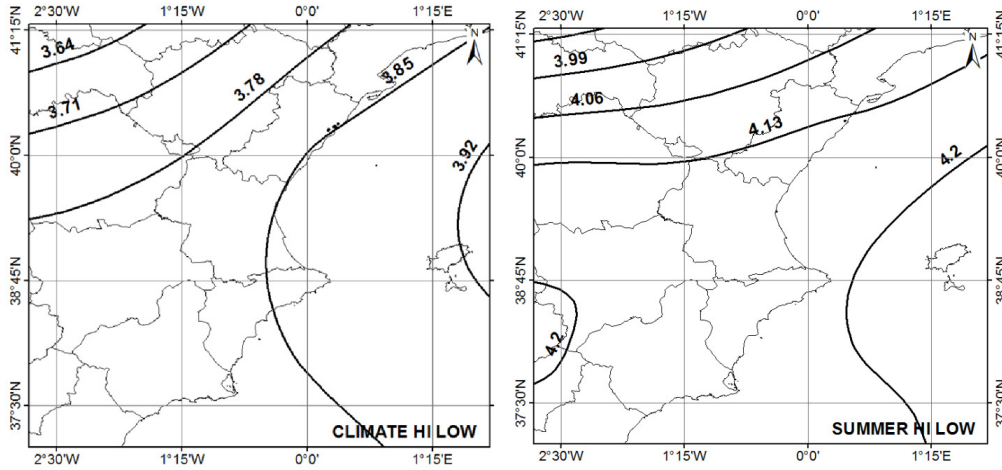


Figura 20 Distribución espacial de las medias climáticas del HI en bajas elevaciones durante todo el periodo de estudio (izquierda) y en verano (derecha).

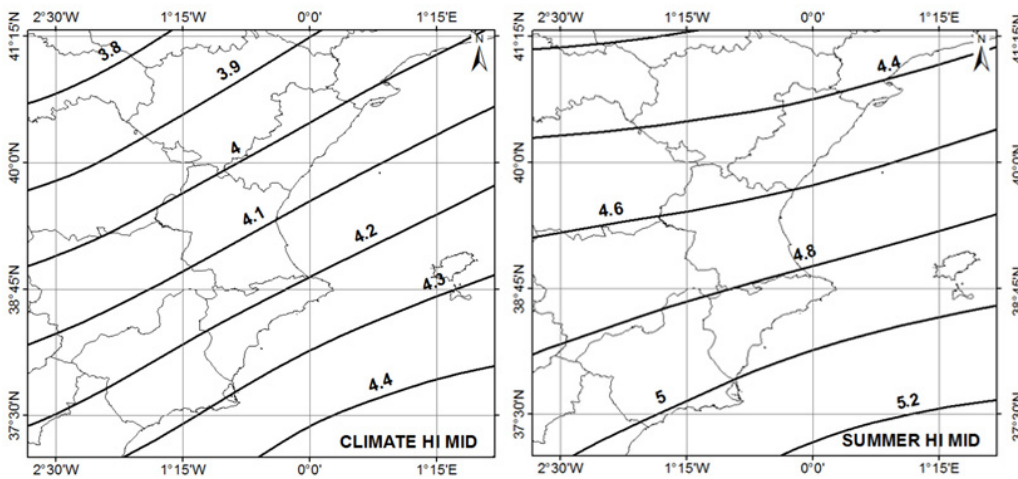


Figura 21 Distribución espacial de las medias climáticas del HI en medias elevaciones durante todo el periodo de estudio (izquierda) y en verano (derecha).

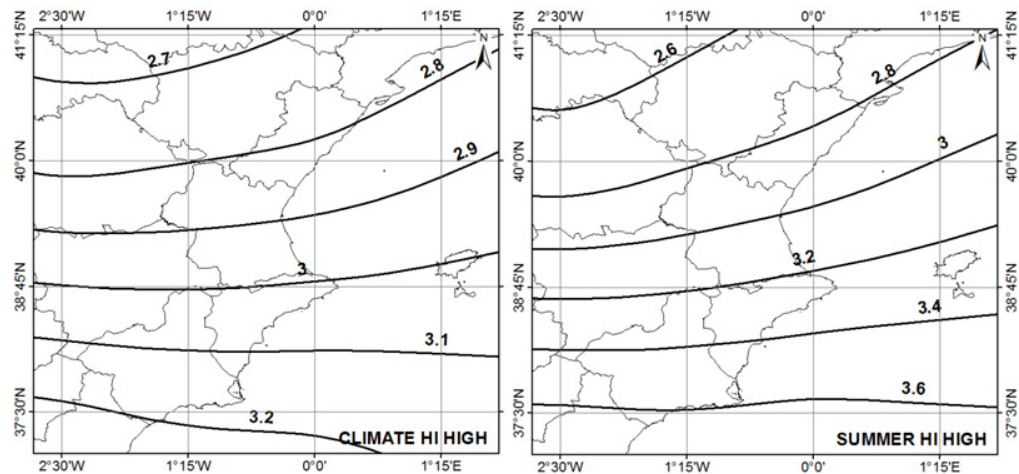


Figura 22 Distribución espacial de las medias climáticas del HI en altas elevaciones durante todo el periodo de estudio (izquierda) y en verano (derecha).

Si comparamos las figuras correspondientes a las medias climáticas calculadas en verano con las obtenidas para todo el periodo, generalmente estas muestran un incremento de los valores de HI, con diferencias por ejemplo de 0.3 para la variante de bajas elevaciones. Este incremento es más notable en el Sur especialmente en elevaciones medias, siendo de 0.7, mientras que las medias climáticas en altas elevaciones durante el verano permanecen constantes en el Norte incrementándose en el Sur de la región alrededor de 0.4.

Los mayores valores climáticos se encuentran principalmente en las zonas del prelitoral e interior del tercio Sur, y se corresponden con la variante de medias elevaciones. Mientras, las áreas con menores valores climáticos de HI se localizan en las zonas montañosas del interior Norte de la región.

3.3.1.b Patrones temporales del HI a nivel climático.

Tras haber realizado el anterior análisis climatológico, se analizaron las variaciones interanuales, intermensuales y diarias de los valores promedios que toma el *HI* y los términos de los que se deduce. Las variaciones diarias no se muestran para el conjunto del periodo de estudio ya que los resultados graficados son muy similares a los intermensuales. Estos cálculos se llevan a cabo en las tres celdas de los datos de reanálisis NCEP/NCAR que contienen información correspondiente a algún punto dentro de la CV para cada variante del índice, es decir, las celdas 2x2, 2x3 y 3x3 de la Figura 13.

1) Evolución interanual

Los resultados obtenidos de la evolución interanual de 1980 a 2008 se muestran a continuación.

En la Figura 23 se puede observar la evolución interanual, con los valores calculados a partir de las medias anuales del *HI* de 1980 a 2008. En la celda 2x2 no se encuentran elevaciones por debajo de 305 m, con lo que la variante de bajas elevaciones ha sido eliminada para la citada celda. La figura muestra una tendencia general al ascenso del *HI* en los últimos 29 años. Además, tal y como se ha podido observar en la sección anterior, se corrobora que para medias y altas elevaciones durante todo el período de estudio los mayores valores del promedio anual se registran en la celda 3x3, correspondiente al Sur de la Comunidad, seguida de la 2x3 registrándose los mínimos en la 2x2, en el Oeste de la Comunidad (Figura 13). En cambio, en bajas elevaciones los promedios del *HI* muestran unos valores similares en las celdas 2x3 y 3x3, observándose en general hasta 1990 mayores valores en la 3x3 y a partir de 1990 en la 2x3. Tanto en bajas como en altas elevaciones el término *A* muestra una muy ligera tendencia al descenso o permanece más o menos constante, con lo que el aumento del *HI* vendrá determinado por el aumento del término *B*, relativo a un descenso en la humedad, en el período analizado. De los tres casos estudiados, las elevaciones medias son las que

presentan una tendencia al ascenso más clara y significativa ya que para estas regiones la evolución interanual tiende al ascenso tanto en el término de estabilidad como en el de humedad, aunque en el caso de la estabilidad la tendencia sea más ligera.

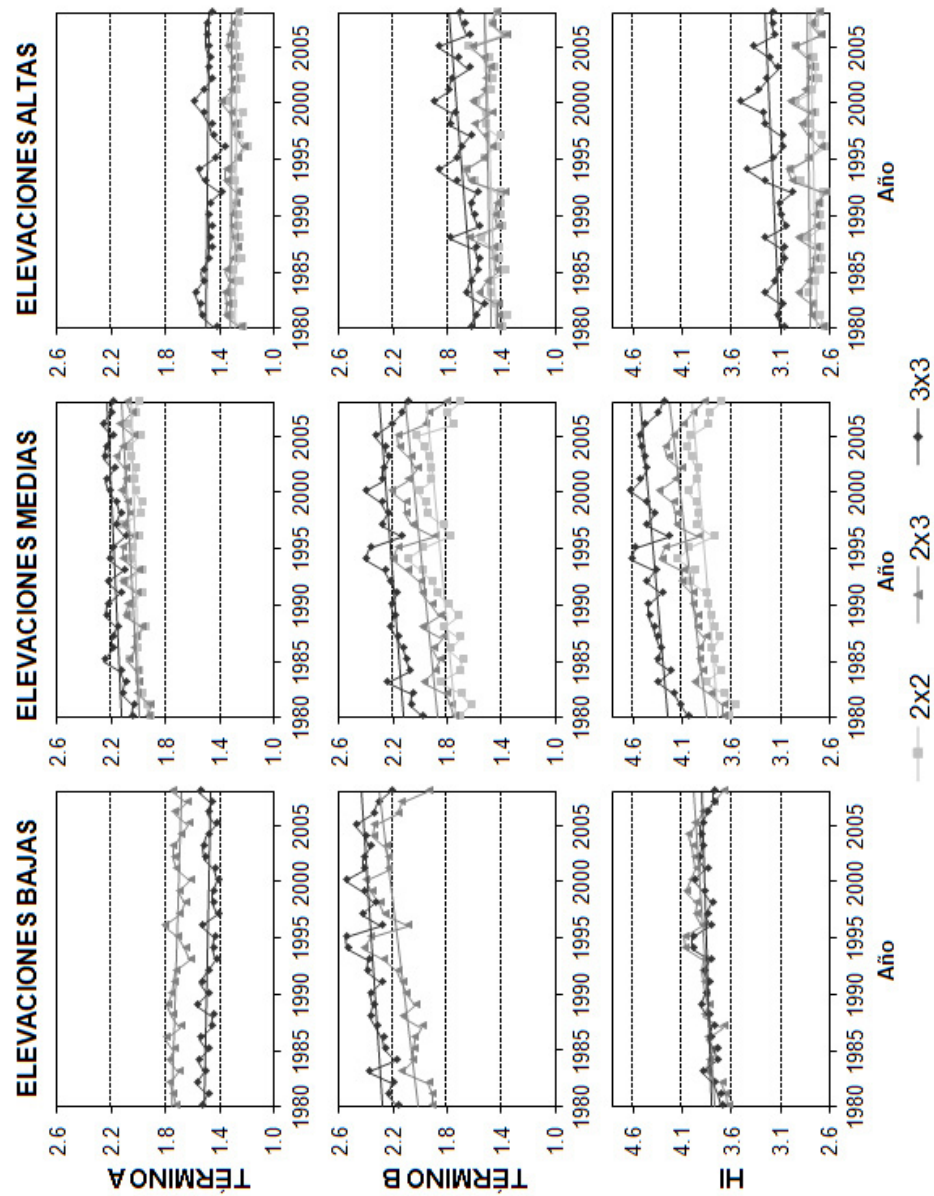


Figura 23 Evolución interanual de los términos A y B y del HI en las tres elevaciones de estudio.

II) Evolución intermensual

Análogamente, si para cada elevación se realiza el análisis intermensual del promedio de los términos *A* y *B*, así como del *HI*, se obtiene la Figura 24. En esta figura se puede observar como en general la dinámica intermensual muestra los promedios mínimos en los meses de invierno, manteniéndose en valores similares hasta principios de primavera, cuando progresivamente tienden al ascenso alcanzando el máximo en los meses centrales de verano, entre Julio y Agosto, para posteriormente tender al descenso hasta alcanzar valores cercanos a los iniciales. No obstante, el término *A* en bajas elevaciones muestra una evolución mensual que difiere de la tónica general, obteniéndose los promedios máximos en Abril y Septiembre y los menores valores en invierno, excepto en la celda 3x3 donde el mínimo absoluto se encuentra el mes de Julio. Debido a esto la evolución mensual del *HI*, aunque en rasgos generales sigue la dinámica general, ya que el término *B* también lo hace, no está tan definida como en los demás casos. Cabe destacar también que para la variante de altas elevaciones, en las celdas 2x2 y 2x3 los promedios mínimos del *HI* se observan en Mayo y Septiembre, presentando los valores máximos en Julio, Enero y Diciembre, tendencia que es similar a la del término *B*, ya que la evolución del término *A* es más o menos constante excepto en los meses de verano en los que sigue la dinámica general.

Si en lugar de las tendencias se analizan los valores que puede tomar cada término, se puede observar que en bajas y medias elevaciones el promedio del término de humedad (*B*) tiene un valor similar. En cambio, el valor promedio del *HI* es mayor en medias que en bajas elevaciones, luego este ascenso vendrá asociado al término de estabilidad (*A*), el cual presenta unos promedios bastante superiores en elevaciones medias, sobre todo en los meses de verano. Los valores del promedio mensual del *HI* en elevaciones medias en Junio, Julio y Agosto son mayores o iguales a 5, indicando un riesgo moderado en el desarrollo de incendios dominados por columna. Los menores promedios

del HI se dan en altas elevaciones, debido principalmente a que los valores en el término de humedad son más bajos (es decir, la humedad es mayor).

Estos resultados pueden ser utilizados como información de referencia para interpretar y evaluar las observaciones y predicciones del HI en el área de estudio, comparando éstas con los valores climáticos.

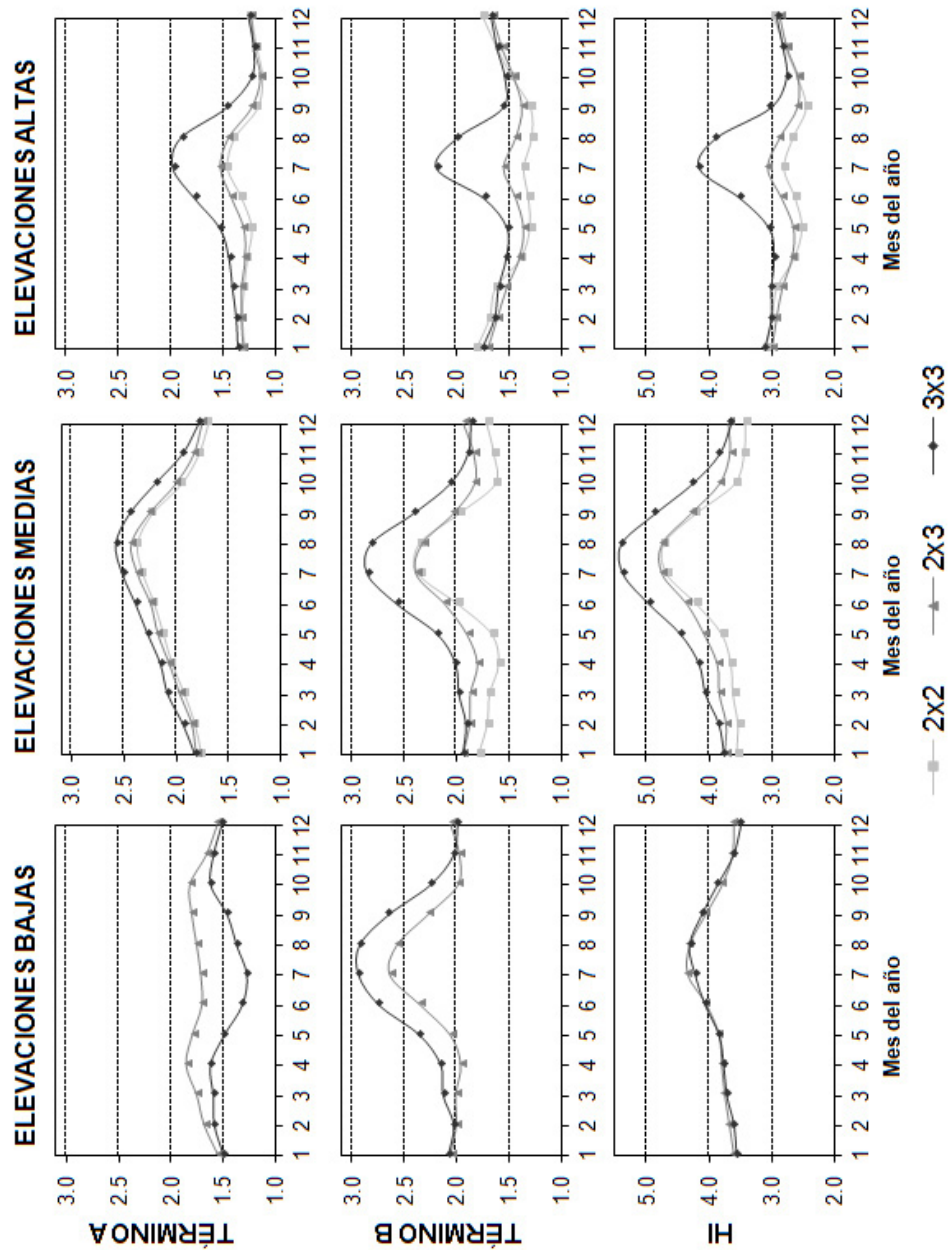


Figura 24: Evolución intermensual de los términos A y B y del HI en las tres elevaciones de estudio.

3.3.1.c Patrones espaciales y temporales de los eventos extremos.

Siguiendo la misma metodología que en el caso de los valores medios, se han analizado los patrones temporales para los casos en los que el *HI* toma valores moderados o altos, es decir, en los que este es igual a 5 o 6, que se corresponden con un potencial de riesgo moderado o extremo de desarrollo de incendios dominados por columna.

En este caso, para sintetizar, se promedian los resultados en las tres celdas que cubren la CV. Para el análisis temporal, se obtiene así el número promedio de casos por año y mes en los que se ha obtenido un índice moderado o alto en el periodo de 1980 a 2008, mientras que para el análisis espacial se representa el número promedio de casos anual.

1) Evolución interanual

La Figura 25 muestra el análisis interanual del número de casos de índices moderados o extremos en la CV. En esta figura se puede observar como el mayor número de eventos de *HI* moderado o alto se presenta en elevaciones medias, con un promedio de 81 y 41 casos al año respectivamente. Le sigue en número de casos moderados los registrados en elevaciones bajas con 71 casos, sin observarse en todo el período de estudio para esta variante del índice ningún evento alto. El número de casos moderados en altas elevaciones es bastante menor, 35 eventos, registrándose únicamente un promedio en número de casos de 2 para $HI=6$. Además, se puede observar, al igual que ocurría con los valores promedios, una tendencia al ascenso en la ocurrencia de índices moderados y altos en todas las elevaciones de estudio en los últimos 29 años, exceptuando los sucesos de índices extremos en bajas elevaciones donde no se ha denotado ningún cambio. Esta tendencia es más notable en la ocurrencia de índices moderados, siendo también significativa en la incidencia de índices altos para elevaciones

medias y más ligera en altas elevaciones. De ello, se puede deducir que la probabilidad de que se dé un valor del HI moderado o extremo está aumentando con el tiempo.

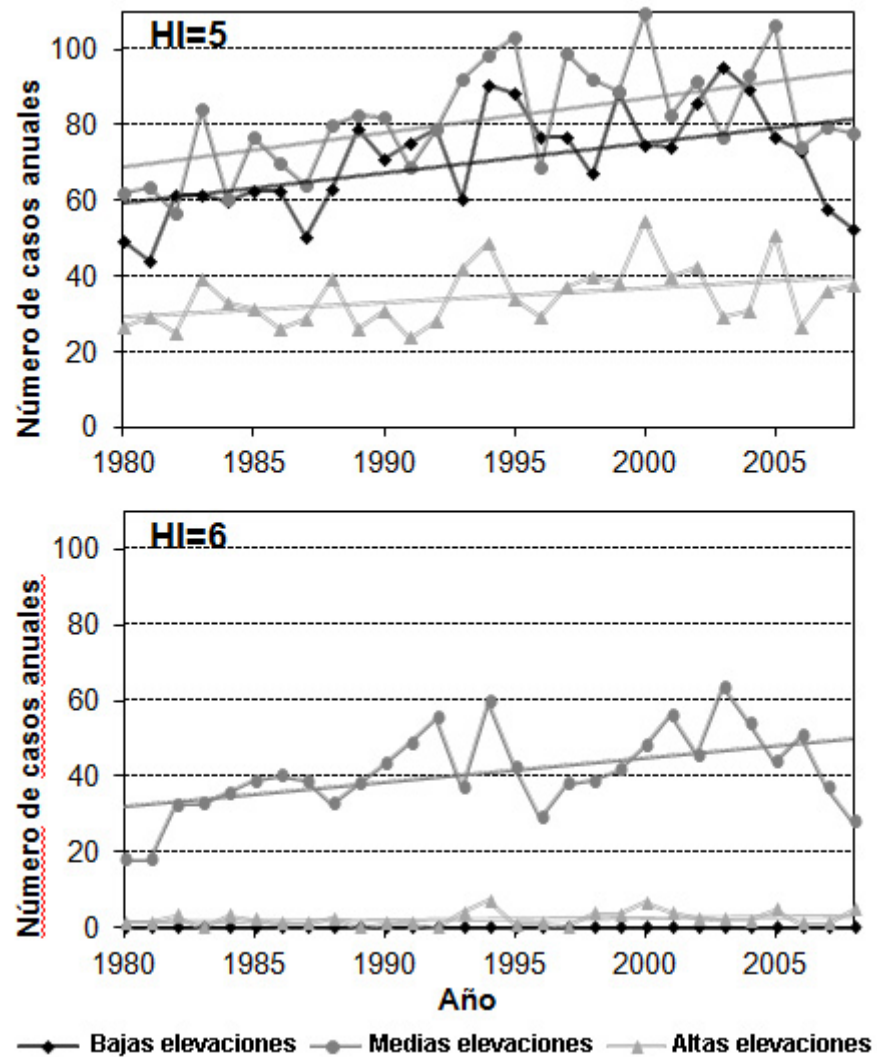


Figura 25 Ocurrencia interanual del HI=5 y 6 en la CV para las tres elevaciones de estudio.

Es previsible que el cambio climático cause en nuestro territorio una agudización de los fenómenos extremos y un incremento del riesgo (Estrela, 2008, Martín Vide, 2008, Olcina, 2008, IPCC, 2007). Las proyecciones de clima futuro realizadas utilizando diferentes modelos y escenarios indican que el

cambio climático comportará un aumento en el índice medio de peligro de incendios, debido a cambios en las diferentes variables meteorológicas utilizadas en su cálculo, aumento que es probable que conlleve incrementos en la ocurrencia de incendios, en el área quemada y en la desigualdad de los incendios (Moreno et al., 2007). Esto hace pensar que puedan darse con mayor frecuencia situaciones en las que sea muy difícil hacer frente a los incendios y que se requerirá un aumento de las medidas de prevención, actuación y mitigación de sus efectos.

II) Evolución intermensual

El número promedio de casos mensuales en las tres celdas de estudio para cada variante del índice se muestra en la Figura 26. Los gráficos siguen unos patrones similares a los de los valores promedios, presentando en general mayor número de casos de índices altos en verano, coincidiendo con la época en la que se registran un mayor número de incendios forestales en la CV (Millán, *et al.*, 1998), y un menor número en invierno. En bajas elevaciones se presenta la máxima incidencia de índices moderados entre Julio y Agosto, con un promedio de unos 12 casos al mes, mientras que en medias y altas elevaciones la ocurrencia máxima intermensual se observa en Septiembre con 9 casos y en Julio con 5 respectivamente. Del gráfico que muestra el promedio del número de casos mensual con $HI=6$ se puede concluir que el máximo número de casos en los que el índice presenta un valor extremo para la variante de medias elevaciones se da entre Julio y Agosto, con un promedio de 11 casos, mientras que en altas elevaciones el máximo se observa en Julio, con un solo caso. En general se pueden dar índices extremos en cualquier periodo del año, por tanto la monitorización del HI debería realizarse durante todo el año, sin acotarse a ciertas estaciones.

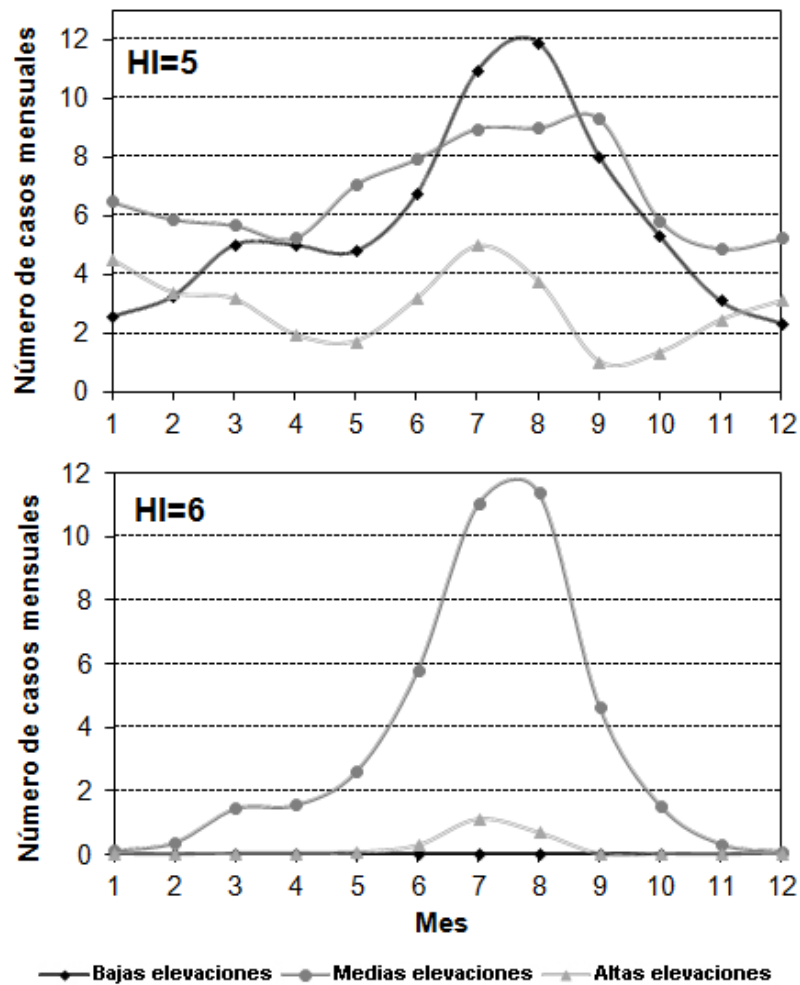


Figura 26 Ocurrencia intermensual del HI=5 y 6 en las tres elevaciones de estudio.

