



# 7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

**Gestión del monte: servicios  
ambientales y bioeconomía**

26 - 30 junio 2017 | Plasencia  
Cáceres, Extremadura

---

---

7CFE01-404

---

---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
**Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017**  
**ISBN 978-84-941695-2-6**

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## Análisis y desarrollo de herramientas para la gestión de incendios forestales en territorios con alta probabilidad de ignición. El caso de la "Marine Corps Base Camp Pendleton"

BLANCO MARTÍNEZ, J.<sup>1</sup>, DIEZ VIZCAÍNO, F.J. <sup>1</sup>, MONEDERO TIMÓN, S.<sup>1</sup>, PÉREZ SUÁREZ, J.R.<sup>1</sup> y RAMÍREZ CISNEROS, J. <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tecnosylva, SL.

### Resumen

Estudio orientado a la evaluación del riesgo de incendios forestales en la base del cuerpo de los marines de Camp Pendleton por medio de la identificación, definición y análisis de los diferentes modelos de combustibles presentes en el área de estudio siguiendo la metodología de SCOTT & BURGAN (2005), con el que se ha conseguido reducir y gestionar la aparición de nuevos incendios y moderar la su incidencia e impacto por medio de la combinación de técnicas específicas (análisis raster o vectorial, análisis de imágenes orientado a objetos y análisis de librerías de datos) y de diversa naturaleza (espectral, altimétrica o meteorológica) que permiten identificar escenarios adversos en la lucha contra el fuego así como definir parámetros de actuación y prevención en su gestión en base al análisis de la ventana fenológica inter/intra-anual. Con todo se ha obtenido un cuantificador del riesgo que facilita el manejo de las prácticas militares causantes de un elevado número de incendios forestales.

### Palabras clave

Prevención, ventana fenológica, modelos de combustible, simulación, fire danger rate.

### 1. Introducción

La base de los marines Camp Pendleton, ubicada en el sector noroeste del Condado de San Diego, se configura como un terreno vulnerable y delicado donde la aparición de focos de ignición es muy frecuente y continua en el espacio-tiempo. Si bien la base militar tiene un desarrollo urbano-humano reducido, las condiciones de su vegetación (donde predomina el chaparral californiano, una comunidad arbórea mediterránea semiárida más susceptible y adaptada al fuego (HANES, 1988)) así como la dinámica de actividades que se desarrollan en su territorio (pruebas de tiro y actividades altamente inflamables llevadas a cabo por los marines) ponen de manifiesto la evidencia de un alto riesgo de quema cuyo control y prevención se convierte en un factor fundamental.

Se trata, pues, de un espacio donde las condiciones adversas que favorecen la aparición de incendios forestales se ven duplicadas respecto a su entorno inmediato por lo que las labores y esfuerzos de atención ante estas complejas situaciones deben ser potenciadas.

### 2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es llevar a cabo una evaluación exhaustiva del riesgo de incendios forestales en la base del cuerpo de los marines de Camp Pendleton y, consecuencia de ello, generar y desarrollar herramientas para la gestión de dichos periodos de quema.

### 3. Metodología

Para cumplir el objetivo principal, se plantea:

- A. La preparación, desarrollo y análisis de una cartografía ex-novo donde se representen e identifiquen los diferentes modelos de combustibles existentes en el área de estudio.
- B. El análisis del dinamismo de los modelos de combustible por medio del estudio de su dinámica fenológica así como del contenido de humedad del combustible vivo en las diferentes especies vegetales, con el que se parametriza el estado vegetal actual en comparación con la tendencia de comportamiento histórico tanto anual como mensual.
- C. El análisis de la dinámica de recuperación del terreno tras periodos de quema de diversa duración en el tiempo, lo que permite parametrizar comportamientos y respuestas de regeneración que faciliten futuras simulaciones así como pautas en base a las que predecir el avance del fuego.
- D. Desarrollo de una herramienta/calculadora con la que medir y reflejar el riesgo de incendio real existente en el terreno de modo que se consiga reducir y gestionar la aparición de nuevos incendios y moderar la afectación perjudicial de los mismos.