El HI fue definido de manera que los efectos diarios (variabilidad de la temperatura y la humedad durante el ciclo diario) se redujeran y la incidencia de índices altos ($HI = 6$) fuera poco frecuente (Haines, 1988). De la Figura 26 se puede extraer que esta hipótesis se ajusta bastante bien en bajas y altas elevaciones pero no en las medias, siendo la ocurrencia media de índices altos bastante elevada, sobre todo en verano. Esto es debido al término de estabilidad (A), ya que el de sequedad (B) en elevaciones medias es similar al observado en las bajas. De hecho, Mills and McCaw (2010) detectaron un

problema similar en Australia, con valores de $HI=5$ o $HI=6$ casi todos los días de verano, lo que solucionaron creando el HI continuo definido en su trabajo. A causa de ello, la información proporcionada a las agencias de prevención de incendios en Australia por los predictores de la Oficina de Meteorología es, además del índice *McArthur*, el HI continuo. Por tanto, una modificación similar cabría evaluarse en la región de estudio a corto plazo.

III) Patrones espaciales de los valores extremos

Finalmente, para que esta información sea más visual, en las Figuras 27-29 se representan los patrones espaciales correspondientes al número medio anual de días en los que el HI toma valores moderados o altos.

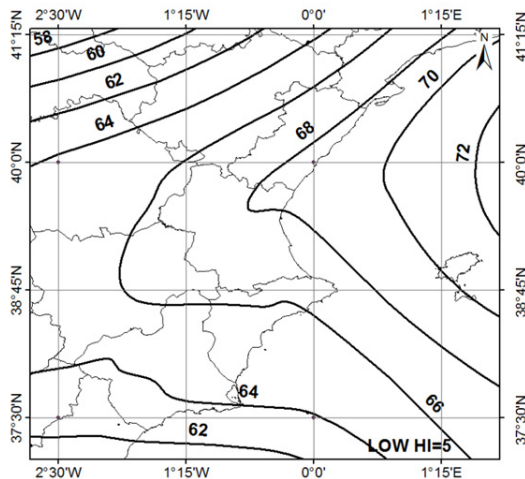


Figura 27 Promedio anual del número de casos en los que HI=5 en la CV en bajas elevaciones.

Teniendo en cuenta la orografía de la región (Figura 13), los mapas espaciales revelan que la mayor ocurrencia de valores extremos del índice en la CV se observa en las zonas del prelitoral e interior del tercio Sur, correspondiéndose con la variante de medias elevaciones. Además estos valores extremos tienen un gradiente positivo Norte-Sur, es decir, los valores

umentan de Norte a Sur. Como ya se ha mencionado, durante el periodo de estudio no se encuentran $HI=6$ en áreas litorales (bajas elevaciones). En general el menor número de eventos extremos se observan en la variante de altas elevaciones.

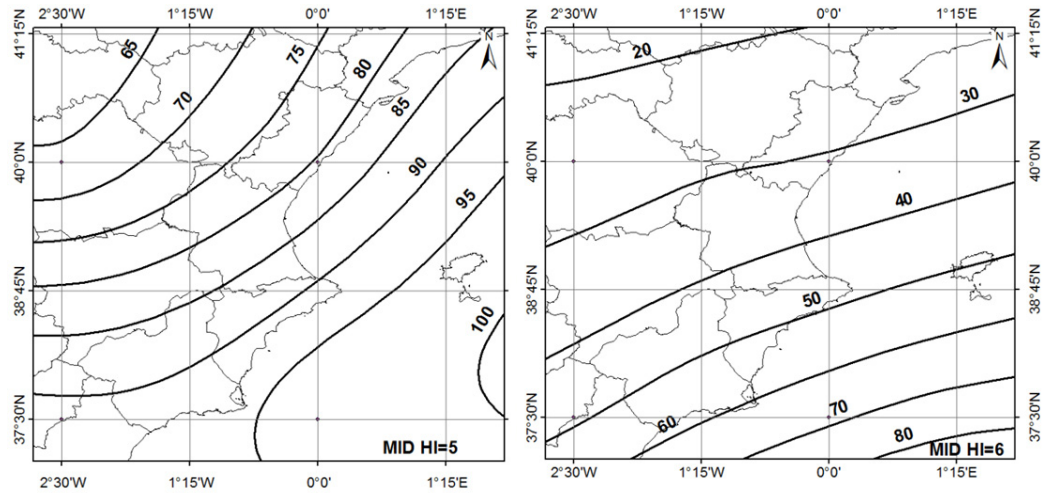


Figura 28 Promedio anual del número de casos en los que $HI=5$ y 6 en la CV en medias elevaciones.

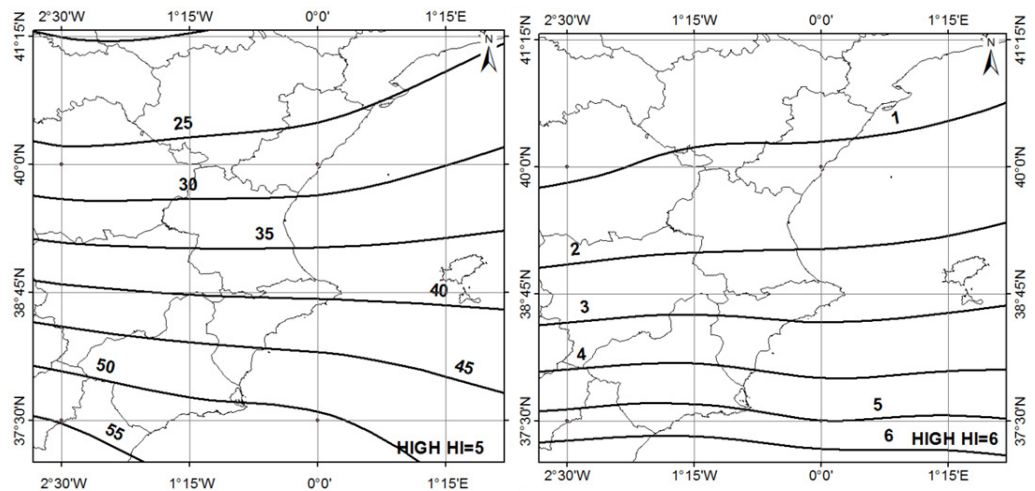


Figura 29 Promedio anual del número de casos en los que $HI=5$ y 6 en la CV en altas elevaciones.

La climatología aquí presentada, puede resultar una valiosa herramienta para mejorar el sistema de predicción de riesgo y seguimiento de incendios. El *HI* muestra el riesgo de incendios dominados por columna, con lo que para evaluar el riesgo general de incendios sería conveniente complementar esta información con los índices de riesgo convencionales, a la vez que estos índices convencionales deberían integrar un índice como el de Haines para contemplar cualquier tipología de riesgo de incendio.

3.3.2 Análisis sinóptico asociado a los valores del HI.

En esta sección se ha realizado el estudio de las situaciones que llevan asociadas determinado valor del *HI* para cada elevación. En primera instancia se podría pensar en extrapolar el análisis de superficie al de altura y en la mayoría de casos sería correcto, excepto para los patrones clasificados como flujos marítimos, ya que en estas situaciones se puede dar un flujo de vientos de componente Este en superficie mientras que en altura podría predominar un flujo continental. Por ello se han analizado tanto en altura como en superficie los patrones sinópticos correspondientes a cada valor que toma el índice en todas sus variantes, ya que debido a las considerables diferencias en los valores del índice dependiendo de la altitud (observadas en secciones anteriores de esta tesis y en otros estudios como Choi et al., 2006 y Winkler et al., 2007), si se tomaran las medias se podrían enmascarar resultados (Figuras 30, 31 y 32).

En estas figuras se puede observar una tendencia similar, con una proporcionalidad directa entre el aumento del valor de *HI* y el de situaciones convectivas. Por tanto, a medida que aumenta el valor del *HI* decrecerá la probabilidad de que la situación sinóptica venga asociada a flujos continentales o marítimos. Además, como se ha mencionado anteriormente, se puede observar como la distribución de patrones sinópticos en altura es muy similar a la representada en superficie, con la salvedad que desciende el porcentaje de

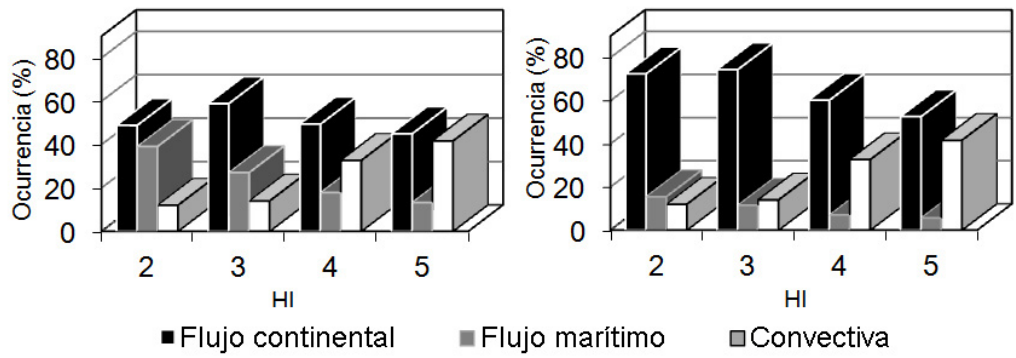


Figura 30 Clasificación sinóptica en superficie (izquierda) y en altura (derecha) de los valores de HI en bajas elevaciones.

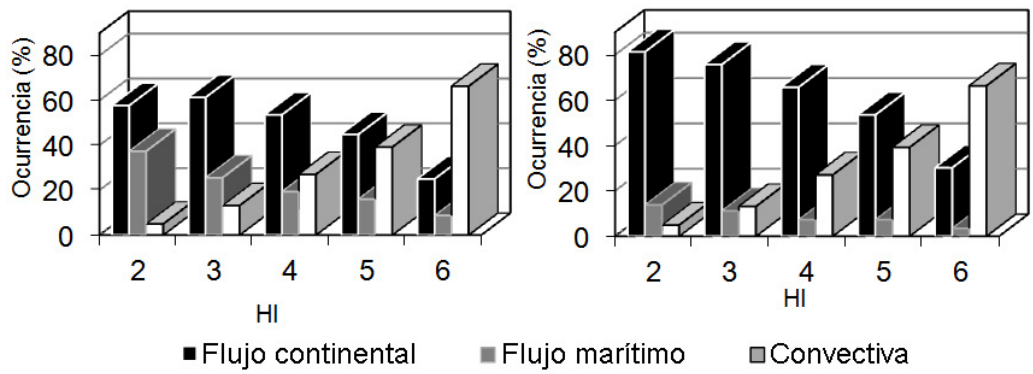


Figura 31 Clasificación sinóptica en superficie (izquierda) y en altura (derecha) de los valores de HI en medias elevaciones.

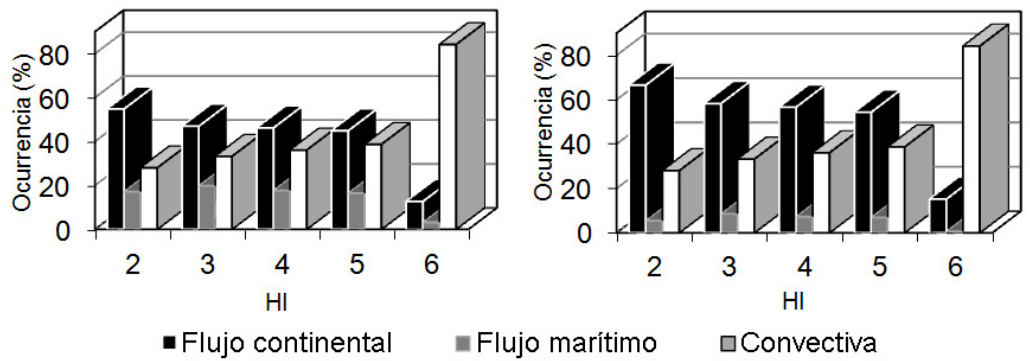


Figura 32 Clasificación sinóptica en superficie (izquierda) y en altura (derecha) de los valores de HI en altas elevaciones.

flujos marítimos pasando a estar englobados dentro de la clasificación de flujos continentales.

En la tipificación de situaciones convectivas, se observa que cuando el *HI* toma el valor mínimo sólo el 12% de las situaciones se corresponden con este patrón en bajas elevaciones, el 5% en medias y el 28% en altas, aumentando para índices altos hasta el 67% en medias elevaciones y al 84% en altas.

Las situaciones de flujo marítimo, al ser las minoritarias, aunque descienden a medida que aumenta el valor del *HI*, como es lógico, la variación es menos notable que en las otras dos situaciones. En altura y bajas elevaciones varían entre el 16% para *HI*=2 y el 6% para *HI*=5. En medias se pasa del 14% al 3%, sin presentarse diferencias entre los valores de *HI*=4 y 5, y en altas se puede observar un ligero ascenso para índices 2 y 3 del 5% al 9%, disminuyendo al 1% para valores altos.

Por último, las situaciones de flujo continental son las que en general sufren un descenso más acusado conforme aumenta el valor del índice. El descenso más notable se aprecia en altas y medias elevaciones entre los valores del índice 5 y 6, disminuyendo estas situaciones en un 24% y en un 39% respectivamente. Con el fin de razonar estos resultados se han aislado la componente de estabilidad y la de sequedad, obteniéndose que solamente el 17% de los días en los que se da un *HI* moderado, el término *A* es máximo, es decir toma el valor 3, con lo que en general predominará la componente de sequedad, que en la CV viene asociada a una circulación con recorrido continental.

Capítulo 4:

**Análisis de nuevas
fuentes de datos para
el cálculo del HI**

La determinación del Índice de Haines (HI) requiere de datos de temperatura y humedad en las capas bajas de la atmósfera, utilizándose normalmente datos de radiosondeo. A nivel nacional se dispone de 9 estaciones de radiosondeo, además de una estación a bordo del barco "Esperanza del Mar", siendo la resolución, principalmente espacial, algo limitada, por lo que pueden quedar zonas, como la de nuestro estudio, fuera del alcance de estas estaciones. La resolución temporal habitual es de 12 horas, a las 00Z y 12Z, aunque se pueden encontrar datos de las 06Z o las 18Z en algunas estaciones.

El objetivo de este apartado de la tesis se centra en el uso de datos procedentes de sondeadores atmosféricos a bordo de diferentes satélites de observación de la Tierra con el ánimo de mejorar la predicción del HI. Los datos analizados se corresponden con los procedentes de las sondas atmosféricas MODIS, AIRS y AMSU, situados a bordo de los satélites EOS Aqua y Terra, en 6 incendios históricos dominados por columna ocurridos en la CV, concretamente en la provincia de Valencia, desde 2005 hasta la actualidad (Quilez, R., 2013). Para ello contamos con el apoyo y la información aportada por el consorcio provincial de bomberos. En concreto, los datos empleados son los productos Level 2 AIRS V6 (AIRX2RET, combinación de datos AIRS y AMSU, y AIRS2RET, únicamente con datos AIRS; ambos a bordo de EOS Aqua) con una resolución espacial de 50 km (Olsen, 2014) y los productos Level 2 MOD07 V5 (de MODIS en la plataforma EOS Terra) y MYD07 (de MODIS en EOS Aqua) de 5km de resolución espacial (Seemann et al., 2006).

La metodología empleada se ha centrado en el análisis para la obtención del HI de cada uno de los anteriores productos en las fechas de los incendios descritos en la siguiente sección.

4.1) Caracterización de los incendios de estudio.

La localización de los incendios analizados se muestra en la siguiente figura obtenida a partir de los datos facilitados por la Dirección General de Prevención, Extinción de Incendios y Emergencias (Centro de Coordinación de Emergencias) de la Consellería de Gobernación y Justicia.

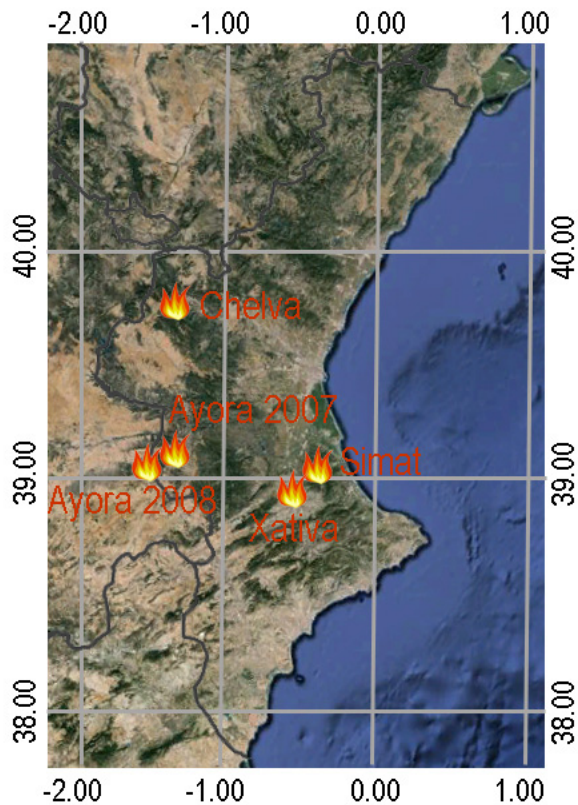


Figura 33 Localización de los incendios a partir de los datos proporcionados por la Consellería de Gobernación y Justicia.

- **Xàtiva 2005-1.** El incendio se dio en el término municipal de Xàtiva, situado en la comarca de la Costanera, concretamente en el paraje de Bixquert. La detección del incendio fue el día 21/06/2005 a las 15:59, pasando a estar controlado el 23/06/2005 a las 23:00 y extinguido 25/06/2005 a las 21:00. La llegada de los primeros

medios por tierra, aéreos y brigadas helitransportadas fue el 21/06/2005 a las 16:30. Las causas del incendio fueron clasificadas como negligencia y otras causas accidentales. Los datos meteorológicos que figuran en el parte del incendio para la estación de Mondúber a las 14:00, son los siguientes: humedad relativa del 34%, 9 días transcurridos desde la última lluvia, temperatura máxima de 31°C, velocidad del viento de 5km/h y dirección del viento de 140°. Los modelos de combustible en la zona del incendio están caracterizados como pastizales y matorrales. El tipo de incendio es fuego de superficie, donde la superficie forestal afectada fue de 43.68 ha de arbolado, principalmente pinus halepensis de aproximadamente 40 años, con un factor de cabida de cubierta (FCC) del 70%. El FCC indica el grado de recubrimiento del suelo por la proyección vertical de las copas de arbolado.



Figura 34 Incendio de Xàtiva 21/06/2005. Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

- **Xàtiva 2005-2.** Incendio ocurrido en el término municipal de Xàtiva, situado en la comarca de la Costanera en el paraje de Bixquert. El incendio se detectó el 22/06/2005 a las 13:35, siendo controlado el 22/06/2005 y extinguido el 25/06/2005 a las 21:25. La llegada de los primeros medios por tierra, aéreos y brigadas helitransportadas fue el 22/06/2005 a las 14:00. La causa del incendio fue un rayo. Los datos

meteorológicos que figuran en el parte del incendio en la estación de Mondúber a las 14:00 eran los siguientes: humedad relativa del 45%, 0 días desde la última lluvia, temperatura máxima de 30°C, velocidad del viento de 5km/h y dirección de 120°. Los modelos de combustible en la zona del incendio son matorrales, siendo clasificado el incendio como fuego de superficie. La superficie forestal afectada fue de 133.11 ha de arbolado, concretamente de pinus halepensis y 266.89 ha de no arbolado, principalmente monte bajo y matorral.



Figura 35 Incendio de Xàtiva 22/06/2005. Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

- **Simat 2005.** El incendio se dio en el término municipal de Simat de la Vallidigna, en la comarca de la Safor. La detección del incendio fue el 12/07/2005 a las 18:17, siendo controlado el mismo día y calificado como extinguido el 15/07/2005 a las 21:00. La llegada de los primeros medios por tierra, aéreos y brigadas helitransportadas fue el 12/07/2005. El incendio fue de causa intencionada. Los datos meteorológicos de la estación de Mondúber a las 18:00 indicaban una humedad relativa del 25%, 2 días desde la última lluvia, una temperatura máxima de 26°C, velocidad del viento de 7km/h y dirección de 200°. Los modelos de combustible en la zona del incendio están caracterizados por pastizales y matorrales. Se consideró un fuego de superficie en el que la superficie forestal afectada fue de 77.52 ha de arbolado, principalmente pinus halepensis de 30 años con FCC=80%,

564.43 ha de no arbolado, principalmente monte bajo y matorral, y finalmente 5.81 ha clasificadas como no forestales.



Figura 36 Incendio de Simat 12/07/2005. Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

- **Ayora 2007.** Incendio localizado en el término municipal de Ayora en la comarca de la Vall d'Ayora, específicamente en el paraje de la Casita del Guarda – Cerro de los Cara. La detección del incendio fue el 30/07/2007 a las 15:05, dándose por controlado 31/07/2007 a las 20:30 y por extinguido el 02/08/2007 a las 18:30. La llegada de los primeros medios por tierra fue el 30/07/2007 a las 15:15, mientras que los aéreos y las brigadas helitransportadas llegaron el mismo día a las 15:45. La causa del incendio fue clasificada como intencionada, provocado por pastores y ganaderos para regenerar el pasto. Los datos meteorológicos que figuran en el parte oficial del incendio son los de la estación de Caroché a las 19:00 siendo estos: humedad relativa del 25%, 55 días desde la última lluvia, temperatura máxima de 31°C, velocidad del viento de 8km/h y dirección de 270°. Los modelos de combustible en la zona del incendio se identifican como bosques y el fuego fue clasificado como de superficie y copas. La superficie forestal afectada fue de 92.94 ha arbolada, principalmente de pinus halepensis y 1.24 ha de no arbolada, principalmente monte bajo y matorral.



Figura 37 Incendio de Ayora 30/07/2007. Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

- **Ayora 2008.** Incendio acaecido en el término municipal de Ayora, situado en la comarca de la Vall d'Ayora en el paraje Tres Cortes y Hontanar. La detección del incendio se dio el 15/08/2008 a las 15:46, fue controlado el 16/08/2008 20:00, y extinguido 16/08/2008 a las 21:10. La llegada de los primeros medios por tierra fue el 15/08/2008 a las 16:15, los aéreos a las 16:25 y las brigadas helitransportadas a las 16:30.



Figura 38 Incendio de Ayora 15/08/2008. Fuente: izquierda MAGRAMA (Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente), derecha UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

Las causas del incendio se clasificaron como negligencias y causas accidentales (hogueras). Los datos meteorológicos de la estación de Caroché a las 14:00 eran: humedad relativa de 23%, 1 día desde la

última lluvia, temperatura máxima de 20°C, velocidad y dirección del viento de 25km/h y 350°. Los modelos de combustible en la zona del incendio son matorrales y bosques y el fuego de superficie y copas. La superficie forestal afectada fue de 76 ha de arbolado, pinus halepensis entre 15 y 50 años (50 ha) FCC=45% y quercus ilex de 30 años (26 ha) FCC=20%, y 1ha no forestal (agrícolas, urbanizadas).

- **Chelva 2012.** Situado en el término municipal de Chelva, en la comarca de Els Serrans, paraje Bercuta. La detección del incendio fue el 01/06/2012 a las 14:47, estando controlado el 04/06/2012 a las 21:00 y extinguido el 10/06/2012 a las 20:12. La llegada de los primeros medios por tierra fue el 01/06/2012 a las 15:15, los aéreos a las 15:06 y las brigadas helitransportadas a las 17:30. El incendio fue intencionado.



Figura 39: Incendio de Chelva 01/06/2012. Fuente: UBE (Unidad de Brigadas de Emergencia de la Generalitat Valenciana).

Los datos meteorológicos de la estación del Pico del Remedio a las 15:20 eran: humedad relativa del 24%, 18 días desde la última lluvia, temperatura máxima de 29°C, velocidad y dirección del viento de 12km/h y 120°. Los modelos de combustible en la zona del incendio son pastizales, matorrales, bosques y restos y el fuego fue clasificado como de superficie, copas y subsuelo. La superficie forestal afectada fue de

672.30 ha arboladas, pinus halepensis entre 15 y 50 años (50 ha) FCC=45% y quercus ilex de 30 años (26 ha) FCC=20%, 29.99 ha no arboladas y 7.78 ha no forestales (agrícolas, urbanizadas).

Según el Consorcio Provincial de Bomberos en los incendios en los que la velocidad del viento es mayor a 30km/h se considera que estos están dominados por viento. En los partes oficiales de los incendios, como se puede observar en la descripción de cada uno de ellos, figuran las velocidades del viento de las estaciones meteorológicas más cercanas a una hora determinada. No obstante, se ha realizado un estudio más detallado de la velocidad del viento en cada incendio analizado a partir de los datos más próximos de la red de estaciones meteorológicas de la Fundación Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo (CEAM) (<http://www.ceam.es/ceamet>). Teniendo en cuenta la velocidad del viento desde la fecha de inicio del incendio hasta su finalización, se ha comprobado que en ningún momento los valores superen los 30 km/h (Figuras 40-44). La Tabla 7 muestra la velocidad máxima, mínima y promedio para el día de la ignición de cada incendio.

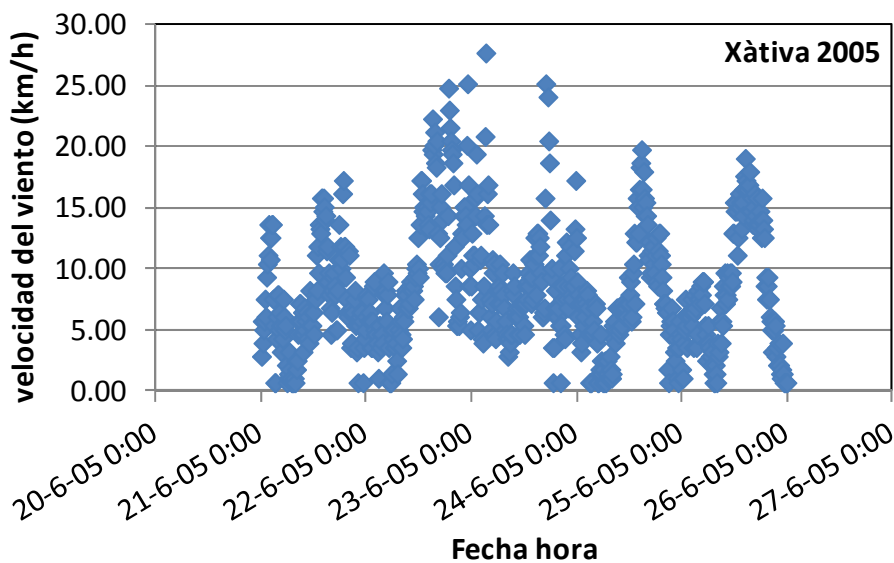


Figura 40 Velocidad del viento en km/h desde el inicio hasta la extinción del incendio de Xàtiva de 2005.

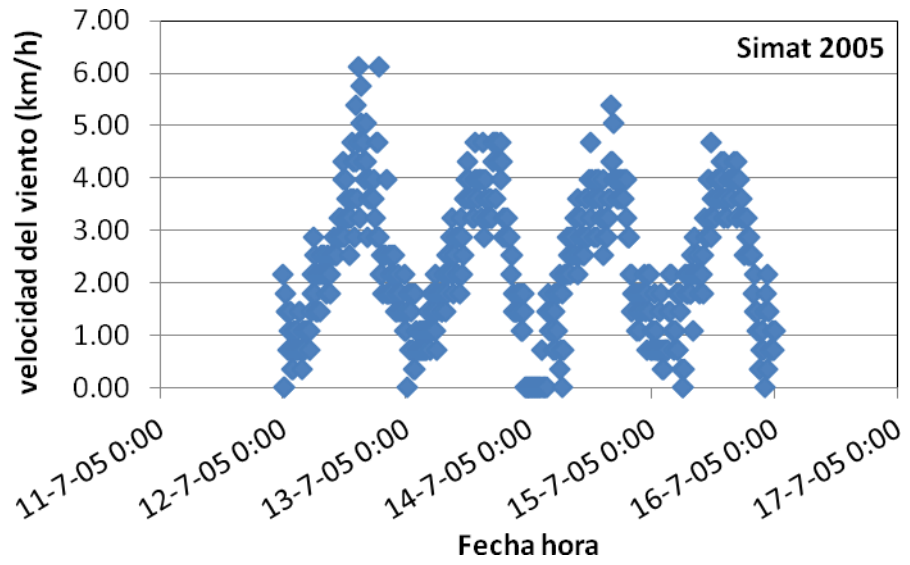


Figura 41 Velocidad del viento en km/h desde el inicio hasta la extinción del incendio de Simat de 2005.

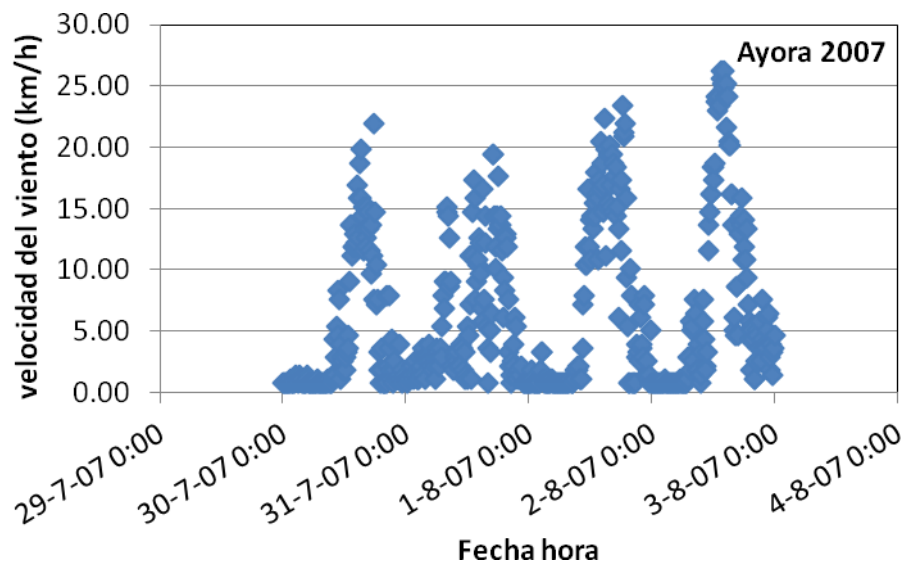


Figura 42 Velocidad del viento en km/h desde el inicio hasta la extinción del incendio de Ayora de 2007.

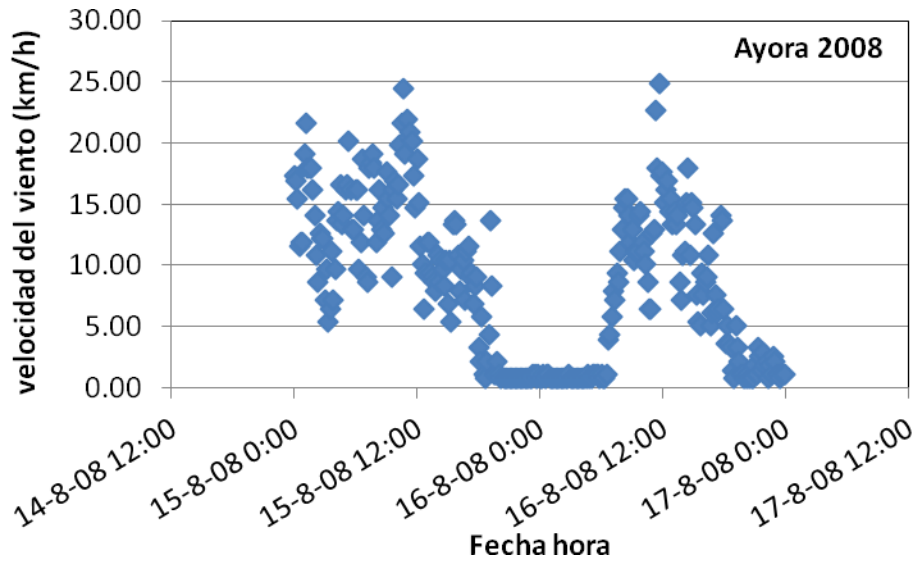


Figura 43 Velocidad del viento en km/h desde el inicio hasta la extinción del incendio de Ayora de 2008.

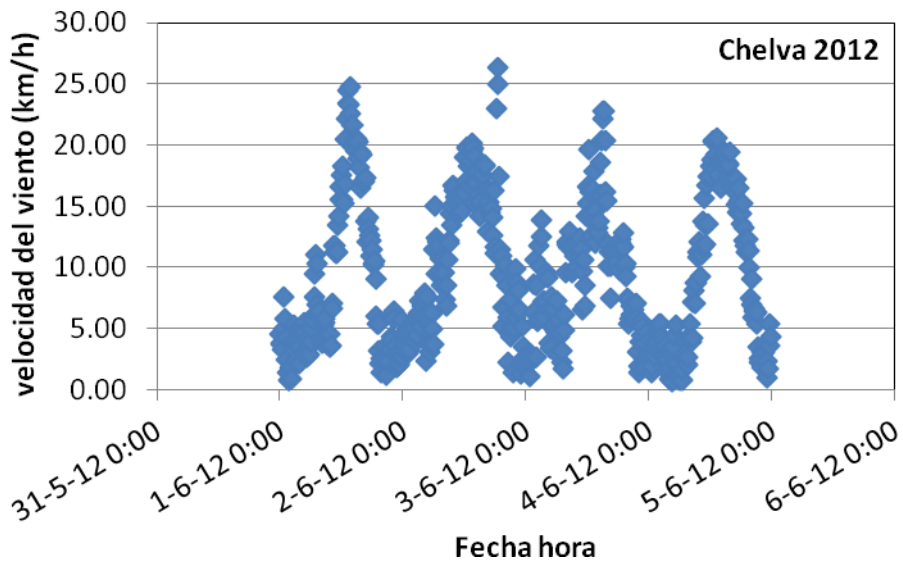


Figura 44 Velocidad del viento en km/h desde el inicio hasta la extinción del incendio de Chelva de 2012.

Tabla 7 Análisis de la velocidad del viento para el día de generación de los incendios analizados.

Incendio	Estación	V máx. (km/h)	V mín. (km/h)	V media(km/h)
Xàtiva_1	Xàtiva	17.28	0.72	7.09
Xàtiva_2	Xàtiva	25.20	0.72	10.15
Simat	Xàtiva	6.12	0	2.46
Ayora_2007	Ayora	21.96	0.72	4.37
Ayora_2008	Ayora	24.48	0.72	10.48
Chelva	Villar	24.73	0.72	8.43

4.2) Metodología.

4.2.1 Sondeadores atmosféricos.

Los datos utilizados en esta sección se corresponden con los procedentes de los sondeadores atmosféricos descritos a continuación.

4.2.1.a Atmospheric Infrared Sounder (AIRS).

El instrumento AIRS fue puesto en órbita el 4 de mayo 2002 a bordo del satélite EOS Aqua de la NASA con el fin de mejorar nuestra comprensión de la previsión meteorológica y del clima en la Tierra. AIRS es uno de los seis instrumentos a bordo del dicho satélite (Figura 45), que a su vez es parte de una constelación de satélites que componen el Sistema de Observación de la Tierra "A-Train" de la NASA. Esta constelación está formada por un conjunto de satélites helio-síncronos en la órbita baja de la Tierra diseñados para realizar observaciones globales a largo plazo de la superficie terrestre, la biosfera, la litosfera, la atmósfera y los océanos. AIRS, junto con el instrumento de microondas AMSU-A (Advanced Microwave Sounding Unit), representa el sistema de sondeo atmosférico más avanzado jamás desplegado en el espacio. En conjunto, estos instrumentos observan los ciclos hídricos y energéticos globales, la variación del clima y las tendencias, y la respuesta del

sistema climático a un aumento de los gases de efecto invernadero. (<http://airs.jpl.nasa.gov/>).

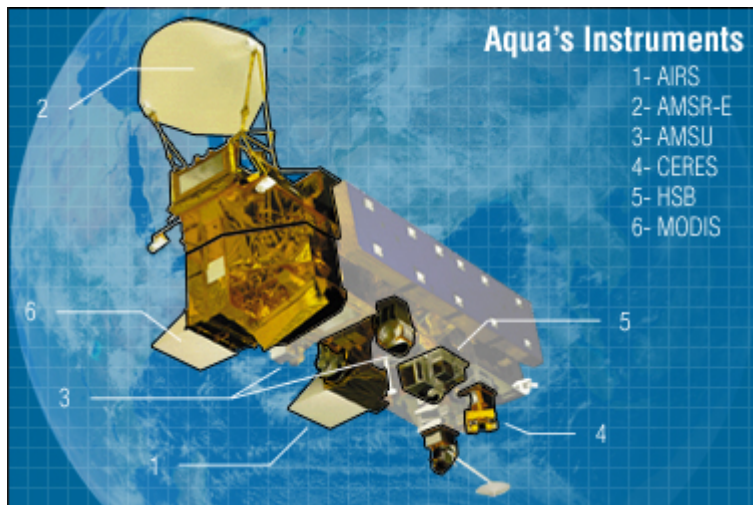


Figura 45 Instrumentos a bordo del satélite EOS Aqua.

AIRS utiliza una innovadora tecnología de infrarrojos para crear mapas tridimensionales de temperatura del aire y de la superficie, vapor de agua y propiedades de las nubes. Con 2378 canales espectrales, tiene una resolución espectral más de 100 veces mayor que los sondeadores infrarrojos anteriores y proporciona información más precisa sobre los perfiles verticales de temperatura atmosférica y humedad. AIRS también puede medir gases traza, gases como el ozono, monóxido de carbono, dióxido de carbono y metano.

El Joint Center for Satellite Data Assimilation, creado para acelerar la asimilación de las observaciones por satélite en el funcionamiento de los modelos de previsión meteorológica, anunció que con la asimilación de datos AIRS se ha logrado una mejora significativa en el pronóstico. Cuando se compara con la tasa de mejora del pronóstico en los últimos diez años, las mejoras introducidas en la capacidad de previsión global en un tiempo relativamente corto son muy significativas, ya que una mejora de 6 horas en el pronóstico de seis días normalmente tarda varios años en alcanzarse (http://airs.jpl.nasa.gov/mission_and_instrument/mission).

Los productos de perfiles atmosféricos de AIRS utilizados en este capítulo son, como se ha comentado, los correspondientes al Level 2 AIRS V6 (AIRX2RET, combinación de datos AIRS y AMSU, y AIRS2RET, únicamente con datos AIRS; ambos a bordo de EOS Aqua) con una resolución espacial de 50 km (Olsen, 2014). Los perfiles de temperatura comprenden 28 niveles atmosféricos (1100, 1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50, 30, 20, 15, 10, 7, 5, 3, 2, 1.5, 1, 0.5, 0.2, 0.1 hPa), mientras que los de humedad se producen para los 15 primeros niveles atmosféricos citados anteriormente.

4.2.1.b Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS).

El instrumento MODIS (Figura 46) se encuentra a bordo de los satélites EOS Terra y Aqua, lanzados el 18 de diciembre de 1999 y el 4 de mayo de 2002, respectivamente. Los satélites Terra y Aqua tienen un periodo de revisita de 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales. Estos datos permiten mejorar nuestra comprensión de la dinámica global y los procesos que ocurren en la tierra, en los océanos y en la baja atmósfera. MODIS está jugando un papel importante en el desarrollo de modelos globales validados, capaces de predecir el cambio global con precisión suficiente para ayudar a los responsables políticos en la toma de decisiones acertadas en relación con la protección de nuestro medio ambiente. Estos instrumentos MODIS ofrecen una visión sin precedentes de los fenómenos terrestres, atmosféricos, y oceánicos para una amplia y diversa comunidad de usuarios en todo el mundo. Así, existe una gran cantidad de productos y datos disponibles procedentes de ambas plataformas (<http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>). En concreto, el producto MODIS utilizado en este capítulo, tal cual se ha mencionado, proporciona datos atmosféricos de varios parámetros: carga total de la capa de ozono, estabilidad atmosférica, perfiles de temperatura y de humedad, y vapor de agua total en la

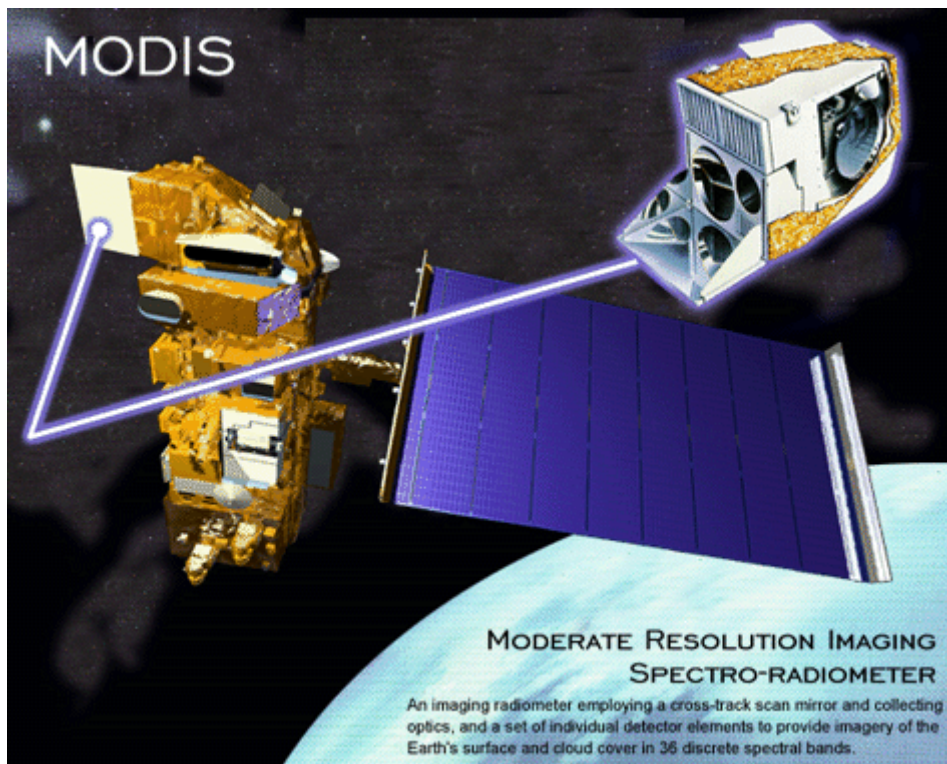


Figura 46 Instrumento MODIS a bordo del satélite Terra de la NASA (Fuente: http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast21aug_1/)

atmósfera (http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/MOD07_L2/). Todos estos parámetros se producen en un nivel 2 a partir de las órbitas nocturnas y diurnas a una resolución de 5x5 1-km píxeles cuando al menos 9 IFOVs están libres de nubes. Hay dos nomenclaturas para los archivos de datos del producto de perfil atmosférico MODIS: MOD07_L2, que contiene los datos recogidos de la plataforma Terra; y MYD07_L2, que contienen los de la plataforma Aqua. La carga total de la capa de ozono es una estimación del contenido total de ozono contenido en la columna troposférica y estratosférica. La estabilidad atmosférica consta de tres índices de estabilidad atmosférica diarios. El Total Totals (TT), el Lifted Index (LI), y el índice K (K) se calculan usando los perfiles de datos de temperatura infrarroja y humedad, también derivados como parte de dichos productos. Los perfiles de temperatura y humedad proporcionan 20 niveles verticales (05, 10, 20, 30, 50, 70, 100, 150,

200, 250, 300, 400, 500, 620, 700, 780, 850, 920, 950, 1000 hPa). El vapor de agua total es una estimación de la columna de vapor de agua atmosférico. Los perfiles de temperatura y humedad se obtienen mediante algoritmos adaptados de los propuestos para el TIROS Operational Vertical Sounder (TOVS) a bordo de NOAA, Processing Package (ITPP), teniendo en cuenta la falta de canales estratosféricos y la mayor resolución horizontal de MODIS. Estos algoritmos utilizan las bandas espectrales 25, 27-29, y 30-36 de MODIS. La máscara de nubes MODIS (MOD35_L2 o MYD35_L2) se utiliza para la detección de nubes.

Los datos de temperatura atmosférica y humedad de alta resolución espacial de MODIS y de alta resolución espectral de AIRS proporcionan gran cantidad de información de la estructura atmosférica en cielos despejados. Los perfiles se utilizarán para corregir los efectos atmosféricos de algunos de los productos MODIS (por ejemplo, la temperatura de la superficie del mar y de la superficie de la tierra, las propiedades de los aerosoles del océano, las radiancias libres de agua, etc.), así como para caracterizar la atmósfera en estudios globales sobre el efecto invernadero.

4.2.2 Procesado de las imágenes y extracción de la información.

Con el objetivo de calcular el HI a partir de los datos ofrecidos por los citados sondeadores atmosféricos a bordo de satélite se seleccionan los pases de estos correspondientes al día de inicio de cada uno de los incendios descritos en la sección 4.1, así como al día anterior y posterior, contando normalmente con 4 imágenes diarias de MODIS (2 de MOD07_L2 y 2 de MYD07_L2) y 4 de AIRS (2 de AIRS-AMSU, producto AIRX2RET, y 2 de AIRS-only, producto AIRS2RET). Estas dos imágenes de cada uno de los productos se corresponden con la órbita ascendente y descendente de los satélites. Cabe indicar además, que los dos incendios de Xàtiva se tratan como un único incendio ya que las fechas son correlativas (21 y 22 de Junio) y el perímetro de

los incendios muestra cierta continuidad, pudiéndose considerar como un único incendio, que a partir de ahora llamaremos Xàtiva 2005.

Cada uno de los productos se georreferenció utilizando las bandas de latitud y longitud incluidas en ellos y sus correspondientes proyecciones. Asimismo, se extrajeron las bandas de temperatura y humedad relativa en el caso de AIRS2RET y AIRX2RET, y temperatura y temperatura de rocío en el de MOD07_L2 y MYD07_L2, para los niveles atmosféricos que se corresponden con los niveles de presión necesarios en el cálculo del HI (Tabla 6). Para el caso de los dos productos de AIRS, se calculó la temperatura de rocío a partir de la humedad relativa (Lawrence, 2005). Con esto, se procesaron los datos para obtener tanto el HI como los términos A y B, haciendo uso del lenguaje programación IDL (Interactive Data Language). Para cada imagen, se obtuvieron dos imágenes de los términos A y B (tanto en grados como utilizando el rango de 1 a 3) y una del HI para cada variante del índice. Con ello se generaron mapas extensos del HI haciendo uso del software libre gvSIG. Estos mapas pueden ser de gran utilidad en la previsión de incendios forestales dominados por columna (ver Figuras 50-68 a modo de ejemplo). Además, haciendo uso de los perímetros de los incendios forestales, se seleccionaron los píxeles que cubren estos perímetros en las diferentes imágenes generadas, extrayéndose así los valores concretos obtenidos para cada evento mediante el software BEAM VISAT de la ESA (<http://www.brockmann-consult.de/cms/web/beam/>). Concretamente, se extrajeron los datos para las coordenadas centradas en los perímetros, es decir 1x1 píxel, y para 3x3 píxeles, y se realizaron las estadísticas y cálculos correspondientes considerando la/s variante/s del HI más adecuadas para las elevaciones de las áreas afectadas por cada incendio. La Tabla 8 muestra las elevaciones correspondientes a las zonas afectadas por cada uno de los incendios descritos en la sección anterior. Estas elevaciones se obtuvieron haciendo uso de los perímetros de los incendios y un modelo digital del terreno de la CV a 50 m de resolución.

Antes de presentar los resultados obtenidos, en la sección siguiente se realiza un análisis comparativo de los términos A y B resultantes del uso de todos estos productos de satélite frente a los valores obtenidos con datos NCEP, contrastados con valores resultantes de radiosondeo.

Tabla 8 Elevaciones de los incendios calculadas a partir de los perímetros de los incendios y del modelo digital del terreno.

Fecha	Incendio	Altitud (m)	Variante del HI
21/06/2005	Xàtiva	152.1 – 418.5	Bajas -Medias
22/06/2005	Xàtiva	176.1 – 492.1	Bajas -Medias
12/07/2005	Simat	096.6 – 600.3	Bajas -Medias
30/07/2007	Ayora	687.8 – 803.1	Medias
15/08/2008	Ayora	959.9 – 1118.4	Altas
01/06/2012	Chelva	430.6 – 940.0	Medias - Altas

4.2.3 Comparación de diferentes fuentes de datos en la estimación del HI.

En esta sección comparamos los resultados obtenidos para los términos A y B (en grados), calculados para todas las variantes del índice, mediante los diferentes productos MYD07, AIRS-AMSU y AIRS-only en función de los obtenidos con datos NCEP, que se contrastan con los valores resultantes de los radiosondeos lanzados en Murcia a las 00Z. Se utilizan los datos nocturnos de dichos productos de la plataforma Aqua, y los datos NCEP y de radiosondeo de las 00Z, evitando así desfases temporales importantes. Además, se analizan los datos correspondientes tanto al día de inicio de cada incendio como al anterior y al posterior.

Los datos de radiosondeo se han descargado de la web de la Universidad de Wyoming (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>)

para las mismas fechas que el resto de productos, seleccionando la estación de Murcia por ser la más cercana y de características más similares a la zona de estudio.

La Figura 47 compara los valores para los términos A y B obtenidos a partir de los datos NCEP y los del radiosondeo de Murcia, donde se muestra un buen acuerdo teniendo presente la diferencia espacial de los datos y de localización. Aun así, se observa más dispersión de datos para el término B, además de una sobreestimación del término calculado con los datos NCEP respecto de este obtenido a partir de los datos del radiosondeo de Murcia, que podría ser debida a la diferencia de localización espacial.

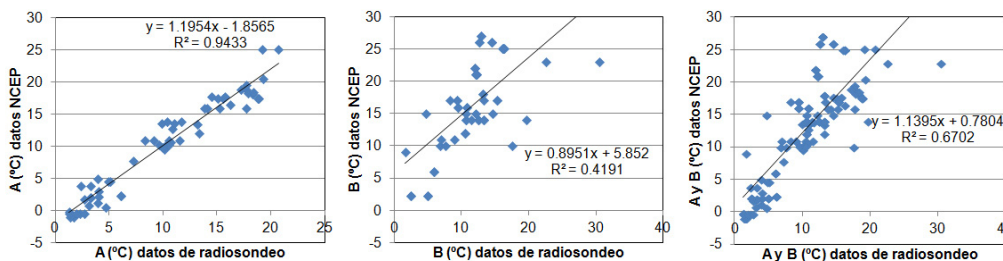


Figura 47 Comparación de los términos A y B en °C entre los datos de NCEP y radiosondeo.

La Figura 48 presenta los valores obtenidos para los términos A y B a partir de los productos de los sondeadores en satélite en función de los resultantes de los perfiles NCEP.

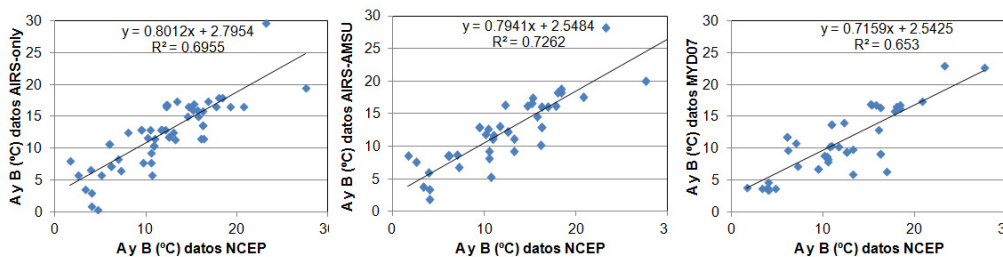


Figura 48 Comparación de los términos A y B en °C entre los sondeadores y los datos NCEP.

Esta figura muestra buenas correlaciones entre los distintos tipos de datos, si tenemos en cuenta las diferentes resoluciones espaciales de los datos comparados (5 km para MYD07, 50 km para AIRS, 2.5° para NCEP), siendo los resultados de AIRS-AMSU los que muestran una ligera mejor correlación con los de NCEP. La mayor correlación se observa cuando comparamos el término A de forma independiente, con coeficientes de determinación (R^2) superiores a 0.87 en todos los casos. Las diferencias promedio obtenidas entre los términos calculados utilizando cada uno de estos productos y usando datos NCEP son de -0.9 para MYD07, +0.4 para AIRS-AMSU y +0.5 para AIRS-only, por lo que no se deducen desviaciones sistemáticas relevantes entre las diferentes fuentes de datos.

Si se comparan directamente los términos A y B (en °C) obtenidos con los diferentes productos de satélite para todas las elevaciones se obtiene la Figura 49. Tal cual se deducía de la Figura 48, la Figura 49 muestra un buen acuerdo entre los datos de los diferentes sondeadores, principalmente en el caso de los productos AIRS-only y AIRS-AMSU por disponer de una fuente común y la misma resolución espacial. De nuevo, se obtienen en general mejores correlaciones para el término A, con valores de R^2 superiores a 0.89 en todos los casos. La comparación de los resultados de MODIS y AIRS muestra mayor dispersión que en el caso de los productos AIRS-only y AIRS-AMSU, que podría explicarse por la diferencia de resolución espacial de los datos. Además, se muestra como los términos A y B obtenidos con AIRS sobreestiman en general los obtenidos utilizando el producto MODIS con una diferencia promedio o desviación sistemática de +0.6 para la diferencia entre AIRS-AMSU y MYD07 y de +0.8 para la diferencia entre AIRS-only y MYD07, lo que podría suponer cierta sobreestimación en términos del HI. Sin embargo, la diferencia promedio entre AIRS-AMSU y AIRS-only es solamente de +0.2. En cualquier caso, ante el buen acuerdo general entre las fuentes de datos analizadas, salvando las diferencias, y considerando la diferencia en sus resoluciones espaciales, el producto MODIS podría considerarse, en principio,

más adecuado para generar mapas de HI a escala regional debido a su resolución espacial nominal de 5 km.