Conocer la composición física del terreno, su estructura, distribución y combinación así como la dinámica fenológica de las diferentes formaciones vegetales, se convierte en un elemento/factor clave a la hora de entender el comportamiento, aparición y evolución de los incendios forestales en la base de los marines de Camp Pendleton. Con todo, se plantea un escenario multitarea donde se combinan diferentes pasos y procesos específicos de diversa naturaleza orientados a la identificación, definición y análisis de los diferentes modelos de combustibles presentes en el área de estudio siguiendo la metodología de SCOTT & BURGAN (2005), los cuales actúan de base para los restantes análisis estadísticos a realizar.

A continuación se detallan las líneas metodológicas de trabajo que definen y marcan el progreso y ejecución de las diferentes tareas hasta alcanzar los cuatro objetivos individuales fijados.

#### A. Generación de una cartografía ex-novo de modelos de combustible

La creación y diseño de la nueva cartografía de combustibles partía de un escenario virgen, por lo que el importante esfuerzo cartográfico para conseguir diseñar las nuevas teselas con las que se definen “zonas de comportamiento combustible homogéneo” implicaba el manejo de sofisticadas tareas de teledetección, donde se recurre al uso de escenas satelitales y ortoimágenes de alta resolución a las que se les aplican diferentes técnicas de procesamiento en aras de soportar, de forma coherente, un análisis de imágenes orientado a objetos (OBIA). Tras este, se hace necesario llevar a cabo la caracterización de teselas en modelos de combustibles utilizando para ello información certera tomada, tanto en gabinete como en campo, en base a criterio experto para posteriormente llevar a cabo un análisis estadístico con el que generar reglas de comportamiento de cada combustible de forma individual (Figura 1).

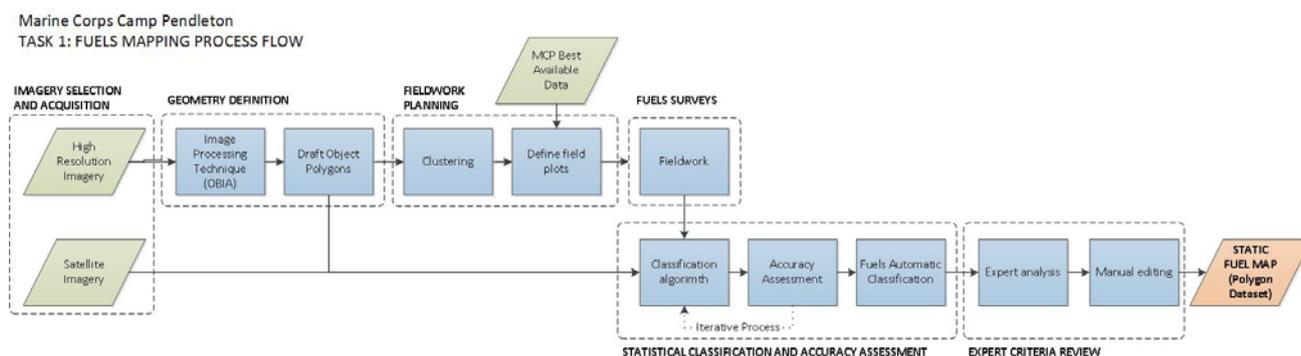


Figura1. Diagrama resumen del proceso de elaboración del mapa de modelos de combustible en Camp Pendleton

La elaboración de esta nueva cartografía implica, pues, ejecutar diferentes pasos que van desde la adquisición/preparación minuciosa de los datos a utilizar hasta llegar a la validación/verificación de los resultados. A continuación se especifican los principales aspectos metodológicos imprescindibles a seguir para alcanzar este primer objetivo.

#### A.1. Adquisición/preparación de los datos

Para la elaboración de la nueva cartografía de modelos de combustibles se hace imprescindible seleccionar y adquirir diferentes escenas/imágenes con información espectral. El uso de imágenes de buena calidad en lo que a su resolución espacial y espectral respecta, se convierte en el factor fundamental “base” desde el que monitorizar el proceso de preparación de la cartografía de modelos de combustible. En la fragmentación de la base de los marines Camp Pendleton el origen de los datos de trabajo ha sido dual, usándose dos fuentes de datos con diferente información espacial y espectral:

- NAIP CIR orthoimagery (National Agriculture Imagery Program-Color Infra-Red): conjunto de ortoimágenes del 2012 cuya responsabilidad principal es la de definir la geometría de las teselas de modelos de combustibles en base a las peculiaridades que la resolución espacial y espectral de cada imagen ofrecen en cada zona del terreno. Poseen una excelente resolución espacial (1 metro) y una buena resolución espectral (información en la región del visible y del infrarrojo cercano).
- Datos L8: Conjunto de escenas satelitales encargadas de definir la firma espectral de cada uno de los polígonos en que se fragmenta el terreno. Poseen una resolución espacial media buena (15 metros mediante fusión con el pancromático) y una excelente resolución espectral (8 bandas espectral distribuidas en la región del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio).