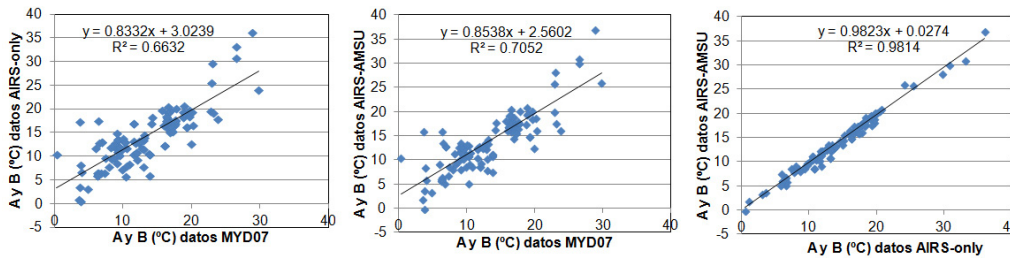


Figura 49 Comparación de A y B en °C para los diferentes productos.

4.3) Resultados.

En esta sección mostramos, en primer lugar, los mapas de los términos A y B y del HI generados a partir de los datos obtenidos con los productos de los sondeadores atmosféricos citados, y en segundo lugar, los resultados estadísticos para los perímetros y fechas de los incendios forestales descritos en la sección 4.1.

4.3.1 Mapas de previsión obtenidos mediante los datos de los sondeadores atmosféricos.

Las figuras siguientes (50 a 68) muestran, como ejemplo, algunos de los mapas obtenidos para los términos A y B (en °C) y del HI para AIRS-only y AIRS-AMSU en las fechas de los incendios. Vemos que, tal y como se deduce en el apartado de comparación de las diferentes fuentes de datos, los resultados obtenidos para AIRS-only y AIRS-AMSU aunque no sean idénticos, son bastante similares. También se puede observar el nivel de detalle asociado a su resolución, mayor que el proporcionado por los perfiles NCEP (ver Figura 13). Con el fin de visualizar con más detalle la variabilidad regional proporcionada por la resolución espacial de los datos AIRS, estas figuras

muestran un corte para la Península Ibérica de los mapas generados a partir de las imágenes adquiridas por dichos satélites. La Figura 50 muestra, a modo de ejemplo, la cobertura total del mapa de HI generado para una de las fechas de incendio a partir del producto AIRS-only. El AIRS dispone de una anchura de barrido (*swath*) de 1650 km, siendo de 2330 km en el caso del MODIS en EOS-Aqua.

Las Figuras 63 a 68 muestran algunos ejemplos de los mapas generados para los términos A y B (en °C) y HI a partir de los productos MOD/MYD07. Dada la mayor resolución espacial de las imágenes MODIS, en este caso centramos el corte para la CV con el fin de apreciar mejor la variabilidad espacial proporcionada por este satélite para la región de estudio.

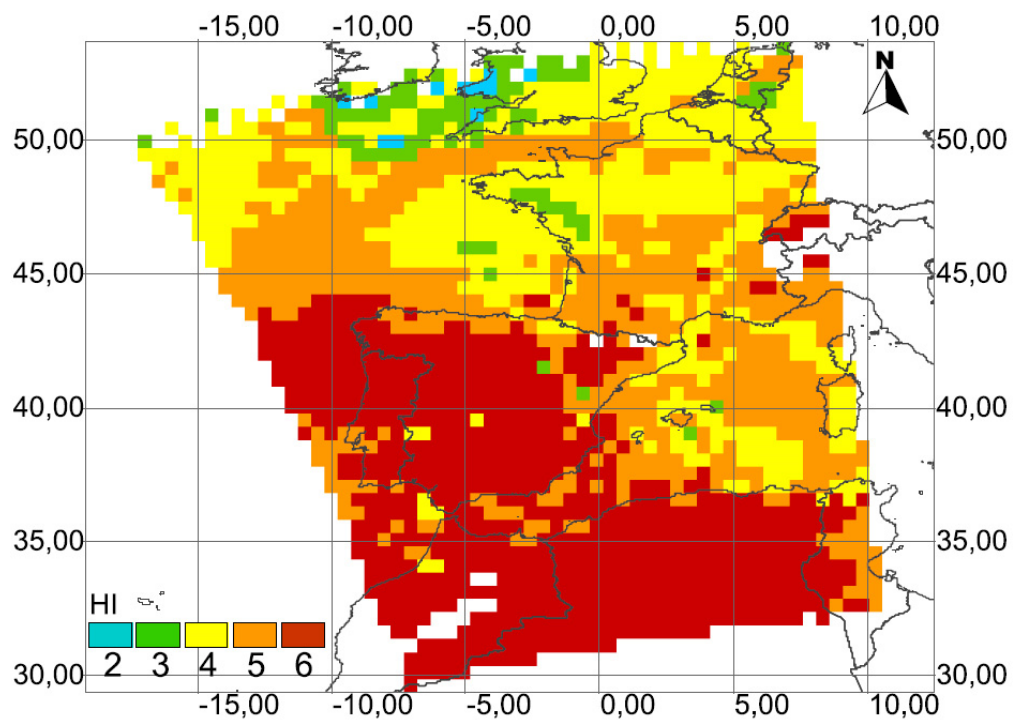


Figura 50 HI calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 22/06/2005 a las 13:05.

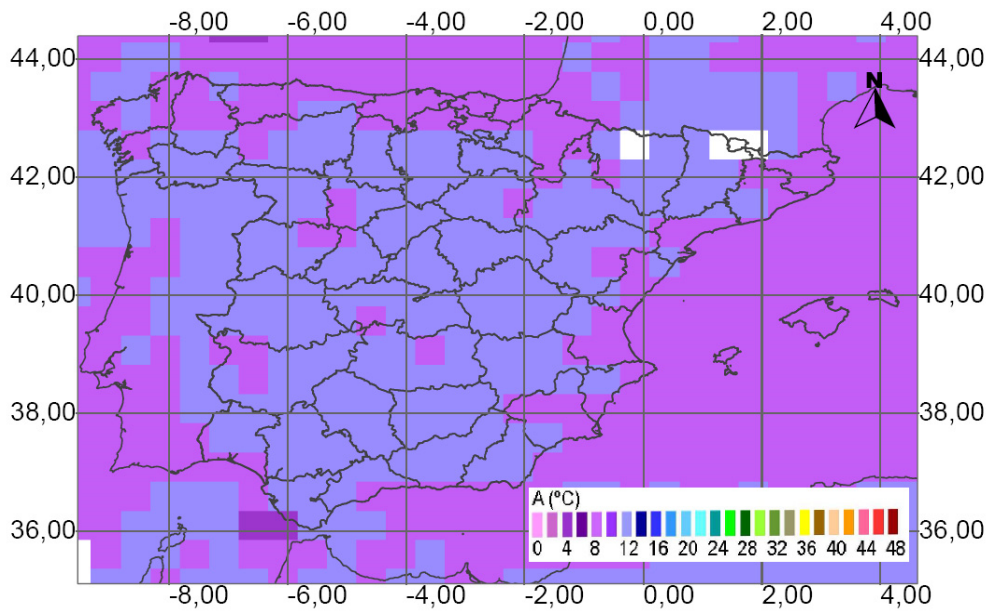


Figura 51 Término A en °C calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 22/06/2005 a las 13:05.

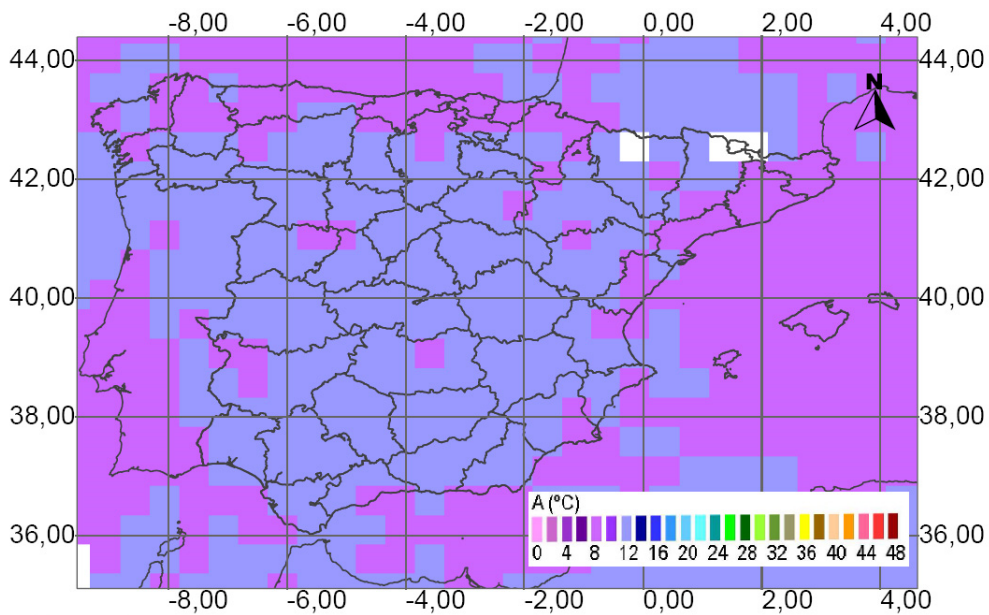


Figura 52 Término A en °C calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 22/06/2005 a las 13:05.

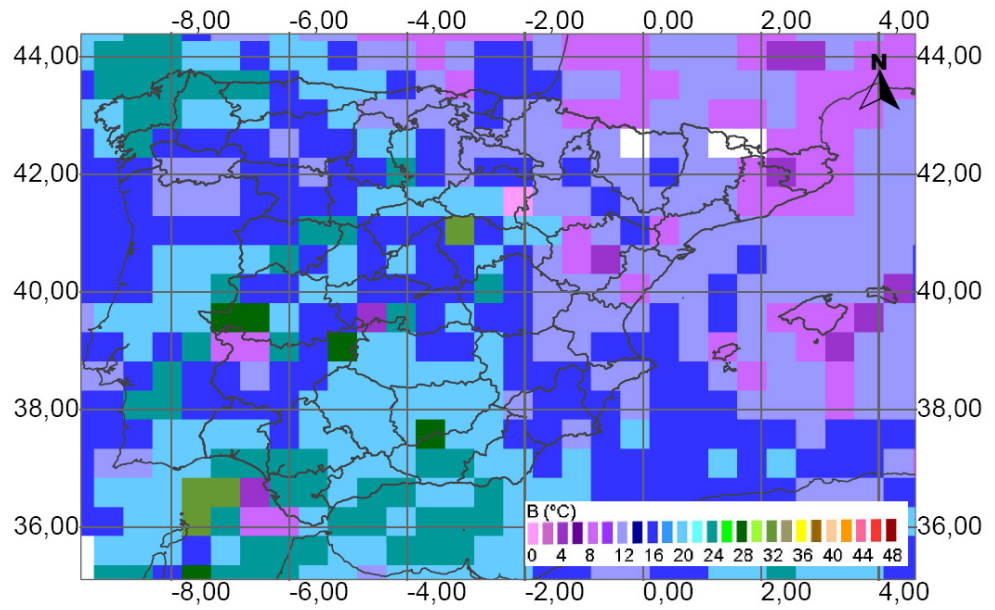


Figura 53 Término B en °C calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 22/06/2005 a las 13:05.

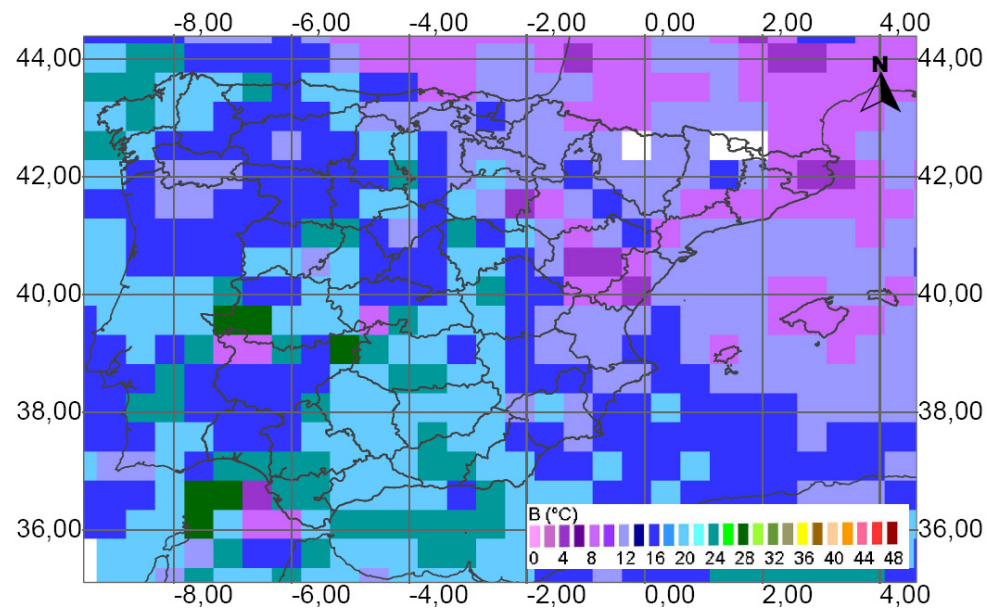


Figura 54 Término B en °C calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 22/06/2005 a las 13:05.

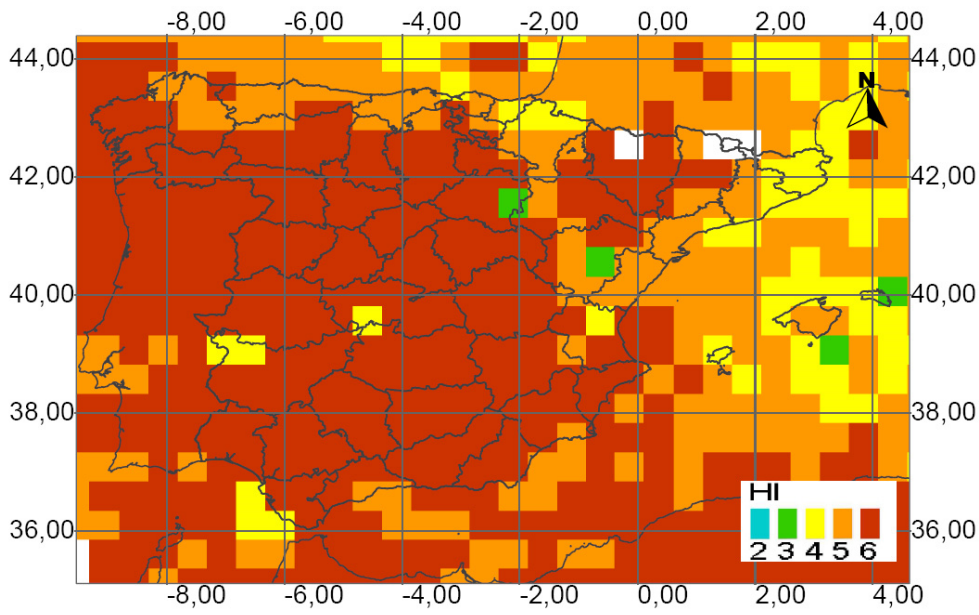


Figura 55 HI calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 22/06/2005 a las 13:05.

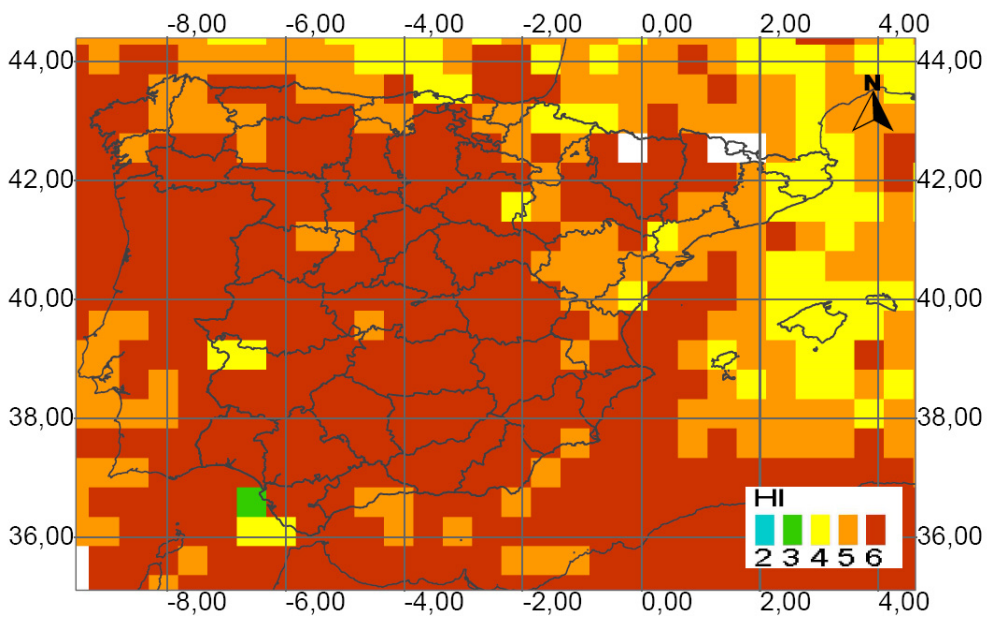


Figura 56 HI calculado en medias elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 22/06/2005 a las 13:05.

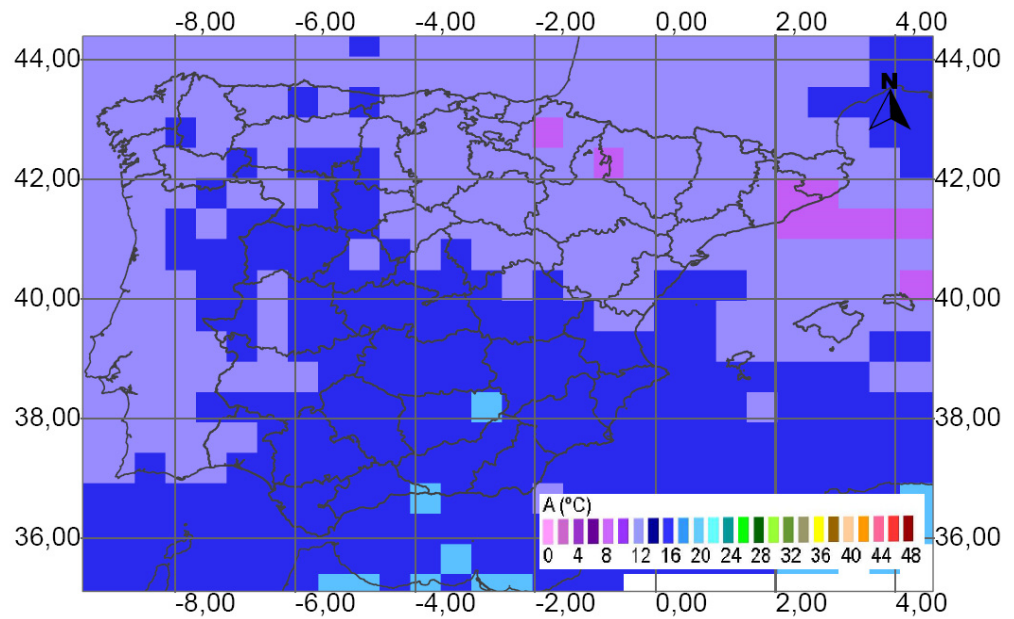


Figura 57 Término A en °C calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 15/08/2008 a las 13:20.

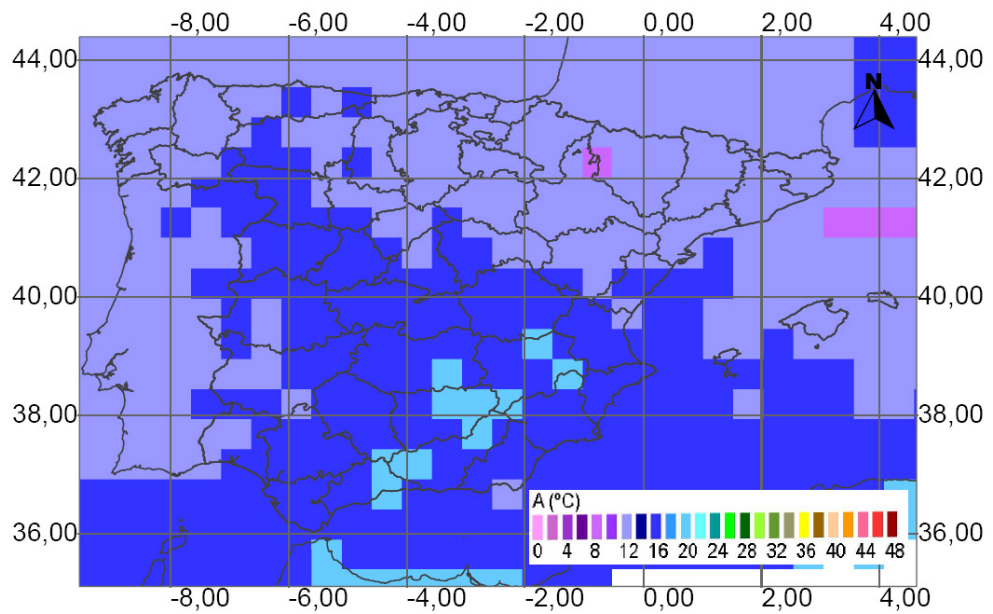


Figura 58 Término A en °C calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 15/08/2008 a las 13:20.

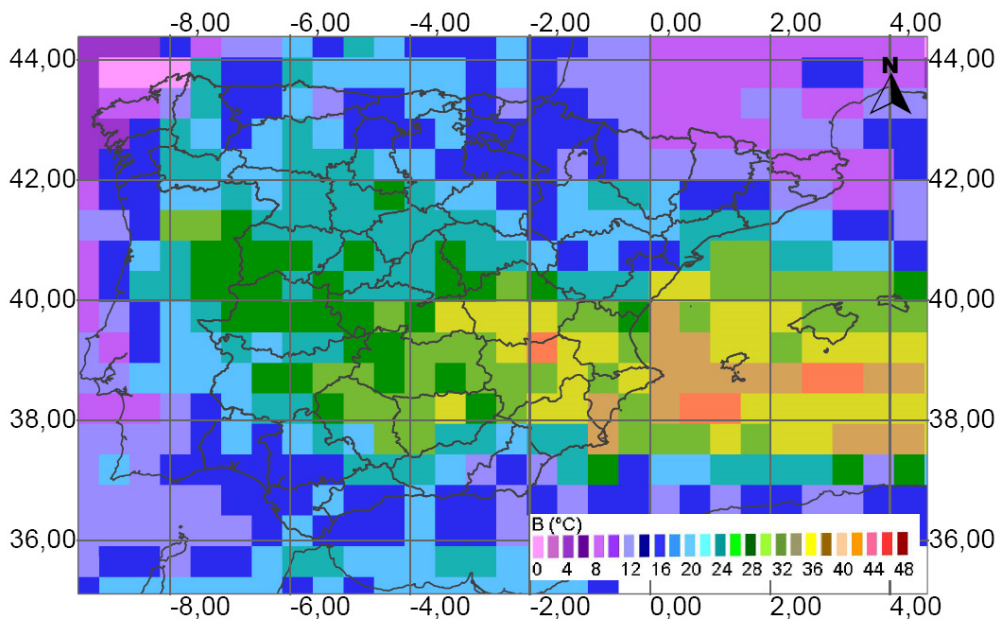


Figura 59 Término B en °C calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 15/08/2008 a las 13:20.

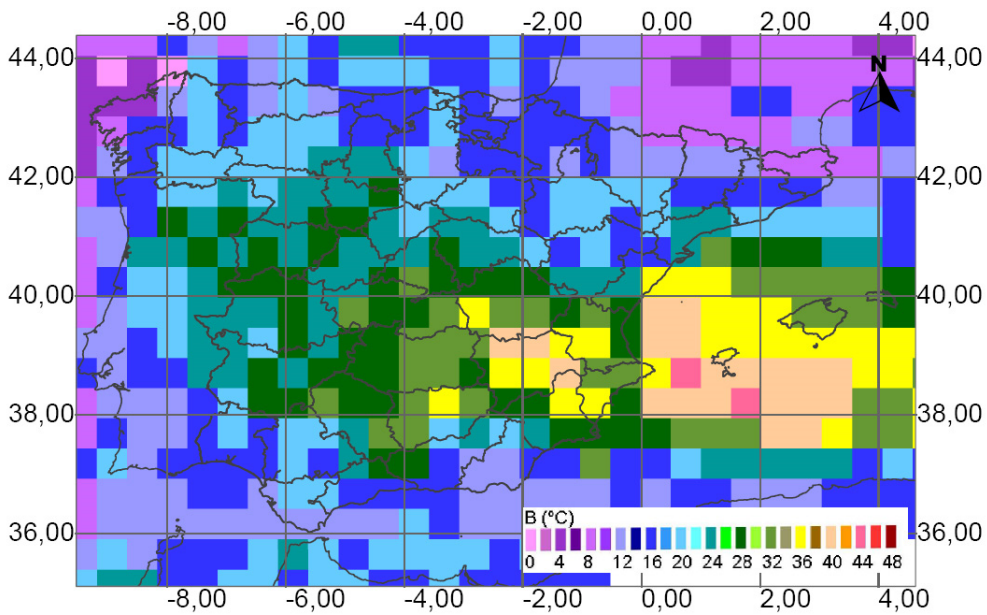


Figura 60 Término B en °C calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 15/08/2008 a las 13:20.

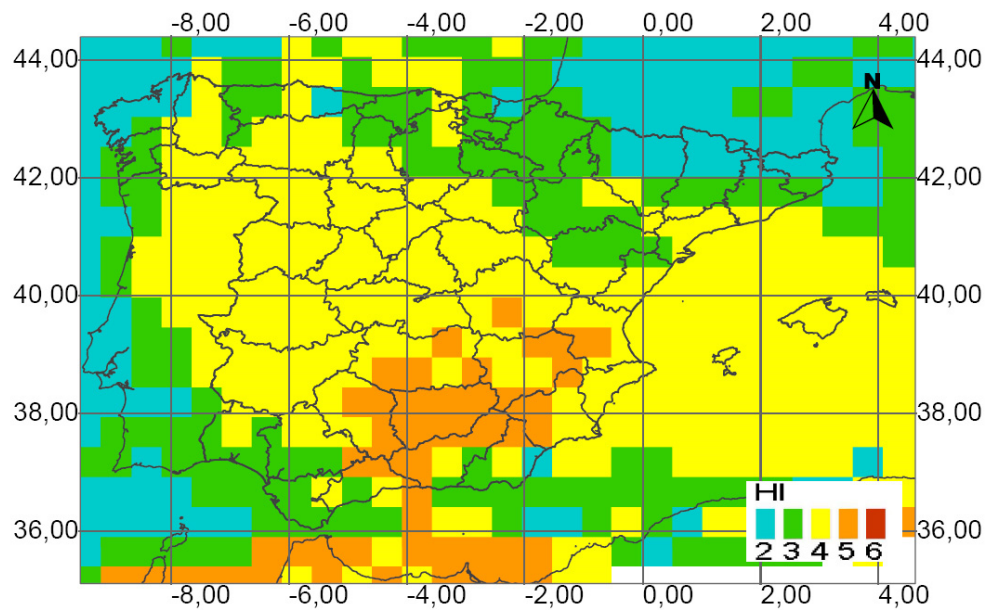


Figura 61 HI calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-only el día 15/08/2008 a las 13:20.

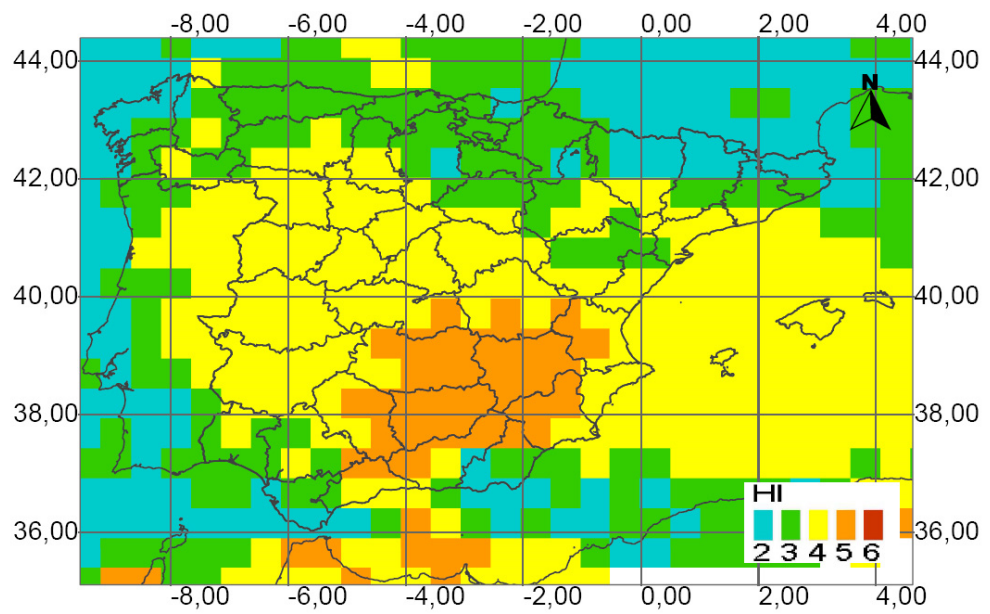


Figura 62 HI calculado en altas elevaciones a partir de los datos AIRS-AMSU el día 15/08/2008 a las 13:20.

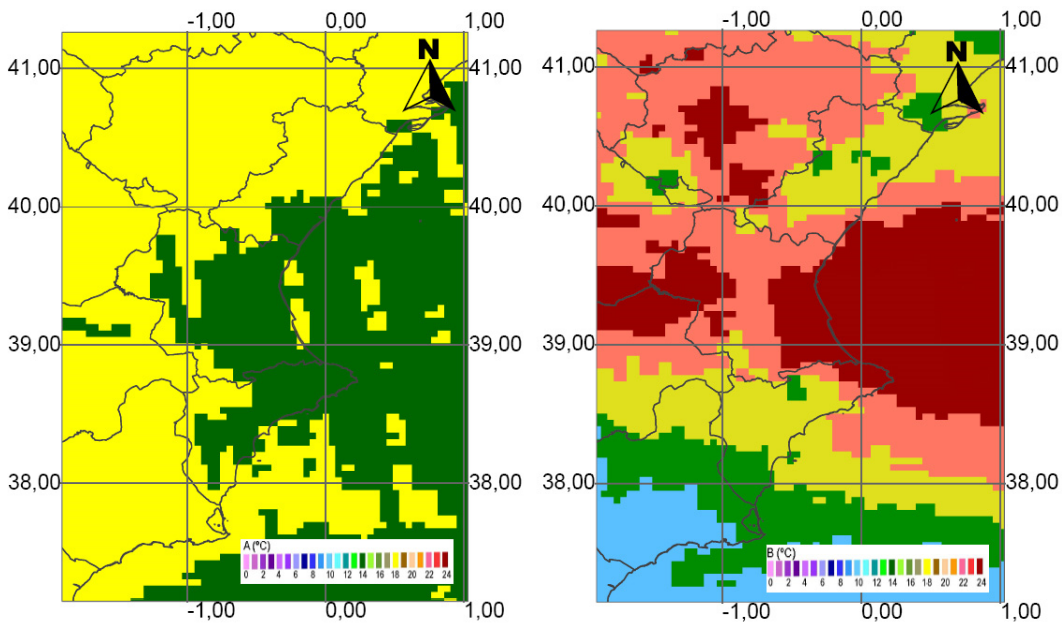


Figura 63 Término A (izquierda) y B (derecha) en °C calculado en medias elevaciones a partir de los datos MYD07 el día 11/07/2005 a las 13:35. Nota: la paleta de colores utilizada no es la misma que en las figuras AIRS.

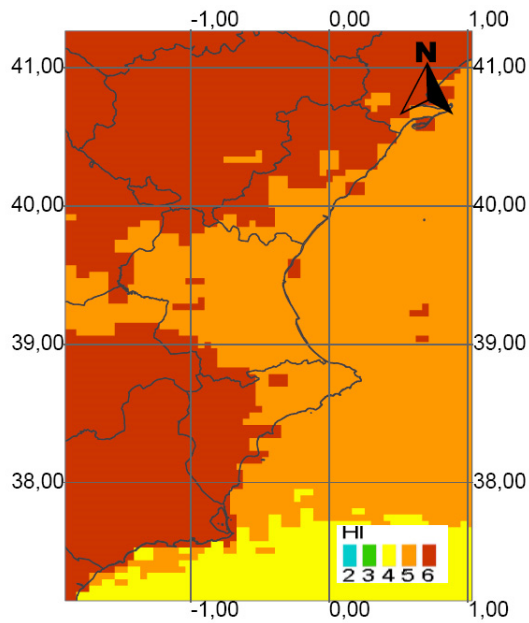


Figura 64 HI calculado en medias elevaciones a partir de los datos MYD07 el día 11/07/2005 a las 13:35.

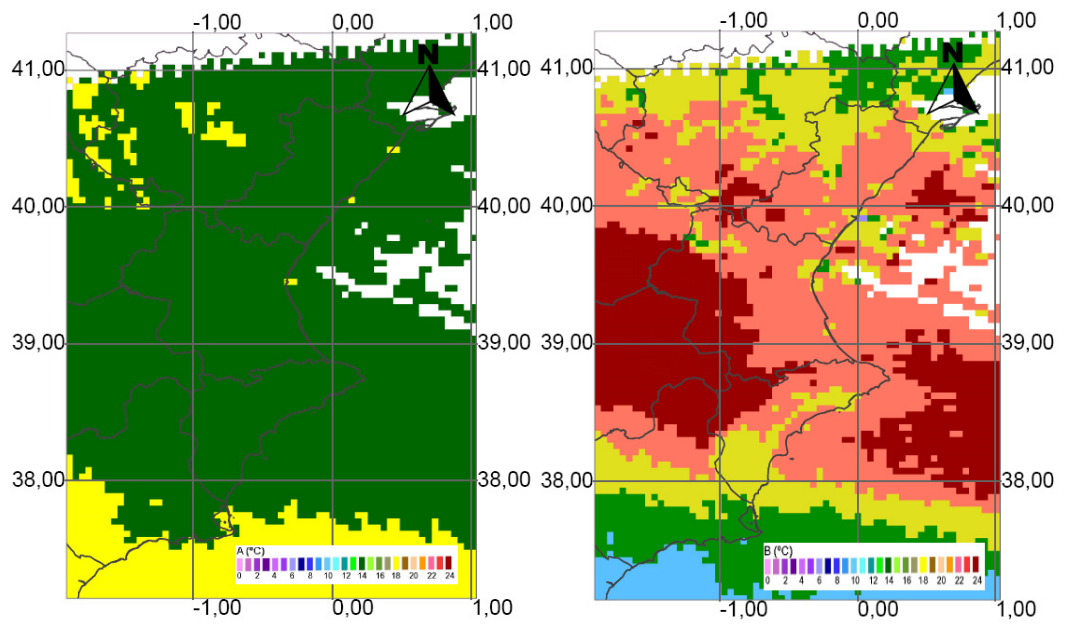


Figura 65 Término A (izquierda) y B (derecha) en °C calculado en altas elevaciones a partir de los datos MYD07 el día 15/08/2008 a las 13:20. Nota: la paleta de colores utilizada no es la misma que en las figuras AIRS.

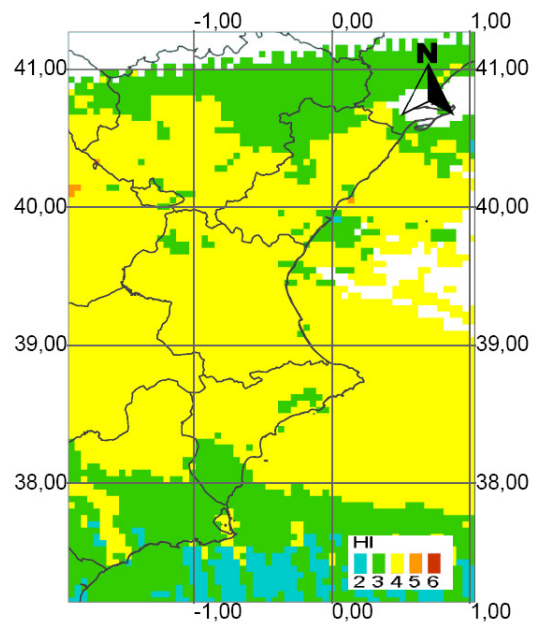


Figura 66 HI calculado en altas elevaciones a partir de los datos MYD07 el día 15/08/2008 a las 13:20.

Comparando la Figura 66 con sus homólogas de AIRS (61 y 62) podemos concluir que el resultado del HI es similar, siendo los valores de AIRS superiores a los proporcionados por MODIS en el interior de Valencia y el Sur de Alicante. Los huecos presentes en las Figuras 65 y 66 son debidos a píxeles enmascarados en el producto MODIS, además del propio corte del producto en la zona superior.

Además, cuando se elaboran los mapas con la variante de bajas elevaciones, los resultantes para el término A, y por consiguiente los del HI, presentan muchos huecos, debido a que el nivel de 950 hPa queda en muchos casos enmascarado en los productos de partida (ver Figura 67 a modo de ejemplo). En esta figura también se observa cierto rallado, principalmente para el mar, consecuencia del *stripping* observado en producto MOD07 de partida.

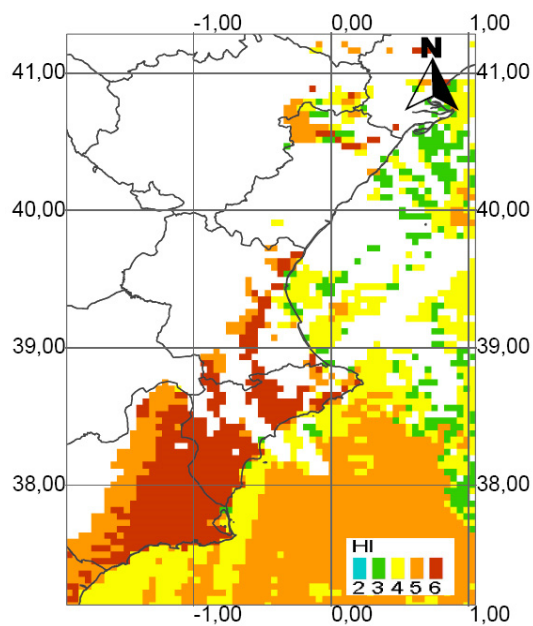


Figura 67 HI calculado en bajas elevaciones a partir de los datos MOD07 el día 21/05/2005 a las 10:45.

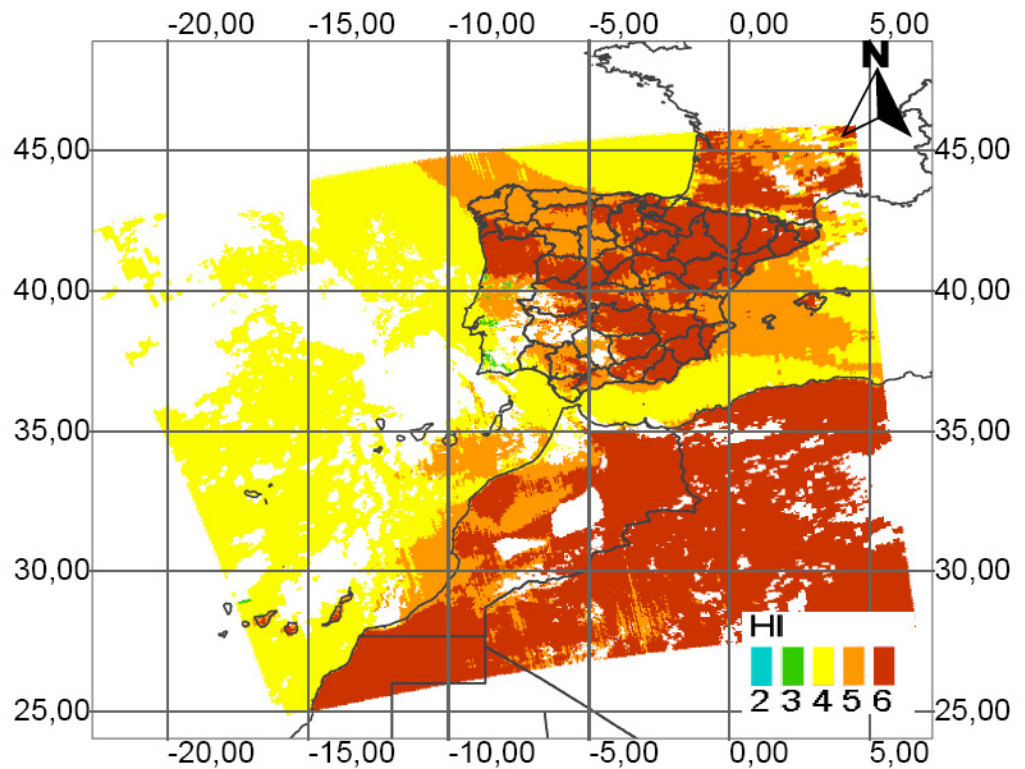


Figura 68 HI calculado en medias elevaciones a partir de los datos MYD07 el día 11/07/2005 a las 13:35.

La Figura 68 muestra un ejemplo de la cobertura total proporcionada por estos productos MODIS. En ella también se observa el efecto del citado *stripping*, principalmente visible en zonas relativamente homogéneas.

Los mapas obtenidos a partir de los sondeadores atmosféricos, con excepción de los posibles píxeles enmascarados en los productos de partida, pueden resultar de gran utilidad para la estimación y seguimiento del HI, complementando así a las fuentes de datos tradicionales.

4.3.2 Resultados estadísticos para el conjunto de los perímetros de los incendios.

En primer lugar se analizaron los valores del HI calculados mediante imágenes MOD07/MYD07 correspondientes a las fechas y los perímetros de los incendios. Los resultados mostrados en esta sección son los correspondientes a 1x1 píxeles ya que no difieren de manera significativa respecto de los resultados de 3x3 píxeles. En caso de validez de todos los datos analizados, es decir, datos no afectados por nubes ni enmascarados por otras razones asociadas a calidad, se dispone de cuatro datos correspondientes a las cuatro imágenes diarias para el día del evento (dos de EOS Terra y dos de EOS Aqua, correspondientes a la órbita ascendente y descendente). Para los datos correspondientes a los incendios, las horas de adquisición del Aqua, MYD07, varían entre las 01:05 - 03:00 UTC (ascendente) y las 12:15 – 14:05 UTC (descendente) y las de Terra, MOD07, entre las 20:55 – 22:50 (ascendente) y las 10:00 -11:45 (descendente). En los incendios en los que el perímetro cubre más de una coordenada, se consideraron los datos en todo el perímetro, por lo que se dispone de diferentes cantidades de datos dependiendo de la extensión del incendio y de la calidad de los datos (14 datos nocturnos y 20 diurnos). Así, se calcularon los percentiles para cada variante del índice considerando de forma independiente los datos diurnos y nocturnos, y ambos a la vez. La Tabla 9 muestra, a nivel estadístico, los resultados obtenidos del HI para el conjunto de incendios analizados, cuando el HI se calculó con la variante de bajas elevaciones usando la información MODIS.

En bajas elevaciones todos los valores calculados del HI para las fechas y perímetros de los incendios durante el día son superiores a 5, siendo 6 solamente en uno de los casos, mientras los datos nocturnos son todos inferiores a 5, siendo de 3.5 el mínimo. La Tabla 10 muestra los resultados del HI para las fechas y perímetros de los incendios cuando se considera la variante de medias elevaciones.

Tabla 9: Percentiles de HI calculados para las fechas y perímetros de los incendios con la variante de bajas elevaciones a partir de datos MODIS.

percentil	noche	día	día/noche
0	3.5	5	3.5
10	3.6	5	3.9
20	3.8	5	4
30	3.9	5	4.3
40	4	5	4.8
50	4	5	5
60	4	5	5
70	4.1	5	5
80	4.3	5.2	5
90	4.5	5.6	5.2
100	4.8	6	6

En medias elevaciones el 80% de los datos nocturnos son iguales o superiores a 4, mientras que el 80% de los diurnos son 6. Finalmente la Tabla 11 muestra los resultados del HI con la variante de altas elevaciones.

Tabla 10: Percentiles de HI calculados para las fechas y perímetros de los incendios con la variante de medias elevaciones a partir de datos MODIS.

percentil	noche	día	día/noche
0	3.5	5.3	3.5
10	3.8	5.9	4
20	4	6	4
30	4	6	4
40	4	6	5.1
50	4	6	6
60	4	6	6
70	4	6	6
80	4	6	6
90	4.4	6	6
100	5	6	6

En altas elevaciones (Tabla 11), el 50% de los valores nocturnos son 2, siendo el resto superiores pero sin superar el máximo que se corresponde con HI=4. El 70% de los valores diurnos son 4, siendo el resto superiores, con un HI máximo igual a 5. Por tanto, independientemente de la variante utilizada se deduce una diferencia significativa entre los valores del HI calculados a partir de los productos MODIS generados de sus órbitas ascendentes/descendentes (noche/día), por lo que la interpretación de los valores del índice en relación al riesgo debería tener en cuenta esta diferencia.

Tabla 11: Percentiles de HI calculados para las fechas y perímetros de los incendios con la variante de altas elevaciones a partir de datos MODIS.

percentil	noche	Día	día/noche
0	2	4	2
10	2	4	2
20	2	4	2.8
30	2	4	4
40	2	4	4
50	2	4	4
60	2.4	4	4
70	2.8	4	4
80	3.2	4.2	4
90	3.6	4.6	4.3
100	4	5	5

La Tabla 12 muestra los valores promedios del HI durante los incendios, considerando los 3 días de estudio (días de inicio, previos y posteriores), así como los valores máximos y mínimos, separando los datos diurnos y nocturnos. Además, se consideran los resultados de las variantes del HI por elevación más apropiadas para cada incendio, según las elevaciones mostradas en la Tabla 8, así como el promedio de estos.

Tabla 12 Promedios, máximos y mínimos de HI calculados para las fechas y perímetros de los incendios con datos MODIS utilizando las variantes por elevación más adecuadas para cada incendio (ver Tabla 8).

Elevación	Promedio noche	Promedio día	Promedio todos	Mín noche	Máx noche	Mín día	Máx día
low	4.1	5.2	4.7	3.5	4.8	5	6
mid	4.1	5.9	5.2	3.5	5	5.3	6
high	2.7	4.2	3.6	2	4	4	5
todas	3.8	5.3	4.7	2	5	5.3	6

Los resultados de esta tabla muestran que los promedios máximos se corresponden con los datos diurnos, presentándose los mínimos en los nocturnos, tal y como se veía de las tablas anteriores. Analizando los datos por variantes asociadas a elevación, los valores máximos los encontramos en medias elevaciones y los mínimos en altas, siendo estos resultados coherentes con la climatología presentada anteriormente en la sección 3.3.

Análogamente al caso anterior, se realizan los mismos cálculos cuando utilizamos productos AIRS-AMSU y AIRS-only (resultados en Tabla 13). Cabe tener en cuenta que en estos casos los datos correspondientes al primer día del incendio de Xàtiva (21/06/2005) y el día de inicio del incendio de Chelva (01/06/2012) no son válidos. La órbita ascendente se corresponde de nuevo con los datos diurnos (entre las 12:15 y las 14:05 UTC) y la descendente (entre las 01:05 y las 03:00 UTC) con los nocturnos.

El promedio diario para los datos diurnos se sitúa en 5 para bajas y altas elevaciones siendo un poco superior, de 5.3, en las medias. Para los datos nocturnos esta vez se sitúa el promedio en 5 en bajas y medias elevaciones y en 4 para las altas. Como ocurre con los datos MODIS aunque las diferencias son más notables, también en los datos AIRS-AMSU los valores diurnos son ligeramente superiores a los nocturnos.

Para el caso del AIRS-only, los promedios de los valores diurnos coinciden con los del AIRS-AMSU, mientras que los nocturnos son ligeramente superiores en bajas y medias elevaciones, con valores de HI de 5.5 y 5.3 respectivamente.

Tabla 13 Promedio de HI calculados para las fechas y perímetros de los incendios a partir de los datos AIRS-AMSU y AIRS-only para las órbitas ascendentes y descendentes utilizando las variantes por elevación más adecuadas para cada incendio (ver Tabla 8).

Elevación	AIRS-AMSU		AIRS-only		Casos
	Promedio noche	Promedio día	Promedio noche	Promedio día	
low	5	5	5.5	5	2
mid	5	5.3	5.3	5.3	3
high	4	5	4	5	1
todas	4.8	5.2	5.2	5.2	6

4.3.3 Evolución del HI para los incendios de estudio.

Las Figuras 69-73 muestran la evolución del HI calculado a partir de los productos MOD07 y MYD07 para cada incendio estudiado, desde el día previo al inicio de incendio hasta el posterior. Para ello se ha usado la variante del HI más apropiada de acuerdo con las elevaciones que comprende cada incendio, recogidas en la Tabla 8.

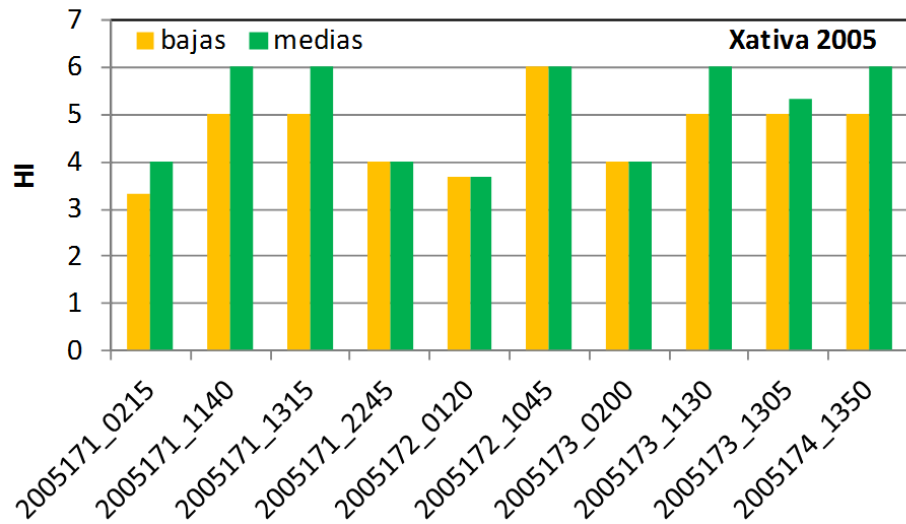


Figura 69 Evolución del HI para el incendio de Xàtiva de 2005 (detectados el 21/06/2005 a las 15:59 y el 22/05/2005 a las 13:35) en bajas y medias elevaciones a partir de datos MODIS.

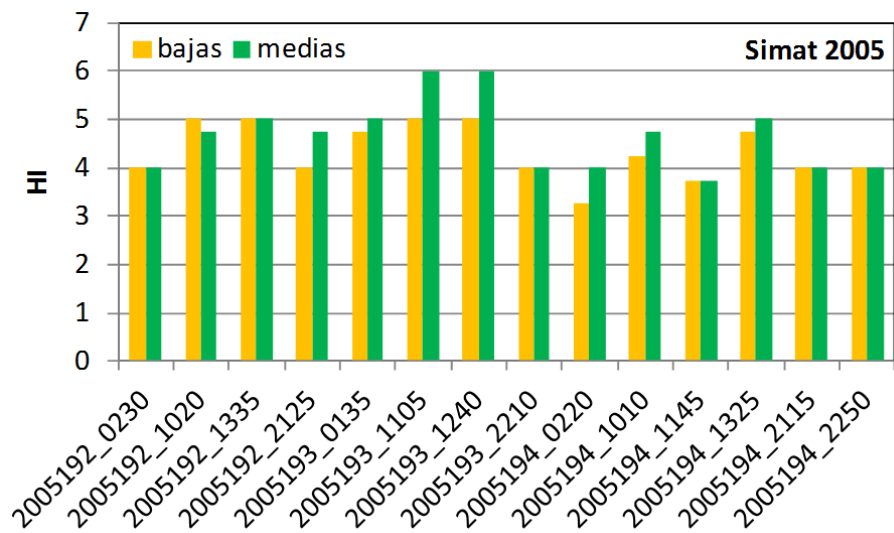


Figura 70 Evolución del HI para el incendio de Simat de 2005 (detectado el 12/07/2005 a las 18:17) en bajas y medias elevaciones a partir de datos MODIS.

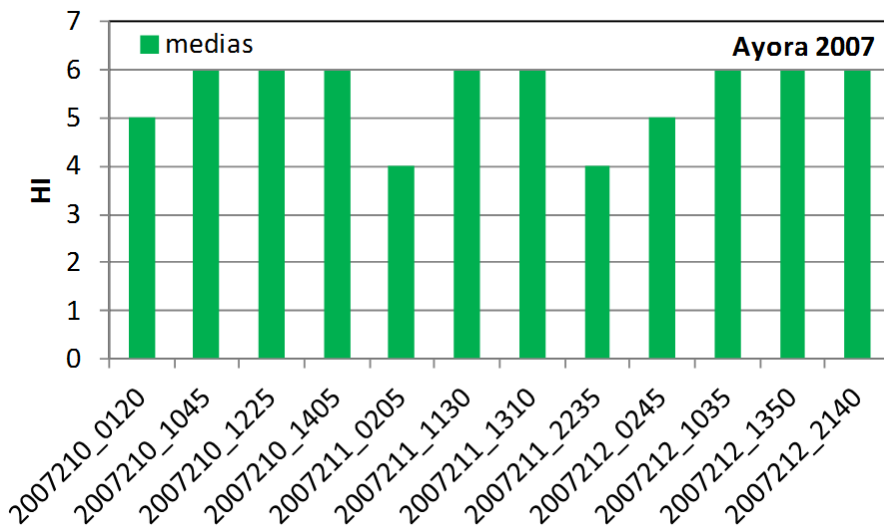


Figura 71 Evolución del HI para el incendio de Ayora de 2007 (detectado el 30/07/2007 a las 15:05) en medias elevaciones a partir de datos MODIS.