En el caso de las escenas/imágenes con información espectral, se hace necesario (previo a su adquisición) seleccionar aquellas en las que las condiciones atmosféricas sean lo más favorables posibles, de forma que se reduzcan las interferencias causadas por las nubes; una vez hecho esto, se realiza la descarga de todas las imágenes, siendo todas ellas sometidas a una completa corrección espectral (mediante el la aplicación del método del objeto oscuro de CHAVEZ, 1989) así como topográfica.

De manera conjunta a esta selección, adquisición y descarga de las escenas satelitales, se hace necesario adquirir y preparar otras fuentes de datos adicionales que servirán de complemento en las tareas de elaboración cartográfica:

- Modelo digital del terreno (altitud) y sus productos derivados: aspect (orientaciones) y slope (pendientes)
- Cartografía interna con información sobre operaciones y pruebas en el interior de la base de los marines, a partir de las que poder acotar los espacios con un mayor riesgo de verse afectados por factores de ignición artificiales

#### A.2. Definición geométrica de los modelos de combustibles

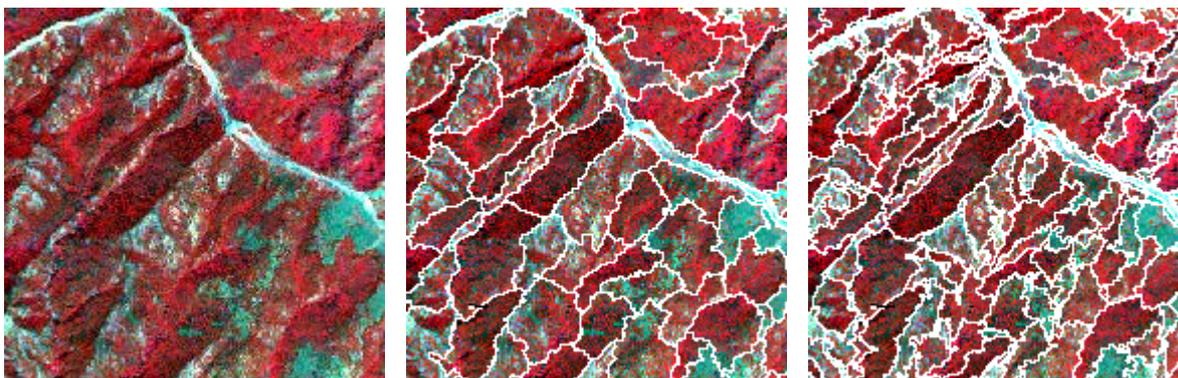
La generación de una nueva cartografía de modelos de combustible pasa por fragmentar el terreno de la base de marines Camp Pendleton en numerosas teselas de comportamiento espectral homogéneo, para luego poder asignar/agrupar dichas en alguna de las categorías de modelos de combustibles que se pretenden identificar. Para conseguir esto, se pone en práctica un análisis de imágenes orientado a objetos (OBIA).

El OBIA (Análisis de Imágenes Orientado a Objetos) es una técnica de clasificación centrada en criterios basados en el contexto espacial, empleada recientemente en el análisis de imágenes satelitales. Esta metodología de clasificación, de relativa actualidad si se compara con el análisis tradicional de la imagen a nivel píxel (análisis de los valores espectrales recogido en cada uno de ellos), utiliza y gestiona la información espectral que se recoge a nivel celda no de forma individual si no como resultado de un conjunto de píxeles llamados objetos. Estos objetos de la imagen son, pues, grupos de píxeles cuyo comportamiento espectral muestra similitudes o rasgos definitorios próximos entre sí en relación al color, la forma y la textura, frente al comportamiento siempre dispar de sus vecinos más próximos (BLASCHKE, 2010).