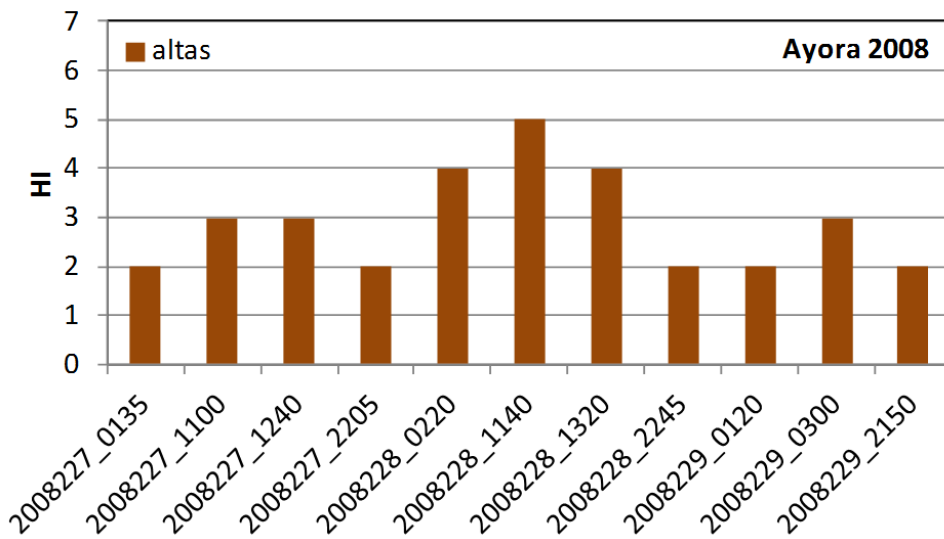


Figura 72 Evolución del HI para el incendio de Ayora de 2008 (detectado el 15/08/1008 a las 15:46) en altas elevaciones a partir de datos MODIS.

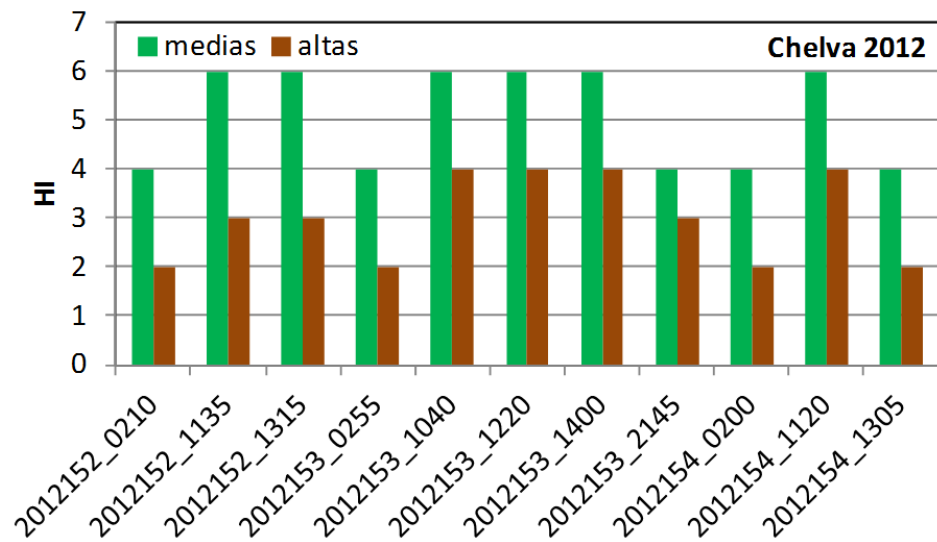


Figura 73 Evolución del HI para el incendio de Chelva de 2012 (detectado el 01/06/2012 a las 14:47) en medias y altas elevaciones a partir de datos MODIS.

En las Figuras 69-73 se puede observar como los índices son elevados (5 o 6) en las horas previas al incendio, en las variantes de bajas y medias elevaciones. En la variante de altas elevaciones usada para el caso del incendio de Ayora de 2008 el HI también está entre 4 y 5, mientras que en el de Chelva de 2012 es de 4. De acuerdo con los resultados presentados en la sección 3.3, este HI de 4 obtenido para altas elevaciones indicaría también un alto riesgo de incendio.

Como conclusiones de este capítulo, podemos decir que:

- En general, los valores del HI son superiores si se calculan utilizando las pasadas descendentes (día) de los sondeadores MODIS o AIRS que si usamos las pasadas ascendentes (noche), especialmente las de MODIS, lo que requerirá una diferente interpretación del HI ofrecido en cuanto a la asociación con el riesgo de incendio.

- La variante del HI de altas elevaciones proporciona valores de HI más bajos que otras variantes, en concordancia con los resultados presentados en la sección 3.3, lo que también requiere ser tenido en cuenta a la hora de interpretar el riesgo de incendio.

- Los datos obtenidos a partir de sondeadores atmosféricos a bordo de satélite se muestran como una herramienta alternativa o complementaria para el cálculo del HI, por las siguientes razones:
 - a) Disponen de mejor resolución espacial, principalmente si utilizamos el producto ofrecido por MODIS.
 - b) Presentan buena concordancia respecto de los datos NCEP.
 - c) En combinación con los datos NCEP proporcionan una mayor frecuencia temporal en la generación de mapas del HI.

- Si comparamos los resultados obtenidos con los distintos datos de sondeadores en satélite, los datos AIRS proporcionan en general valores más elevados del HI, además de una mayor continuidad espacial de datos, ya que los productos MODIS presentan mayor proporción espacial de píxeles enmascarados. Sin embargo, la resolución espacial de MODIS (de 5 km) proporciona una escala más fina de detalle.

Capítulo 5:

Conclusiones

A continuación enumeramos a modo de resumen los logros alcanzados en esta tesis:

1. Se ha elaborado una climatología detallada, durante el periodo de 1980 a 2008, que puede servir como herramienta de referencia para interpretar y evaluar las observaciones del HI y mejorar el sistema de predicción y seguimiento de incendios.
2. El HI muestra el riesgo de incendios dominados por columna, con lo que para evaluar el riesgo general de incendios sería conveniente complementar esta información con los índices de riesgo convencionales.
3. La media climática del HI en la CV se encuentra alrededor de 4 tanto en bajas elevaciones como en medias, pudiendo ser un poco más elevada en puntos del interior del tercio Sur de la Comunidad (4.3), mientras que en altas elevaciones esta media se sitúa alrededor de 3.
4. Durante el verano los valores obtenidos son mayores, con medias de 4.1 en bajas elevaciones, entre 4.4 y 5 en medias y entre 2.8 y 3.5 en altas.
5. Se observa una tendencia al ascenso de la media interanual del HI y de los eventos extremos (5 y 6) durante el periodo de estudio. Los mayores valores de HI se dan en elevaciones medias aunque también se pueden encontrar eventos extremos en las otras variantes del índice.
6. Los patrones intermensuales de los valores promedio del HI presentan los máximos en los meses de verano y los mínimos en los de invierno. El número de eventos extremos de HI (5 y 6) sigue unos patrones similares.

7. La gran incidencia de índices extremos obtenida en medias elevaciones, también observada por Mills y McCaw (2010), podría ser debida a la estimación del término A, con lo que sería conveniente evaluar una modificación similar a la propuesta por estos autores en el área de estudio.

8. El periodo de seguimiento del HI debería cubrir todo el año ya que, aunque en verano sean más frecuentes, se pueden encontrar eventos extremos en cualquier época del año.

9. El análisis sinóptico de los diferentes valores del HI revelan una proporcionalidad directa entre el aumento del valor del HI y de situaciones convectivas.

10. Se han analizado fuentes de datos procedentes de sondeadores atmosféricos (MODIS, AIRS y AMSU) a bordo de diferentes satélites de observación de la Tierra durante 5 incendios históricos con el ánimo de evaluar su aportación como complemento para mejorar la predicción del HI.

11. En general, los valores del HI son superiores si se calculan utilizando las pasadas descendentes (día) de los sondeadores MODIS o AIRS que si usamos las pasadas ascendentes (noche), especialmente las de MODIS, lo que requiere una diferente interpretación del HI ofrecido en cuanto a la asociación con el riesgo de incendio.

12. La variante del HI de altas elevaciones proporciona valores de HI más bajos que otras variantes, en concordancia con los resultados presentados en la sección 3.3, lo que también requiere ser tenido en cuenta a la hora de interpretar el riesgo de incendio.

13. Los datos obtenidos a partir de sondeadores atmosféricos a bordo de satélite se muestran como una herramienta alternativa o complementaria para el cálculo del HI, por las siguientes razones:

- a) Disponen de mejor resolución espacial, principalmente si utilizamos el producto ofrecido por MODIS.
- b) Presentan buena concordancia respecto de los datos NCEP.
- c) En combinación con los datos NCEP proporcionan una mayor frecuencia temporal en la generación de mapas del HI.

14. Si comparamos los resultados obtenidos con los distintos datos de sondeadores en satélite, los datos AIRS proporcionan en general valores más elevados del HI, además de una mayor continuidad espacial de datos, ya que los productos MODIS presentan mayor proporción espacial de píxeles enmascarados. Sin embargo, la resolución espacial nominal de MODIS (de 5 km) proporciona una escala más fina de detalle.

Bibliografía

- Alduchov, O. A. y Eskridge R. E., 1996: Improved Magnus form approximation of saturation vapour pressure. *J. Appl. Meteor.*, 35, 601–609.
- Andre, J.C.S. and Viegas, D.X., 1998. An unifying theory on the propagation of the fire front of surface forest fires. III International Conference on Forest Fire Research; 14th Conference on Fire and Forest Meteorology; Luso; 16/20 November 1998, vol. 1, pp. 259-279
- Arnaldos, J. et al., 2004. Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales. Mundi-Prensa y Diputación de Barcelona.
- Barberà, M.J., Niclòs, R., Estrela, M.J. and Valiente, J.A., 2015. Climatology of the stability and humidity terms in the Haines Index to improve the estimate of forest fire risk in the Western Mediterranean Basin (Valencia region, Spain). *Int. J. Climatol.*, 35: 1212–1223. doi: 10.1002/joc.4048
- Barberà M.J., Estrela M.J., Niclòs R., Valiente J.A., 2010a. Correlació entre els incendis forestals i l'Índex de Haines a la Comunitat Valenciana. Anàlisi dels incendis de Xàtiva i Simat de 2005. In II Jornades de Meteorologia i Climatologia de la Mediterrània Occidental, Valencia, 11–12 Març.
- Barberà M.J., Niclòs R., Estrela M.J., Valiente J.A., 2010b. Analysing wildfires in Valencia with the Haines Index and monitoring the natural regeneration with MODIS data. In Proceedings of the 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III, Torrent, Spain.
- Barberà M.J., Niclòs R., Estrela M.J., Valiente JA., 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. In XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Teledetección. Agua y desarrollo sostenible, Calatayud, 22–25 Septiembre, 293–296. ISBN: 978-84-613-4257-0.

- Bidet, J., 2001. Analyse du danger météorologique d'incendies en France en zone méditerranéenne. Météo France, Direction Interregionale Sud-Est de Météo France.
- Brotak E., Reifsnyder W.E., 1977. An investigation of the synoptic situations associated with major wildland fires. *J. Appl. Meteorol.* 16: 867–870.
- Brotak E., 1980. A comparison of the meteorological conditions associated with major wildland fires in the United States, Canada, and Australia. *J. Appl. Meteorol.* 19: 474–476.
- Brotak E. A., 1992-1993. Low-level conditions preceding major wildfires. *Fire Management Notes*, 52-53, 23-26.
- Burgan, R. E., 1988. Revisions to the 1978 National Fire-Danger Rating System. USDA Forest Service Research Paper SE-273. Southeastern Forest Experiment Station. Asheville, NC.
- Campbell, D., 2005. The Campbell Prediction System: A Wild Land Fire Prediction System & Language. D. Campbell ed. 129 p.
- Carrega, P., 1991. A meteorological index of forest fire hazard in Mediterranean France. *Int. Jour. Wildland Fire*, 1, 79-86.
- Choi G., Kim J., Won M.S., 2006. Spatial patterns and temporal variability of the Haines Index related to the wildland fire growth potential over the Korean Peninsula. *J. Korean Geogr. Soc.* 41(2): 168–187.
- Croft P. J., Watts M., Potter, B. E., Reed, A., 2002a. Creating a Haines Index Climatology for the United States, Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. 25th Conference on Agricultural and Forest Meteorology and 12th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with A&WMA and Fourth Symposium on the Urban Environment, Norfolk, Virginia.
- Croft P.J., Potter B.E., Reed A., 2002b. The analysis of the Haines Index climatology for the eastern United States, Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In 4th Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Reno, NV, 242–246.

- Deeming J.E., Burgan R.E., Cohen J.D., 1977. The National Fire Danger Rating System-1978. USDA Forest Service. General Technical Report INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Dessler A.E., Davis S.M., 2010. Trends in tropospheric humidity from reanalysis systems. *J. Geophys. Res.* 115: D19–D16.
- Doty B., 1995. The grid analysis and display system. Retrieved September 10, 1995. <http://www.iges.org/grads/gadoc/index.html>.
- Elliott W.P., Gaffen D.J., 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 72: 1507–1520.
- Elliott W.P., Ross R.J., Schwiz B., 1998. Effects on climate records of changes in National Weather Service humidity processing procedures. *J. Clim.* 11: 2424–2436.
- Estrela, M.J., Pastor, F., Valiente, J.A., Alloza, J.A, 2005. Integración de una cartografía de vientos en situaciones meteorológicas de riesgo de incendios forestales en la Comunidad Valenciana mediante un SIG. *GeoFocus (Artículos)*, nº 5, p. 94-114. ISSN: 1578-5157.
- Estrela, M.J., 2008. Riesgos climáticos y cambio global en el Mediterráneo español ¿hacia un clima de extremos? CEAM / Centro Francisco Tomás y Valiente de Alcira (UNED) Colección INTERCIENCIAS, nº 34, 287 pp.
- Gaffen D.J., Sargent M.A., Habermann R.E., Lanzante J.R., 2000. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality. *J. Clim.* 13: 1776–1796.
- George, J. J., 1960. *Weather forecasting for aeronautics*. Academic Press: New York.
- Gibbins, C. J., 1990. A survey and comparison of relationships for the determination of the saturation vapour pressure over plane surfaces of pure water and of pure ice. *Ann. Geophys.*, 8, 859–885.
- Haines D. A., 1988. A lower atmosphere severity index for wildlife fires. *National Weather Digest*, 13(2), 23-27.
- IPCC., 2007. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability, Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of*

the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK, 976.

- Jenkins M.A., 2002. An examination of the sensitivity of numerically simulated wildfires to low-level atmospheric stability and moisture, and the consequences for the Haines Index. *Int. J. Wildland Fire* 11(4): 213–232.
- Jenkins M.A., 2004. Investigating the Haines Index using parcel model theory. *Int. J. Wildland Fire* 13(3): 297–309.
- Jones K.M., Maxwell C., 1998. A seasonal Haines Index climatology for New Mexico and the significance of its diurnal variations in the elevated Southwest. *Preprints of the Second Symposium on Fire and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, Boston, MA, 127–130.
- Kalnay, E.; Kanamitsu M.; Kistler R.; Collins W.; Deaven D., et al., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 437–471.
- Keetch, J. J., Byram, G. M., 1968, revision 1988. A drought index for forest fire control. USDA Forest Service Research Paper SE-38. Southeastern Forest Experiment Station. Asheville, NC.
- Kochtubajda B., Flannigan M. D., Gyakum J.R., Stewart R.E., 2001. The influence of atmospheric stability on fire behaviour in the Northwest Territories, Canada. *En Preprints of the Fourth symposium on fire and forest meteorology*. (American Meteorological Society: Boston, MA).
- Lawrence M.G., 2005. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86, 225-233.
- Long, M., 2006. A climatology of extreme fire weather days in Victoria. *Aust. Met. Mag.*, 55, 3-18.
- Luke R.H., McArthur A.G., 1986. *Bushfires in Australia*, Australian Government Publishing Service, Canberra.
- Martín Vide, J., 2008. La nueva realidad del calentamiento global. Un decálogo del cambio climático. *Diez años de cambios en el Mundo*, en la

- Geografía y en las Ciencias Sociales, 1.999-2.008. Actas del X Coloquio Internacional de Geocrítica, Universidad de Barcelona, 26-30 de mayo de 2.008 (<http://www.ub.es/geocrit/-xcol/49.htm>).
- McArthur A.G., 1967. Fire behaviour in eucalypt forest. *Commenw. Aust.For. Timber Bur. Leaflet 107*: 25.
- McCaw L., Marchetti P., Elliot G., Reader G., 2007. Bushfire weather climatology of the Haines Index in south-western Australia. *Aust. Meteorol. Mag.* 56: 75–80.
- Mediavilla, J., Alcover, V., Tamayo, J., Correa, B., 1994. Índice Meteorológico de Peligrosidad de los Incendios Forestales. Nota Técnica n.º 2 del GPV de Valencia. Valencia, Instituto Nacional de Meteorología, Centro Meteorológico Territorial de Valencia, ACL-94, pp. 1-83.
- Millán, M., Estrela M. J., Badenas C., 1998. Meteorological processes relevant to forest fire dynamics on the Spanish Mediterranean Coast. *J. Appl. Meteor.*, 37, 83-100.
- Millán, M., Estrela, M. J., Miró, J., 2005. Rainfall components: variability and spatial distribution in a mediterranean area (Valencia region). *Journal of Climate* 18, 2.682-2.705.
- Miller, R.C., 1972. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central. Headquarters, Air Weather Service, United States Air Force Technical Report 200(R). Omaha, NE.
- Mills G, McCaw L., 2010. Atmospheric stability environments and fire weather in Australia – extending the Haines Index. Technical Report No. 20, The Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, Australia.
- Mokoric M., Kalin L., 2006. Evaluation of meteorological index forest fire protection in Croatia. *For. Ecol. Manage.* 234: S70.
- Moreno, J.M., 2007. Cambio Global e Incendios Forestales: Una Visión desde España. 4ª conferencia internacional sobre incendios forestales, Wildfire 2.007, Sevilla, España.

- Moreno, J.M., W.C. Oechel, Eds., 1994. The role of fire in Mediterranean type ecosystems. Springer Verlag, 201 pp.
- Moreno, J.M., Vázquez, A., Vélez, R., 1998. Recent history of forest fires in Spain. Páginas 159-185 en J.M. Moreno, editor. Large Fires. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands.
- Olcina, J., 2008. Prevención de riesgos: Cambio climático, sequías e inundaciones. Informe del Panel científico-técnico de seguimiento de la política del agua. (<http://www.unizar.es/fnca/varios/panel/61.pdf>).
- Oliver M.A., Webster R., 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* 4: 313–32.
- Olsen, E.T., 2014. AIRS/AMSU/HSB Version 6 Level 2 Product User Guide.
- Orieux A., 1974. Conditions météorologiques et incendies de forêts en région méditerranéenne. *Revue Forestière Française*. N. Sp.
- Palmieri, S., Inghilesi, R., Sian, A.M., 1993. Un indice meteorologico di rischio per incendi boschivi. *Proceedings from Seminar on fighting forest fires*. Tessaloniki.
- Paltridge G., Arking A., Pook M., 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data. *Theor. Appl. Climatol.* 98(3–4): 351–359.
- Pausas, J.G., Vallejo, V.R., 1999. The role of fire in European Mediterranean ecosystems. Páginas 3-16 en E. Chuvieco, editor. *Remote sensing of large wildfires in the European Mediterranean basin*. Springer, Berlin.
- Pausas, J.G., 2004a. Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic Change* 63: 337-350.
- Pausas, J.G., 2004b. La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. En *Avances en el estudio de la gestión del monte Mediterráneo*. Vallejo V.R. y Alloza J.A. eds., 47-64. Fundación CEAM, 2004.
- Peace M., McCaw L., Mills G., 2012. Meteorological dynamics in a fire environment; a case study of the Layman prescribed burn in Western Australia. *Aust. Meteorol. Oceanogr. J.* 62(3): 127–141.

- Piñol, J., Terradas, J., Lloret, F., 1998. Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic Change* 38: 345-357.
- Plan Especial frente al Riesgo de Incendios Forestales, Generalitat Valenciana. Revisión Julio 2007.
- Potter B.E., 1996. Atmospheric properties associated with large wildfires. *Int. J. Wildland Fire* 6(2): 71–76.
- Potter, B.E., Winkler, J.A., Wilhelm, D.F., Shadbolt, R.P, Bian, X., 2008. Computing the low-elevation variant of the Haines Index for fire weather forecasts. *Weather and Forecasting*, 23(1), 159-167.
- Quílez R., 2007. Influencia del Índice de Haines en la evolución del incendio forestal ocurrido en Xàtiva (Valencia) España, el 22 de junio de 2005. In 4a Conferencia Internacional Sobre Incendios Forestales, Wildfire 2007, Sevilla, España.
- Quílez R., 2008. Influencia de la Meteorología en el desarrollo de los incendios forestales. I Simposio Nacional sobre Incendios Forestales, Polop de la Marina (Alicante).
- Quílez, R., 2013. Incendios convectivos en España: casos de estudio y recomendaciones en las estrategias de extinción. 6º Congreso Forestal Español. Vitoria.
- Reges H.W., Alden S., 1998. Use of the Haines Index to evaluate large fire potential for interior Alaska. In *Proceedings of the Second Conference on Fire and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, Phoenix, AZ, 131.
- Rothermel, R.C., 1972. A mathematical model for FIRE spread predictions in wildland fuels. USDA Forest Service. Research paper. INT-115. Intremountain Forest and Range Experiment Station, Odgen, UT.
- Santoni, P.A., Balbi, J.H., Dupuy, J.L., 2000. Dynamic modelling of upslope fire growth, *Int. J. Wildland Fire*, 4, 9, pp. 285-292.
- Seemann, S.W., Borbas, E.E., Li, J., Menzel, W.P., Gumley, L.E., 2006. MODIS atmospheric profile retrieval Algorithm Theoretical Basis Document.

- Simeoni, A., Santoni, P.A., Larini, M. Balbi, J.H., 2001. On the wind advection influence on the fire spread across a fuel bed: modelling by a semi-physical approach and testing with experiments, *Fire Safety Journal* 36 (5), pp. 491-513.
- Trabaud, L., 1982. Effects of past and present fire on the vegetation of the French Mediterranean region. *Symp. Dynamics, Manage. Medit. Type Ecosyst. USDA Forest Serv. Gen. Tech. Rep. PSW –58*, pp. 450-457. Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn.
- Trouet V., Taylor A.H., Carleton A.M., Skinner C.N., 2009. Interannual variations in fire weather, fire extent, and synoptic-scale circulation patterns in northern California and Oregon. *Theor. Appl. Climatol.* 95: 349–360.
- Turner J.A., Lawson B.D., 1978. Weather in the Canadian forest fire danger rating system. A user guide to national standards and practices. Information Report BC-X-177, Environment Canada, Pacific Forest Research Centre, Victoria, BC, Canada, 40.
- Vallejo V.R., 1996, Ed. La restauración de la cubierta vegetal en la Comunidad Valenciana. Valencia, Fundación CEAM, 601 pp.
- Vallejo V.R., Alloza J.A., 1998. The restoration of burned lands: the case of Eastern Spain. In: Moreno J.M. (Ed.): *Large forest fires*. Leiden, The Netherlands, Backhuys Publishers, pp. 91–108.
- Van Wagner C.E., Pickett T.L., 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33, Canadian Forest Service, Ottawa, ON.
- Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Technical Report 35. Ottawa, Canadian Forestry Service, pp.1-37.
- Vélez R., 1982. *Manual de Predicción del Peligro de Incendios Forestales*. ICONA: Madrid.
- Viegas, D.X., Bovio G., Ferreira, A., Nosenzo, A., Sol B., 2000. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 9 (4), 235-246.

- Viegas, D.X., Ribeiro, P.R., Maricato, L., 1998. An empirical model for the spread of a fireline inclined in relation to the slope gradient or to wind direction. III International Conference on Forest Fire Research; 14th Conference on Fire and Forest Meteorology; Luso; 16/20 November 1998; Vol. 1, pp. 325-342.
- Weber R.O., Dold J.W., 2006. Linking landscape fires and local meteorology – a short review. *JSME Int J. Ser. B.* 49(3): 590–593.
- Werth P., Ochoa R., 1993. The evaluation of Idaho wildfire growth using the Haines Index. *Weather Forecast.* 8(2): 223–234.
- Werth, J., Werth, P., 1998. Haines index climatology for the Western United State. *Fire Management Notes* 58, 8-17.
- Winkler J.A., Potter B.E., Wilhelm D.F., Shadbolt R.P., Piromsopa K., Bian X., 2007. Climatological and statistical characteristics of the Haines Index for North America. *Int. J. Wildland Fire* 16(2): 139–152.
- Winkler J.A., 2004. The impact of technology on in situ atmospheric observations and climate science. In *Geography and Technology*, Brunn S, Cutter S, Harrington JW (eds). Kluwer Academic Publishers: New York, NY, 461–490.

Anexo:

Publicación “Climatology of the stability and humidity terms in the Haines Index to improve the estimate of forest fire risk in the Western Mediterranean Basin (Valencia region, Spain)”. Maria J. Barberà, Raquel Niclòs, Maria J. Estrela, & José A. Valiente. *International Journal of Climatology*, 35: 1212–1223 (2015).

1º cuartil (posición 18 de 77, *Meteorology & Atmospheric Sciences*). Factor de Impacto: 3.2

Climatology of the stability and humidity terms in the Haines Index to improve the estimate of forest fire risk in the Western Mediterranean Basin (Valencia region, Spain)

Maria J. Barberà,^{a*} Raquel Niclòs,^a Maria J. Estrela^b and José A. Valiente^c

^a *Earth Physics and Thermodynamics Department, University of Valencia, Spain*

^b *Faculty of Geography and History, University of Valencia, Spain*

^c *Instituto Universitario Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo – CEAM-UMH, Paterna-Valencia, Spain*

ABSTRACT: The stability and moisture content of the different atmospheric levels are commonly used to assess the risk index in the propagation and evolution of a hypothetical forest fire. The Haines Index (HI) combines these terms to determine the environmental potential for wildfire growth. In this paper the environmental stability and humidity associated with the lower atmospheric layers in the Western Mediterranean Basin are investigated by analysing HI calculations over a 29-year period. The HI climatology can be applied to the study of plume-dominated forest fires. These fires tend to present very erratic propagation behaviour and create highly dangerous situations for fire brigades. Thus the knowledge of the typical index values and the meteorological situations that generate them could be extremely useful for minimizing the fire risk and planning specific fire-fighting activities. In this study we carry out a spatial and temporal analysis of the Index and its terms in the Valencia region on the basis of NCEP/NCAR reanalysis data from 1980 to 2008, obtaining a detailed climatological analysis of the HI in the Valencia region for each variant of elevation, which can be used as a reference tool. Moreover, using NCEP reanalysis maps at 500 and 850 hPa, we also perform a daily synoptic analysis for the studied period which is finally associated to the different values that the Index can show in this area. As a result three dominant synoptic weather situations have been defined in this region: continental, maritime and convective. A direct proportionality has been found between increases in the HI and convective situations.

KEY WORDS plume-dominated forest fires; Haines Index; stability; humidity; climatology; Valencia region

Received 19 December 2013; Revised 28 March 2014; Accepted 22 April 2014

1. Introduction

The ability to provide adequate spatial and temporal forecasts of the risk of forest fire ignition and spread is crucial in fire-extension planning and fire-risk minimization. Current fire-risk forecasting schemes are mainly based on meteorological variables. The most commonly used fire-risk indexes are calculated from surface weather variables (McArthur, 1967; Deeming *et al.*, 1977; Turner and Lawson, 1978; Vélez, 1982; Van Wagner and Pickett, 1985); however, these variables are not the only ones that influence fire spread. Even when meteorological conditions, fuel amounts and topography are kept constant, atmospheric instability and dryness aloft can promote the spread of a forest fire by generating convective heat columns within and around the smoke plume, which produce strong air currents and can ignite new fires (Werth and Ochoa, 1993).

In fact, atmospheric instability and dryness have been associated with large wildfires for many years (Brotak

and Reifsnnyder, 1977; Brotak, 1980; Werth and Ochoa, 1993; Potter, 1996; Jones and Maxwell, 1998; Reges and Alden, 1998; Werth and Werth, 1998; Croft *et al.*, 2002a, 2002b; Jenkins, 2002, 2004; Choi *et al.*, 2006; Long, 2006; Mokoric and Kalin, 2006; Weber and Dold, 2006; McCaw *et al.*, 2007; Winkler *et al.*, 2007; Trouet *et al.*, 2009; Peace *et al.*, 2012). Haines (1988) was the first to develop a fire risk index based on the stability and moisture content of the lower atmospheric layers. This index was originally called the Lower Atmospheric Stability Index (LASI), but it is now referred to as the Haines Index (HI). The HI is an indicator of the potential risk of forest fires when the vertical convective plume is more important than horizontal winds, i.e. the so-called plume-dominated fires (Haines, 1988).

Ever since the HI was formulated, a diverse range of studies have been carried out to evaluate its features, for example, its spatial and temporal variability or its influence on large wildfire development in the United States (Werth and Ochoa, 1993; Jones and Maxwell, 1998; Reges and Alden, 1998; Werth and Werth, 1998). The first attempt to elaborate a climatological study for the United States was made by Croft *et al.* (2002a) working with 30 years of radiosounding data; the same authors

* Correspondence to: M. J. Barberà, Earth Physics and Thermodynamics Department, University of Valencia, 50 Dr. Moliner, E-46100 Burjassot-Valencia, Spain. E-mail: m.jesus.barbera@uv.es

subsequently complemented this study with statistical analyses (Croft *et al.*, 2002b). Nevertheless, because HI spatial and temporal analyses were not carried out until around 10 years ago, fire managers had no reliable databases with which to compare their observational values. Winkler *et al.* (2007) remedied this with their HI climatological study of most of North America, which was based on 40 years of reanalysis data and is available at <http://info.airfire.org/haines/usingatlas.html>. Subsequent studies on HI interannual variations in this region (Trouet *et al.*, 2009) have yielded good statistical correlations between years with high HI values and the development of large wildfires.

Application of the HI in other countries, e.g. Australia, Croatia and Korea (Choi *et al.*, 2006; Long, 2006; Mokoric and Kalin, 2006; Weber and Dold, 2006; McCaw *et al.*, 2007) has also resulted in good overall correlations between the HI and large forest fire development.

Nevertheless, the HI has not been applied in the Western Mediterranean Basin, despite the identified presence of plume-dominated fires in several experimental campaigns within various European research projects that were implemented mainly in the Valencia region [Land use changes interactions with fire in Mediterranean landscapes, (LUCIFER), 1996–2000; Forest fire spread prevention and mitigation (SPREAD), 2002–2004; Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory: A ‘wall-less’ Laboratory for Wildland Fire Sciences and Technologies in the Euro-Mediterranean Region (EUROFIRELAB), 2003–2006].

The study region is located on the East coast of the Iberian Peninsula (Western Mediterranean Basin, Figure 1), with about 500 km of coastline and an average width of 80 km. This area is characterized by a complex orography (with elevations from sea level up to 1800 m)

and a wide range of environments and landscapes (Nicolòs *et al.*, 2014). The main features are its abrupt interior zone, crossed by the Betic and Pre-Betic mountain systems in the South and the Iberian mountain system in the North (Estrela *et al.*, 2000). The Mediterranean Basin is one of the five Mediterranean-climate regions on the Earth where there are relatively cold and wet winters alternated with long, hot and dry summers. Spring and autumn seasons are ephemeral and highly variable (Vallejo *et al.*, 2012).

During the last decade, the Firefighters of the Valencia region (Eastern Spain) have noted an increase in plume-dominated fires in this zone. They have asked for reliable information to be able to predict and identify this kind of fires, since extinguishing them is complicated by their erratic behaviour (Quflez, 2007; Barberà *et al.*, 2009, 2010a, 2010b; Peace *et al.*, 2012).

The aim of this work is to analyse the HI – and especially its two main terms, humidity and stability – in the Valencia region in the Western Mediterranean Basin (Figure 1). For this region, HI spatial and temporal patterns for the period 1980–2008 were determined, and a synoptic classification of the different HI values found during this period was described.

2. Data and Methods

The HI (Haines, 1988) is calculated as the sum of two terms, *A* and *B*:

$$HI = A + B$$

where $A = (TP1 - TP2)$ is related to the lower atmosphere stability, and $B = (TP3 - TdP3)$ to the humidity. TPi and $TdPi$ are the air temperature and the dew point temperature at pressure level Pi , thus both terms *A* and *B* are expressed in temperature units.

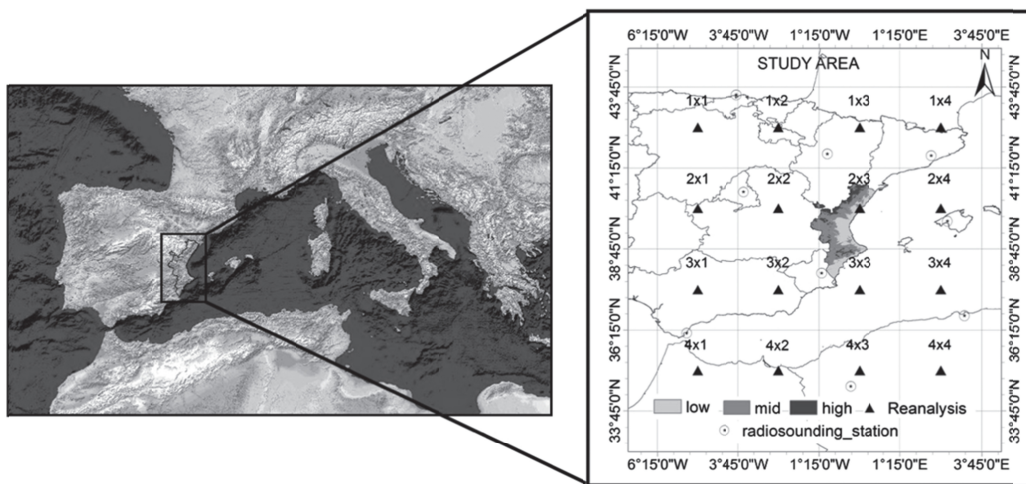


Figure 1. Location of the study area (Valencia region, Eastern Spain). Valencia region topography reclassified for the three HI variant elevations, the cells in which NCEP/NCAR reanalysis data are available and the radiosounding station distribution.

Table 1. Variables and scales for calculating the HI according to the terrain elevation (Haines, 1988; Choi *et al.*, 2006; Potter *et al.*, 2008).

Surface elevations (m)	Pressure level (hPa)	Stability ($^{\circ}\text{C}$) (TP1 - TP2)	A	Humidity ($^{\circ}\text{C}$) (TP3 - TdP3)	B	HI = A + B
<305 (low)	P1 = 950 (925)	<4 (2.7)	1	<6	1	Potential for large fires 2-3: very low 4: low 5: mid 6: high
	P2 = 850	≥ 4 (2.7)	2s	≥ 6	2	
	P3 = 850	<8 (6.7)	3	<10	3	
305-914 (mid)	P1 = 850	≥ 8 (6.7)	1	≥ 10	1	
	P2 = 700	<6	2	<6	2	
	P3 = 850	≥ 6	3	≥ 13	3	
>914 (high)	P1 = 700	<11	1	<15	1	
	P2 = 500	≥ 11	2	≥ 15	2	
	P3 = 700	<18	3	<21	3	
		≥ 18	3	≥ 21	3	

Depending on the surface elevation above sea level (h) of the region of interest, there are three possible atmospheric layers used for computing the HI, and they provide what are known as the low ($h < 1000$ feet, lower than 305 m), mid ($1000 < h < 3000$ feet, or 305 and 914 m, respectively) and high ($h > 3000$ feet, higher than 914 m) elevation HI variants (Table 1; Haines, 1988; Choi *et al.*, 2006; Potter *et al.*, 2008). The low elevation variant was originally developed for the P1 = 950 hPa pressure level; however, the fact that this atmospheric level is not included in numerous atmospheric profile databases led Potter *et al.* (2008) to suggest using P1 = 925 hPa as the standard pressure level. Table 1 shows the values used for this level (Choi *et al.*, 2006).

Each of the three variants has the two components: the stability term (A) and the humidity term (B). Values from 1 to 3 are assigned to each of these terms depending on the magnitude of the temperature differences. The more unstable the atmosphere aloft is, the higher the A term will be and the higher the probability of convective plume-dominated wildfires. Analogously, drier atmospheric conditions imply larger B values which are favourable for the spread of wildfires. Thus, the HI varies between 2 and 6 for each of the three variants, with values ≥ 5 indicating critical conditions for the formation of plume-dominated wildfires.

As this study required the use of an atmospheric profile database and the synoptic network of upper-air observing stations, <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>, has no radiosounding stations in the Valencia area (Figure 1, we have worked with reanalysis data provided by NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, Kalnay *et al.*, 1996). The reanalysis fields were also chosen over radiosounding station data because of their greater and more uniform spatial coverage over the study area and because of concerns about the quality of the radiosounding data (Winkler *et al.*, 2007). The large number of discontinuities in radiosounding time series at individual stations as a result of station relocations and changes in sensors and observing practices can make the radiosounding record difficult to use for climatology

analysis (Elliott and Gaffen, 1991; Elliott *et al.*, 1998; Gaffen *et al.*, 2000; Winkler, 2004).

The NCEP/NCAR reanalysis spatial resolution of $2.5 \times 2.5^{\circ}$ was used due to the fact that the $1 \times 1^{\circ}$ database was more limited temporally (beginning on 30 July 1999) and thus was not considered extensive enough to carry out a climatological study. Also, radiosounding station distribution close to the study area is shown in Figure 1 and it is observed that the nearest stations are spaced greater distances than 2.5° . Furthermore, the resolution of 2.5° can reveal the conditions for the convective phenomena taking into account the temperature profile.

There are some debates about the reliability of the upper air moisture variables on NCEP/NCAR reanalysis (Paltridge *et al.*, 2009; Dessler and Davis, 2010). To analyse this particular concern in the Valencia region, NCEP/NCAR reanalysis data on a 2.5° grid were compared with one of the nearby upper air atmospheric station data sited in Murcia (<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>). This site is not strictly within the Valencia region, concretely the situation of Murcia data is at 38°N and -1.15°E , so it's between the cells 3×2 and 3×3 (see Figure 1). The obtained correlation of temperature and humidity at the four levels used to calculate the HI (925, 850, 700 and 500 hPa) were compared between NCEP/NCAR reanalysis data (cells 3×2 and 3×3) and radiosounding data obtaining a satisfactory correlation. Paltridge *et al.* (2009) and Dessler and Davis (2010) quoted some troubles in specific humidity in the NCEP/NCAR reanalysis data, particularly in the tropical regions and above 500 hPa, but it is not the case. Also, the use of this kind of data also is supported by previous studies (Choi *et al.*, 2006; Winkler *et al.*, 2007), so by keeping the same data base could help comparing results.

Data from 1980 to 2008 were used because the earlier NCEP/NCAR reanalysis data presented inconsistent quality as a result of the implementation of satellite data in 1979 (Kalnay *et al.*, 1996). Although there are some debate in the literature regarding the best choice of observation time for calculating HI (Jones and Maxwell, 1998; Werth and Werth, 1998) without agreement, the data at 00 UTC were selected, as this was the time slot in which the HI

Table 2. Description of the different climatological values calculated.

Value	Description
Climatological values	Average of the complete database, i.e. mean daily values (00:00 UTC) from 1980 to 2008 (see in Figure 4 top)
Mean daily HI	Average of daily values for a single day during all the years studied
HI monthly-mean	Average of daily values for a specific month of a year
Mean monthly HI	Average of monthly means for a single month during many years (in Figure 6)
HI annual-mean	Average of values during a specific year
Mean annual HI	Average of the monthly-means for the whole period of years (Figure 5)
Climatological values in summer	Average of the mean daily HI from June to September (in Figure 4 bottom)

was originally developed by working with the temperature and relative humidity variables to determine the dew-point temperature (Lawrence, 2005) at the 925, 850, 700 and 500 hPa pressure levels. Moreover, 00 UTC data were chosen because this time is close to the 23 UTC World Meteorological Organisation standard time for radiosoundings observations to occur, and it is when the most data is available across the world. Therefore, by keeping the climatology at this same time step, it makes it easier to compare with other studies.

Figure 1 shows also the grid distribution of the Digital Elevation Model (DEM) for the Valencia region with a 50 m resolution, as reclassified for the three elevations that give rise to the three HI variants. Thus, there are 16 gridpoints over the Eastern part of the Iberian Peninsula at a 2.5° resolution but 3 of them (2 × 2, 2 × 3 and 3 × 3) covers the Valencia region. The GrADS (Grid Analysis and Display System) software was used to process the data (Doty, 1995). The database for the statistical analysis was generated by calculating the climatological averages, for the HI, A and B during the study period (1980–2008) for each of the three elevations.

Although the fire season in the study zone (characterized by the occurrence of wildfires and summer droughts) could be considered in summer, in this work we show the climatological averages from the whole period and for the summer months with the aim of providing as much information as possible. The spatial data processing was carried out with ArcGIS software by using a kriging method (Oliver and Webster 1990) for the NCEP/NCAR data interpolations over the 16 gridpoints abovementioned and different spatial analysis tools of the geostatistical and spatial analyst toolboxes.

Climatological values for the whole period, summer, daily, monthly and annual means were calculated at 00:00 UTC from 1980 to 2008 (description in Table 2).

With respect to the temporal analysis, we represented the interannual, intermonthly and interdiurnal evolution of the A and B terms and the HI in each of the NCEP/NCAR grids that contain any part of the Valencia region and for each variant of the HI.

Using the same method described above, we also analysed the specific cases in which the HI presents values of 5 and 6 corresponding to a moderate or high likelihood of a fire becoming large and vertical plume-dominated. To summarize, these results are averaged over the three grid

points covering the Valencia region with the purpose of providing the global results for the complete study area for the three elevations.

A synoptic analysis was developed with the NCEP synoptic daily charts at 500 and 850 hPa for the period 1980–2008 (<http://www.wetterzentrale.de/>). The methodology applied was the same as used in Millán *et al.* (2005) and a daily dataset was obtained where each day was classified depending on its synoptic situation in one of the following three dominant types (Figure 2):

- (1) Continental flows, i.e. downslope continental flows generally, with the exception of the Southern third of the study region, such as it is observed at latitude 38°45'N (see in Figure 1). In this case the air mass source provides no extra moisture; generally speaking, these are Westerly flows
- (2) Maritime or Easterly, i.e. upslope maritime or Easterly flows, with also the exception of the Southern third of the study region, see latitude 38°45'N in Figure 1. In this case the air mass source does provide extra moisture due its trajectory over the Mediterranean Sea.
- (3) Convective situations are those with predominance of vertical movements instead of horizontal (advection) displacements of air masses.

The three dominant types of synoptic situations were also distinguished both at surface level and aloft taking into account the source of air masses at the surface (lines on a Mean Sea Level pressure map) and aloft (maps at both 500 and 850 hPa).

The daily synoptic classification was merged with the different values that the HI can take in each of the elevations. Statistics were computed for the probability of occurrence for each of the abovementioned synoptic situations depending on the value taken by the HI.

3. Results and discussion

3.1. HI spatial patterns

Figure 3 shows the terms A and B (see Table 1) obtained for the climatic values calculated from the full studied period for low elevations. For term A, a slight North–south gradient is observed in the Valencia region, with the highest values in the North, while term B shows also a slight positive gradient from Northwest to Southeast.

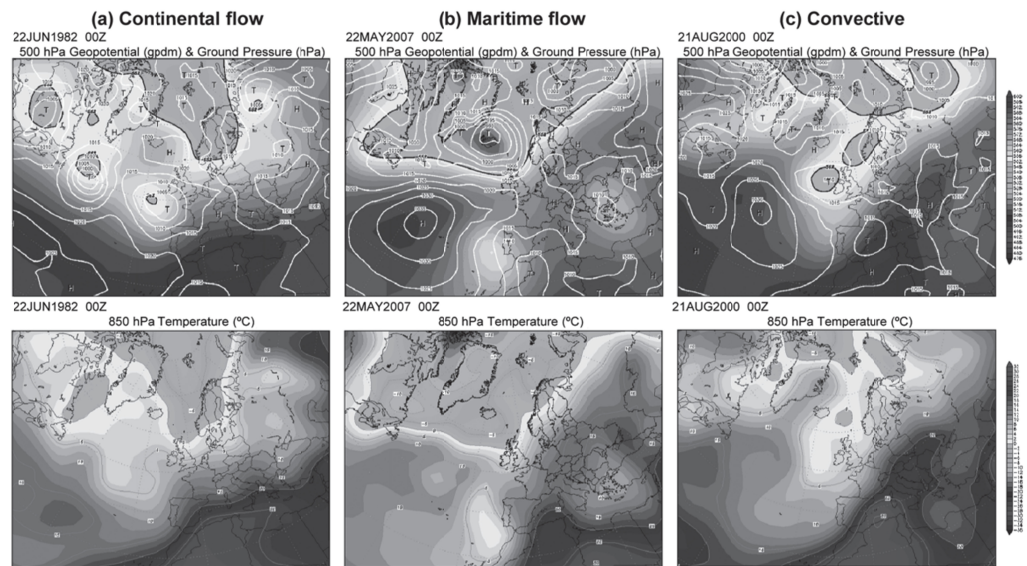


Figure 2. Examples of the classified synoptic situations: (a) continental flow, (b) maritime flow and (c) convective situation; 500 hPa geopotential height and mean sea level pressure (top), and 850 hPa Temperature (bottom) reanalysis data from NCEP (data provided online at www.wetterzentrale.de). In the top panels T represents a low pressure system.

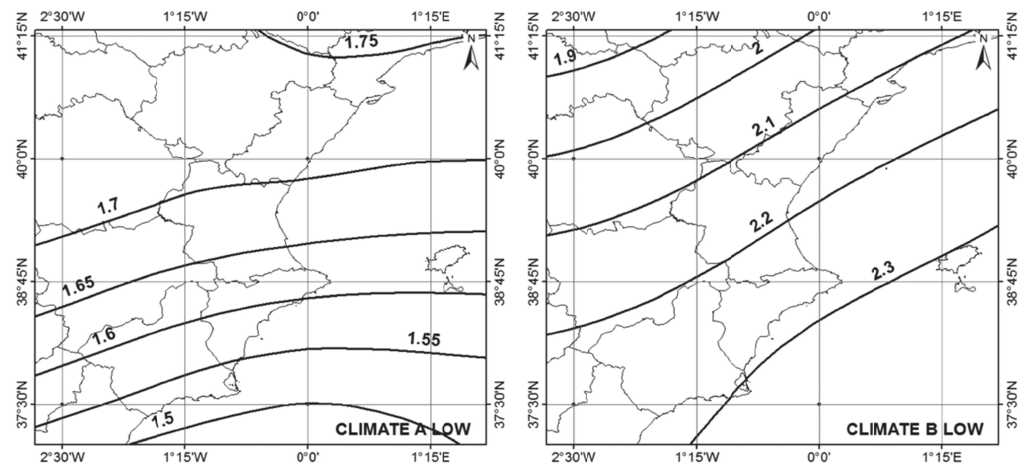


Figure 3. Climatological averages (1980–2008) for term A (left) and term B (right) for low elevations.

Figure 4 shows climatological averages ranged from 2 to 6 (according with Table 1) for each of the HI variants (low, medium and high elevations). The HI variability for low elevations (upper left figure) is very low in the Valencian region, with a mean value around 3.8. For mid elevations (upper centre figure) the HIs are higher, with values from 4 in the North of the region to 4.3 in the South. For the high elevation variant the lowest climatological HI values were obtained, with HI increasing from North to South (averages around 2.8 in the North and lower than 3.2 in the South).

Climatological values calculated from summer data (June to September; fire season) are shown at the bottom of Figure 4. Comparing these figures with the previous, generally they show an increase of the HI values, for example, with mean differences of 0.3 for the low elevation variant. This increase is more noticeable in the South especially for mid elevations, i.e. of 0.7, while the HI climatological averages for the high elevation variant during the summer remain steady around 0.4.

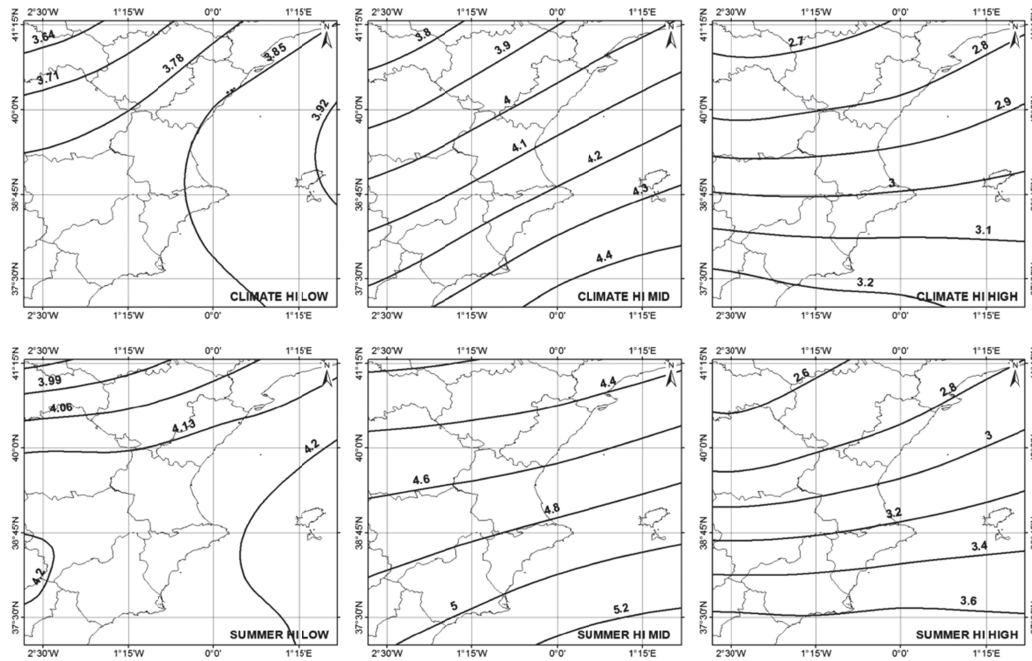


Figure 4. Spatial distribution of the climatological averages for each variant of the HI calculated for the whole period (top) and for summer (bottom).

The highest values for the HI climate means are found mainly in the prelittoal and interior zones of the Southern third, and they correspond to the mid elevation variant. Meanwhile, the areas with the lowest HI are found in mountainous zones in the interior North of the region.

3.2. HI temporal patterns

We analysed the interannual evolution and the mean monthly trend for the HI and for the *A* and *B* components in the NCEP/NCAR reanalysis data cells that contain information about the Valencia region (2 × 2, 2 × 3 and 3 × 3, see Figure 1).

Figure 5 presents the results of the interannual evolution of annual-means and the linear regression of these data at the three elevations studied. As cell 2 × 2 does not contain topographical altitudes under 305 m, it was eliminated from the low level variant analysis. The figure shows a general trend towards increasing the HI in the whole study period (29 years). Moreover, as in the spatial study, it can be seen that during the whole period analysed, the cell 3 × 3 which corresponds to the South of the region contains always larger annual-means for the mid and high elevation variants than the other two cells. Values in cell 3 × 3 are followed by those in cell 2 × 3, with the smallest annual-means contained in cell 2 × 2 which covers a very small portion of the region and corresponds to the West part. The HI annual-means at low elevations are then similar in cells 2 × 3 and 3 × 3, with slightly higher values observed in cell 3 × 3 up to 1990 and in cell 2 × 3 from

1990 on. Both for low and at high elevations, term *A* shows a very slight interannual tendency to decrease or remain more or less constant; thus, the interannual increase in the HI is determined by the increase in the *B* term, indicating a decrease in the humidity during the time period analysed. The mid elevation variant of the HI is the one in which the trend towards higher HI values is seen more clearly since the interannual evolution for these regions tends to show an increase both in the stability and in the humidity term, although slightly less so for the stability term.

Analogously, the mean monthly values for the full study period for terms *A* and *B* and the overall HI and for each of the three elevation variants (see Figure 6) show that, in general, the common trend during an average year is minimum values during the winter months, and that these minimum values progressively increase from the beginning of spring until they register maximum values in the mid-summer months of July and August, when they again begin to descend towards winter values.

If instead of the averaged annual trend we analyse the possible values of each term in the different variants of the HI, we find that the mean monthly humidity term *B* presents a similar value at both low and mid elevations. In contrast, the mean monthly HI value is higher at mid than at low elevations. This difference must therefore be associated with the stability term *A*, which shows considerably higher averages at mid elevations during the summer months in particular. The mean monthly HI values for the mid elevation variant in June, July and August are

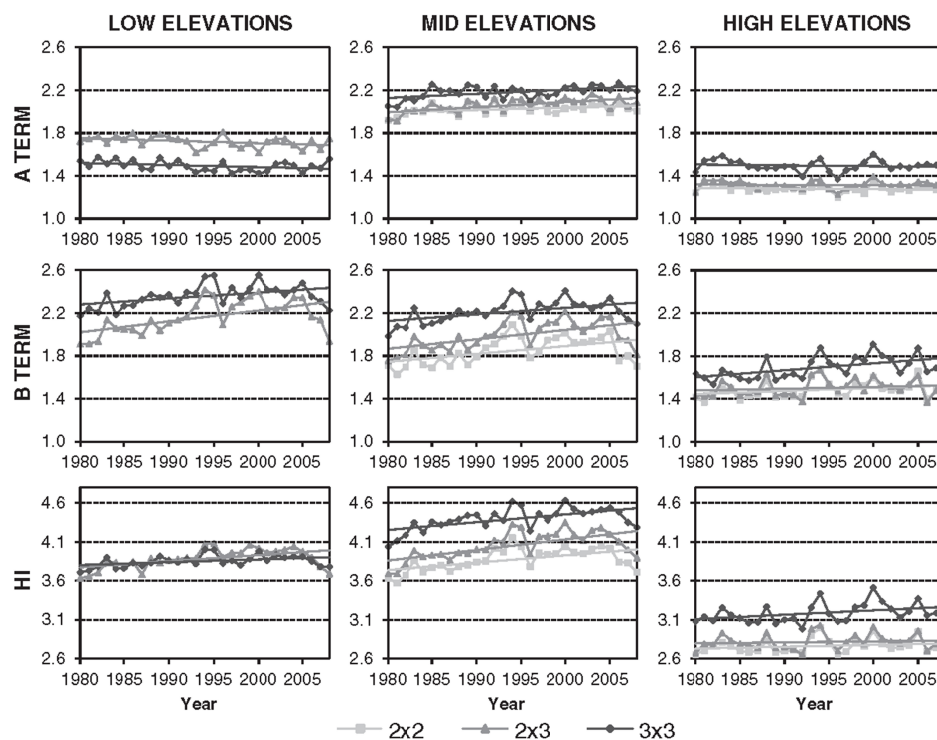


Figure 5. Interannual evolution of terms *A* and *B* and of the HI for the three elevations studied.

greater than or equal to 5 indicating a high risk of developing plume-dominated fires. The lowest mean monthly HI values are registered at high elevations due mainly to the lower values of the humidity term *B*.