El proceso de fragmentación de la imagen en diferentes objetos se conoce como segmentación. Esta permite dividir una escena/imagen en “objetos primarios” (teselas) cuyas geometrías constituyen la base inicial esencial en el proceso de clasificación de la totalidad de la imagen. La segmentación se constituye, de este modo, como un paso crítico en el proceso de fragmentación del territorio cuyo análisis posterior es imprescindible. Uno de los principales motivos para llevarla a cabo es que la mayor parte de los datos de la imagen presentan una textura característica, que es siempre obviada en las clasificaciones tradicionales realizadas píxel a píxel. La segmentación se controla por medio de la escala, el color y la forma, cuyos datos de entrada pueden ser parametrizados por medio de la supervisión basada en el control experto:

- Escala: se controla la heterogeneidad máxima permitida para cada segmento.
- Forma y color: la suma de ambos parámetros determina la cantidad de información de color y forma que se empleará en el proceso de segmentación.

A valores más altos de compactación se crearán segmentos más pequeños y más compactos, mientras que un valor más alto en el suavizado lleva a segmentos optimizados para tener bordes lisos, más acordes con los objetos naturales. El algoritmo empleado para realizar la segmentación es “Multiresolution Segmentation”, el cual, genera objetos tan grandes como sea posible y tan detallados como sea necesario, empleando para ello el máximo color disponible manteniendo a su vez la forma tan alta como sea necesario, lo que permite obtener objetos con el borde óptimo (suavidad/compactidad). A continuación se muestran algunos ejemplos de segmentación (Figura 2).



*Figura2. Pequeñas muestras del detalle de las teselas obtenidas de la aplicación del OBIA en Camp Pendleton*

La eficiencia de los resultados de la segmentación está estrechamente relacionada y condicionada por la calidad de las escenas utilizadas en el proceso de partición de la imagen. Así pues, será imprescindible contar con información espectral variada y de alta resolución espacial con el fin de asegurar el éxito de la segmentación.

### A.3. Toma de datos en campo

Una vez segmentado el área de estudio, es necesario (previo a la clasificación de las teselas en algunas de las tipologías de modelos de combustible) llevar a cabo la planificación de la toma de datos/verdad terreno, tanto en campo como en gabinete, en todas y cada una de las diferentes categorías de modelos de combustible a identificar en el base de los marines Camp Pendleton.

La planificación del trabajo de campo requiere de:

- Seleccionar/definir los diferentes criterios y parámetros a usar (elección de la metodología de clasificación de SCOTT & BURGAN, 2005 y preparación de una codificación y descripción detallada de cada modelo de combustible para obtener una caracterización completa de los mismos)
- Seleccionar las herramientas e instrumentos a utilizar: Receptor GPS Bluetooth Universal XGPS150A con precisión métrica, ASUS Transformer Book T100, ArcGIS10.2 y una cámara panorámica
- Localizar un número estadísticamente representativo de teselas de verdad terreno de cada categoría

En aras de conseguir una muestra de información significativa y representativa de la verdad existente en el terreno, se prepara una clasificación no supervisada donde se definen 15 categorías de comportamiento homogéneo. En este tipo de clasificación todas y cada una de las teselas son asignadas a una misma clase si su comportamiento espectral es homogéneo (MATHER, 1998). En base a esta clusterización, se selecciona una muestra aleatoria de segmentos los cuales serán usados como base en el levantamiento de parcelas de campo.

1644 muestras de verdad terreno fueron tomadas en campo durante 3 meses de trabajo, repartidas en 9 categorías de modelos de combustibles de la familia de SCOTT & BURGAN (Figura 3).