This information can be used as a reference tool to interpret and evaluate HI observations and predictions in the study area by comparing them with the climatological values.

3.3. Spatial and temporal patterns in extreme events

Shown below are the results of the temporal and spatial analysis for the cases in which the HI presents extreme values, i.e. $HI = 5$ or $HI = 6$, corresponding to a moderate or high risk of developing plume-dominated wildfires. These results include the average annual number of extreme events and mean monthly number of extreme events calculated for the three cells covering the Valencia region for the temporal analysis and the annual means for the spatial patterns.

Figure 7 shows the interannual extreme event number for the three variants of the HI. The highest annual number of moderate or high HI events is found at mid elevations, with a mean annual value, calculated as the average of the number of annual events, of 81 and 41 cases, respectively. Those mean values are followed by 71 moderate cases for low elevations; no high ($HI = 6$) events were observed for

this variant during the study period. For high elevations the number of moderate cases is considerably lower, 35 events, and the average number for $HI = 6$ is only 2. Moreover, as observed in the mean annual values during the study period there was a clear tendency for moderate and high HI values to increase for all elevations in the study area, i.e. the number of cases with a moderate or high HI values has increased in recent years.

In the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2007) the future climate change scenarios for the Mediterranean region warn of an intensification of extreme weather phenomena and increased risk situations. In fact, the future climate projections carried out with different models and scenarios (IPCC, 2007) indicate that climate change will imply an increase in the fire risk index due to changes in the different meteorological variables used to calculate it. This increase in fire risk will probably also be accompanied by increases in the frequency, the severity and even the behaviour of wildfires.

The mean monthly number of extreme HI events for the three elevation variants and averaged over the three cells overlapping the Valencia region is shown in Figure 8. Figure 8 shows generally larger number of high index days during the summer months, coinciding with the time of year when the greatest number of forest fires occurs in the

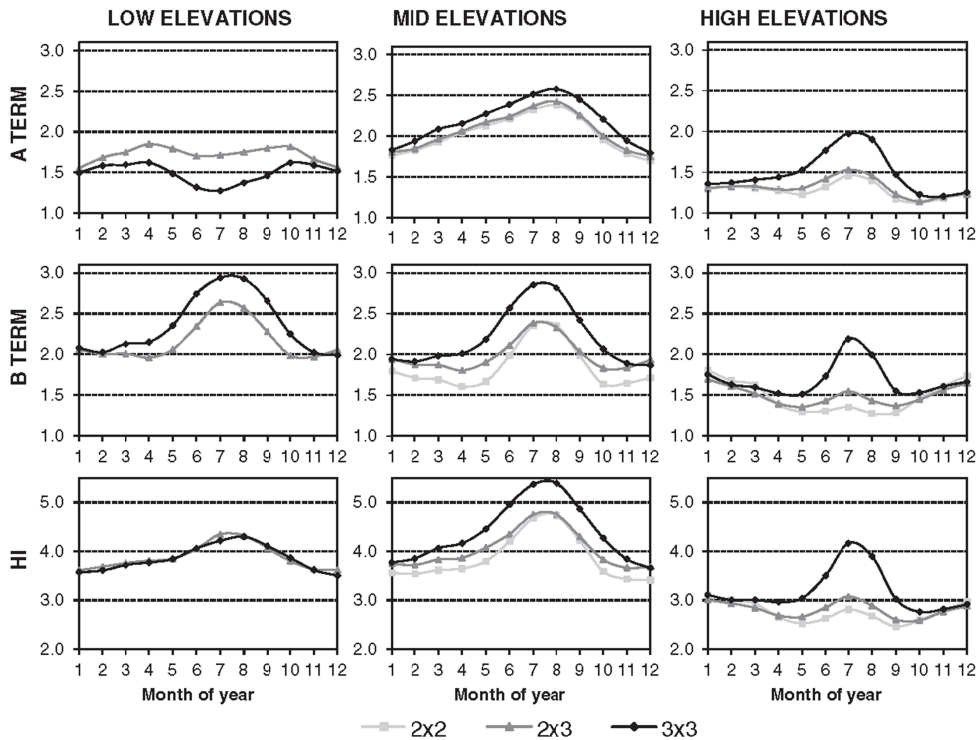


Figure 6. Monthly means evolution of terms A and B and the HI for the three elevations studied. Even though interdiurnal values were calculated, only the monthly means are shown because of the similarities found between both variables.

Valencia region (Millán *et al.*, 1998), and a lower number in winter. For low elevations, the maximum mean monthly number of moderate index days occurs in August, being 12 cases per month. With respect to the mean monthly number for the HI = 6 days, the maximum number of cases for the mid elevation variant take place between July and August, with a mean monthly occurrence of 11, whereas for high elevations, HI = 6 days are only observed in July with a mean number of 1. In general extreme HI events can be found during the whole year and therefore a HI monitoring should be done during the entire year.

A greater incidence of high indices is observed for mid elevations. This is due to the stability term (A) since the mean values found for the humidity term (B) at these elevations are similar to those registered for low elevations. The HI was defined with the idea that diurnal effects (temperature and humidity variability during the diurnal cycle) could be reduced and the frequency of high indices (6) would be low (Haines, 1988). From Figures 7 and 8 we can deduce that the latter premise holds reasonably well for low and high elevations, but not for mid elevations where the average frequency of high indices is quite high, especially in summer. In fact, Mills and McCaw (2010) detected a similar trouble in Australia, with useless values of HI = 5 or HI = 6 nearly every day in summer, which

was solved creating the Continuous HI. As a consequence the information provided to fire agencies in Australia by Bureau of Meteorology forecasters is, in addition to the McArthur Index, the Continuous HI. A similar modification would be evaluated for the study region in a short term.

Finally, Figure 9 shows the spatial maps corresponding to the mean annual number of moderate or high HI days. Keeping in mind the orography of the region (Figure 1) the spatial maps reveal that the highest occurrence of extreme values in the Valencia region takes place on pre-littoral and interior sites, corresponding to the mid-elevation variant, and that these extreme values have a positive North-to-South gradient, i.e. the values increase from North to South. As it was mentioned before, during the study period we have not found any number of HI = 6 for the coastal areas, i.e. the low elevation variant. In general the least number of extreme events was found for the high elevation variant.

3.4. Synoptic analysis associated with HI values

Synoptic weather charts are split into two levels: surface and aloft, in order to perform a pattern analysis for their classification into the three dominant types of synoptic situations: maritime, continental and convective. Surface pattern analysis is performed on the surface isobar lines

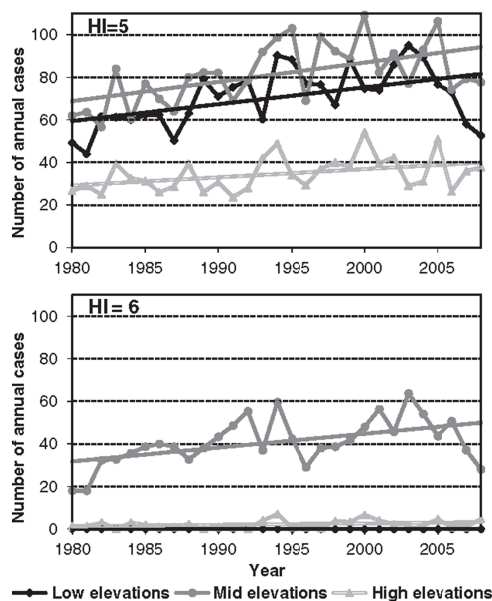


Figure 7. Interannual number of days of HI=5 and 6 for the three elevations studied.

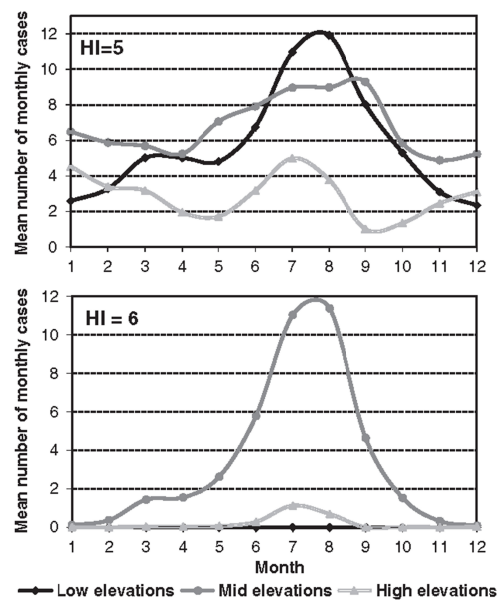


Figure 8. Monthly means number of days of HI=5 and 6 for the three elevations studied.

contained in a typical Mean Sea Level Pressure weather chart, while the aloft pattern analysis takes a combination of geopotential heights in a 500 hPa weather chart and the temperature isolines isotherms in a 850 hPa weather chart. The surface and aloft synoptic weather patterns for each value of the HI in all its variants were analysed because of the considerable differences – determined by altitude – in the HI values in our study and in other studies (Choi *et al.*, 2006; Winkler *et al.*, 2007). Therefore if synoptic weather patterns were analysed from HI daily values for the three variants together, the resulting patterns would not be representative due to the differences between the HI variants.

The graphs in Figure 10 all show a similar trend, with direct proportionality between increases in the HI value and increases in convective situations. Thus, as the HI value increases, there is a decline of the number of cases for which the synoptic situation is determined by either continental or maritime flows. Moreover, it can be seen that the distribution of the synoptic patterns aloft is quite similar to that found at the surface level, except for the maritime flows which are smaller in number.

In general, synoptic situations involving continental flows show the greatest decrease as the HI value increases. The most pronounced decreases are seen for mid and high elevations between HI values 5 and 6. To better explain these results we have analysed the stability (*A*) and the humidity (*B*) components separately, finding that only 17% of the days with moderate HI present the maximum *A* term value of 3, which generally reflects that the rest of the days correspond to a maximum dryness, $B=3$,

which is associated with continental airmass circulations in our study region.

4. Conclusions

A detailed climatological analysis of the HI in the Valencia region (Western Mediterranean Basin) has been carried out using NCEP/NCAR 00 UTC reanalysis data for the last three decades (1980–2008). The resulting information provides an overview of the climatological values at each of the elevations studied for the whole period and for the summer season, and, thus, it can be used as a reference tool to interpret and evaluate HI observations and predictions in the study area. This climatological study contributes important details on the operational use of the HI and, most significantly, it identifies the spatial and temporal patterns present at, and between, the different elevations. The fact that these spatial patterns correspond to differences in elevation signifies that a lot of care should be taken when interpreting the different values. A possible user should assess the HI corresponding to the elevation variant of the location of interest and compare it with the climatological values to interpret the potential fire risk.

The main conclusions of the climatological study are listed below:

- At both low and mid elevations, the HI climatological values in the Valencia region are around 4, although HI can be a little higher (4.3) at some points in the Southern third of the region and a little lower ($\cong 3$) at high elevations. Higher HI values are obtained for the

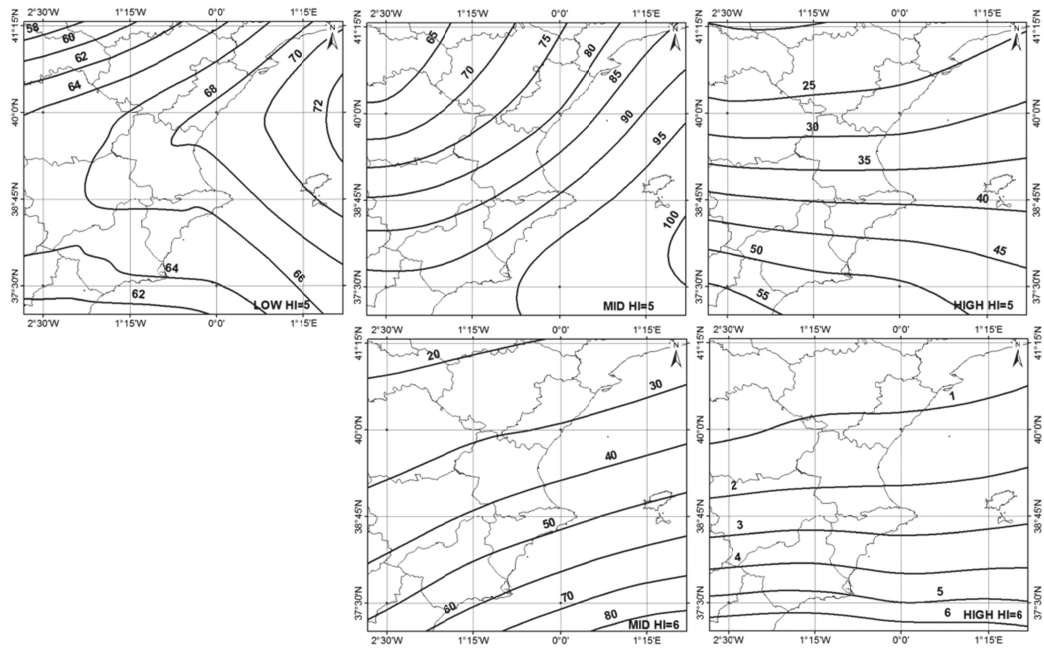


Figure 9. Average annual number of HI = 5 and 6 in the Valencia region for the three elevations.

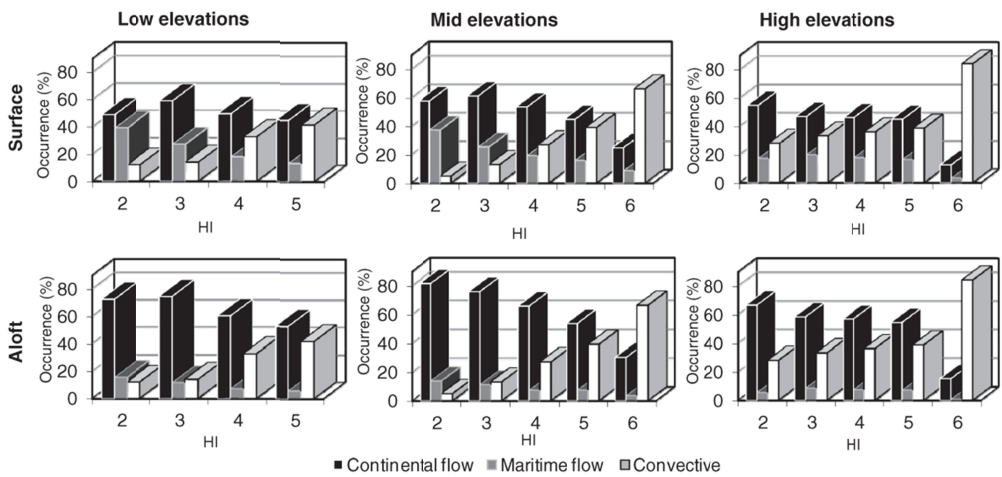


Figure 10. Synoptic classification at the surface (top) and aloft (bottom) of HI values for the three elevations studied.

summer season, with a mean HI of 4.1 for low elevations, between 4.4 and 5 for mid and between 2.8 and 3.5 for high elevations.

• During the study period, both the mean interannual HI values and the number of annual extreme events (5 or 6) show an increasing trend. The highest HI values are registered for mid elevations, although extreme events are also found for the others elevation variants. A trend towards increasing the HI interannual average and the

increase of extreme events is observed during the study period.

• The monthly means of HI values presents maximum values in summer and minimum values in winter. The monthly number of extreme HI (5 and 6) follows a similar annual pattern. The great incidence of high indices observed for mid elevations, previously also observed and proposed by Mills and McCaw (2010), could be due to the term A assessment. A modification of the HI similar

to that proposed by them would be evaluated in the study region in a short term.

- The period of study of fire risk through the HI should be the entire year because extreme HI events can be found throughout the year.
- The synoptic analysis of the different HI values found in our region reveals a direct proportionality between increases in the HI value and convective situations.

The climatology shown in this study could be a useful tool to improve the forest fire risk prediction system. In this sense, studies in relation to forest fires are required, given that climate change scenarios forecast that extreme risk situations will increase in intensity, frequency and extension. The knowledge of the current climate and the difference with the situation in the recent past can help to plan for the future (Ohasi, 2001).

Acknowledgements

We thank NCEP/NCAR for supplying the data necessary for this study. We also thank the CEAM Forest Restoration Department and the Valencia Provincial Consortium of Firefighters for their considerable help. We especially want to thank Mr Igor Gómez, Mr Javier Miró, Mr Eloi Ribeiro and Mr Mark G. Lawrence for their technical assistance and Ms Jacqueline Scheiding for translating the text to English. This study was supported by the Spanish Ministry of Innovation and Science (projects CGL2010-16364, CGL2011-30433-C02 and GRACCIE Consolider-Ingenio 2010; and Dr Nicolás 'Ramón y Cajal' Research Contract) and Generalitat Valenciana (Prometeo/2009/006 FEEDBACKS project). The Instituto Universitario CEAM-UMH is partly supported by the Generalitat Valenciana. The authors declare that there are no conflicts of interest.

References

- Barberà MJ, Nicolás R, Estrela MJ, Valiente JA. 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. In *XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección. Teledetección, Agua y desarrollo sostenible*. Calatayud, 22–25 Septiembre, 293–296. ISBN: 978-84-613-4257-0.
- Barberà MJ, Estrela MJ, Nicolás R, Valiente JA. 2010a. Correlació entre els incendis forestals i l'Índex de Haines a la Comunitat Valenciana. Anàlisi dels incendis de Xàtiva i Simat de 2005. In *II Jornades de Meteorologia i Climatologia de la Mediterrània Occidental*. Valencia, 11–12 Març.
- Barberà MJ, Nicolás R, Estrela MJ, Valiente JA. 2010b. Analysing wild fires in Valencia with the Haines Index and monitoring the natural regeneration with MODIS data. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Recent Advances in Quantitative Remote Sensing: RAQRS'III*, Torrent, Spain.
- Brotak E. 1980. A comparison of the meteorological conditions associated with major wildland fires in the United States, Canada, and Australia. *J. Appl. Meteorol.* **19**: 474–476.
- Brotak E, Reifsnyder WE. 1977. An investigation of the synoptic situations associated with major wildland fires. *J. Appl. Meteorol.* **16**: 867–870.
- Choi G, Kim J, Won MS. 2006. Spatial patterns and temporal variability of the Haines Index related to the wildland fire growth potential over the Korean Peninsula. *J. Korean Geogr. Soc.* **41**(2): 168–187.
- Croft PJ, Watts M, Potter BE, Reed A. 2002a. Creating a Haines Index climatology for the United States, Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In *25th Conference on Agricultural and Forest Meteorology and 12th Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with A&WMA and Fourth Symposium on the Urban Environment*. Norfolk, VA.
- Croft PJ, Potter BE, Reed A. 2002b. The analysis of the Haines Index climatology for the eastern United States, Alaska, Hawaii, and Puerto Rico. In *4th Symposium on Fire and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, Reno, NV, 242–246.
- Deeming JE, Burgan RE, Cohen JD. 1977. The National Fire Danger Rating System-1978. USDA Forest Service, General Technical Report INT-39, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Dessler AE, Davis SM. 2010. Trends in tropospheric humidity from reanalysis systems. *J. Geophys. Res.* **115**: D19–D16.
- Doty B. 1995. *The grid analysis and display system*. Retrieved September 10, 1995. <http://www.iges.org/igrads/gadoc/index.html>.
- Elliott WP, Gaffen DJ. 1991. On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **72**: 1507–1520.
- Elliott WP, Ross RJ, Schwanz B. 1998. Effects on climate records of changes in National Weather Service humidity processing procedures. *J. Clim.* **11**: 2424–2436.
- Estrela MJ, Peñarocha D, Millán M. 2000. Multi-annual drought episodes in the Mediterranean (Valencia region) from 1950–1996. A spatio-temporal analysis. *Int. J. Climatol.* **20**: 1599–1618.
- Gaffen DJ, Sargent MA, Habermann RE, Lanzante JR. 2000. Sensitivity of tropospheric and stratospheric temperature trends to radiosonde data quality. *J. Clim.* **13**: 1776–1796.
- Haines DA. 1988. A lower atmosphere severity index for wildfire fires. *Nat. Weather Dig.* **13**(2): 23–27.
- IPCC. 2007. In *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Parry ML, Canziani OF, Palutikof JP, van der Linden PJ, Hanson CE (eds). Cambridge University Press: Cambridge, UK, 976.
- Jenkins MA. 2002. An examination of the sensitivity of numerically simulated wildfires to low-level atmospheric stability and moisture, and the consequences for the Haines Index. *Int. J. Wildland Fire* **11**(4): 213–232.
- Jenkins MA. 2004. Investigating the Haines Index using parcel model theory. *Int. J. Wildland Fire* **13**(3): 297–309.
- Jones KM, Maxwell C. 1998. A seasonal Haines Index climatology for New Mexico and the significance of its diurnal variations in the elevated Southwest. *Preprints of the Second Symposium on Fire and Forest Meteorology*. American Meteorological Society, Boston, MA, 127–130.
- Kalnay E, Kananius M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Leetmaa A, Reynolds B, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo KC, Ropelewski C, Wang J, Roy J, Dennis J. 1996. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **77**: 437–471.
- Lawrence MG. 2005. The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **86**: 225–233.
- Long M. 2006. A climatology of extreme fire weather days in Victoria. *Aust. Meteorol. Mag.* **55**: 3–18.
- McArthur AG. 1967. Fire behaviour in eucalypt forest. *Commun. Aust. For. Timber Bur. Leaflet* **107**: 25.
- McCaw L, Marchetti P, Elliot G, Reader G. 2007. Bushfire weather climatology of the Haines Index in south-western Australia. *Aust. Meteorol. Mag.* **56**: 75–80.
- Millán M, Estrela MJ, Badenas C. 1998. Meteorological processes relevant to forest fire dynamics on the Spanish Mediterranean Coast. *J. Appl. Meteorol.* **37**: 83–100.
- Millán M, Estrela MJ, Miró J. 2005. Rainfall components: variability and spatial distribution in a Mediterranean area (Valencia region). *J. Clim.* **18**: 2682–2705.
- Mills G, McCaw L. 2010. Atmospheric stability environments and fire weather in Australia – extending the Haines Index. Technical Report No. 20. The Centre for Australian Weather and Climate Research, Melbourne, Australia.
- Mokoric M, Kalin L. 2006. Evaluation of meteorological index forest fire protection in Croatia. *For. Ecol. Manage.* **234**: S70.
- Nicóls R, Valiente JA, Barberà MJ, Caselles V. 2014. Land surface air temperature retrieval from EOS-MODIS images. *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.* **11**(8): 1380–1384.

- Obasi GOP. 2001. *WMO-No 920, WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2001*. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.
- Oliver MA, Webster R. 1990. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. *Int. J. Geogr. Inf. Syst.* **4**: 313–32.
- Paltridge G, Arking A, Pook M. 2009. Trends in middle- and upper-level tropospheric humidity from NCEP reanalysis data. *Theor. Appl. Climatol.* **98**(3–4): 351–359.
- Peace M, McCaw L, Mills G. 2012. Meteorological dynamics in a fire environment: a case study of the Layman prescribed burn in Western Australia. *Aust. Meteorol. Oceanogr.* **1**: 127–141.
- Potter BE. 1996. Atmospheric properties associated with large wildfires. *Int. J. Wildland Fire* **6**(2): 71–76.
- Potter BE, Winkler JA, Wilhelm DF, Shadbolt RP, Bian X. 2008. Computing the low-elevation variant of the Haines Index for fire weather forecasts. *Weather Forecast.* **23**(1): 159–167.
- Quilez R. 2007. Influencia del índice de Haines en la evolución del incendio forestal ocurrido en Xàtiva (Valencia) España, el 22 de junio de 2005. In *4ª Conferencia Internacional Sobre Incendios Forestales, Wildfire 2007*. Sevilla, España.
- Reyes HW, Alden S. 1998. Use of the Haines Index to evaluate large fire potential for interior Alaska. In *Proceedings of the Second Conference on Fire and Forest Meteorology*, American Meteorological Society, Phoenix, AZ, 131.
- Trouet V, Taylor AH, Carleton AM, Skinner CN. 2009. Interannual variations in fire weather, fire extent, and synoptic-scale circulation patterns in northern California and Oregon. *Theor. Appl. Climatol.* **95**: 349–360.
- Turner JA, Lawson BD. 1978. Weather in the Canadian forest fire danger rating system. A user guide to national standards and practices. Information Report BC-X-177. Environment Canada, Pacific Forest Research Centre, Victoria, BC, Canada, 40.
- Vallejo VR, Allen EB, Aronson J, Pausas JG, Cortina J, Gutiérrez JR. 2012. Restoration of Mediterranean-type woodlands and shrublands. In *Restoration Ecology: The New Frontier*, Van Andel J, Aronson J (eds), Blackwell Publishing Ltd: Oxford, UK, 130–144.
- Van Wagner CE, Pickett TL. 1985. Equations and FORTRAN program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. Forestry Technical Report 33, Canadian Forest Service, Ottawa, ON.
- Vélez R. 1982. *Manual de Predicción del Peligro de Incendios Forestales*. ICONA: Madrid.
- Weber RO, Dold JW. 2006. Linking landscape fires and local meteorology – a short review. *JSMI Int. J. Ser. B.* **49**(3): 597–593.
- Worth P, Ochoa R. 1993. The evaluation of Idaho wildfire growth using the Haines Index. *Weather Forecast.* **8**(2): 223–234.
- Werth J, Werth P. 1998. Haines index climatology for the Western United States. *Fire Manage. Notes* **58**: 8–17.
- Winkler JA. 2004. The impact of technology on in situ atmospheric observations and climate science. In *Geography and Technology*, Brun S, Cutter S, Harrington JW (eds), Kluwer Academic Publishers: New York, NY, 461–490.
- Winkler JA, Potter BE, Wilhelm DF, Shadbolt RP, Piromsopa K, Bian X. 2007. Climatological and statistical characteristics of the Haines Index for North America. *Int. J. Wildland Fire* **16**(2): 139–152.