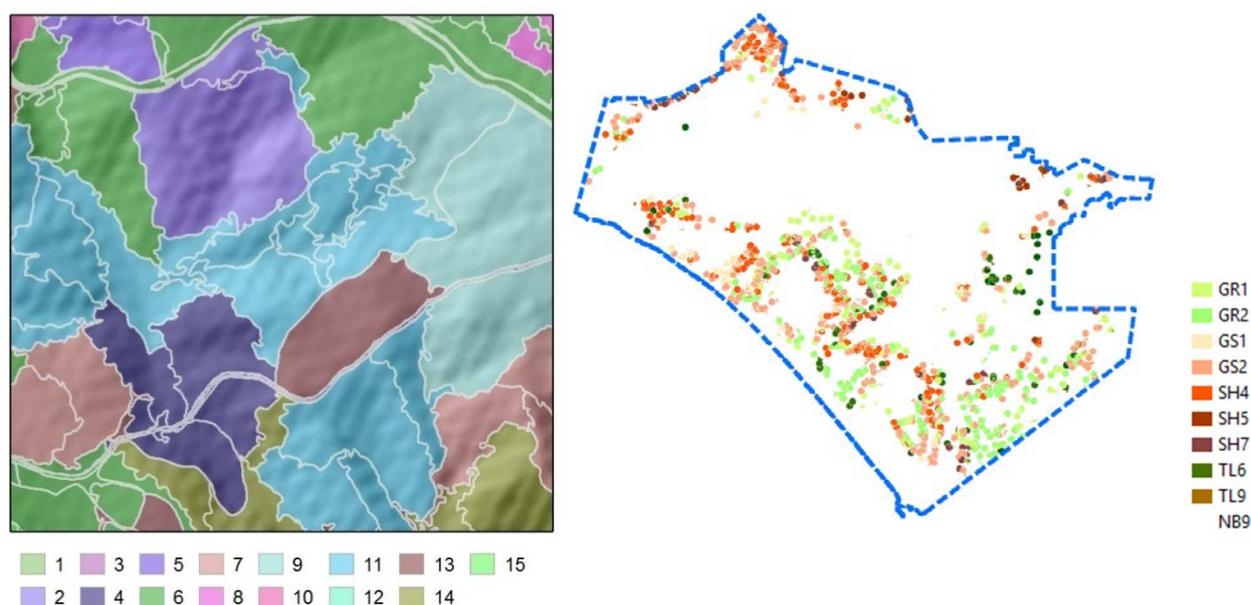


Figura3. Detalle de la clusterización realizada (izquierda) y localización de las parcelas de verdad terreno levantadas en Camp Pendleton y distribuidas por modelos de combustible (derecha)

Toda esta información de combustibles recogida durante el trabajo de campo es utilizada (una vez recopilada, preparada y analizada) a la hora de calibrar los algoritmos de asignación de cada

modelo de combustible durante el procesado de las imágenes. También es utilizado como herramienta de apoyo en el proceso de evaluación de la precisión durante las tareas de validación estadística.

#### A.4. Clasificación/revisión experta

El siguiente paso consiste en clasificar cada una de las teselas derivadas del uso del OBIA en alguna de las categorías de modelos de combustible a identificar por medio del uso de un clasificador en árbol. El clasificador en árbol es una técnica de clasificación supervisada (método Classification And Regression Trees (CRT)) destinado al ensayo de distintos algoritmos así como diferentes estrategias de clasificación aplicables a la adquisición de resultados con el uso, en este caso, del software SPSS.

Los clasificadores de árbol permiten predecir variables cualitativas (como es el caso de los modelos de combustible) basándose en reglas de decisión a partir de variables (información radiométrica e información cartográfica empleada en el proceso de clasificación) de entrada, que pueden ser tanto cuantitativas como cualitativas. Se componen de ramas (que representan los atributos o variables), y de hojas (que representan la decisión final, en este caso el modelo seleccionado). El árbol comienza en el tronco y sigue por las diferentes ramas hasta alcanzar una hoja. Los puntos donde se separa una rama, se denominan nodos, y el último de todos ellos se denomina nodo terminal.

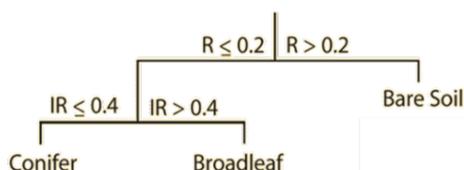


Figura4. Ejemplo simple de un clasificador en árbol

En este proceso de agrupación de las diferentes teselas en algunas de las categorías de modelos de combustibles a identificar, buena parte de los datos que se han ido recopilando fueron introducidos como variables independientes en el análisis estadístico del clasificador en árbol:

- Información espectral perteneciente a las bandas que recogen datos en la región del visible (RGB), NIR (Near Infrared) y SWIR (Short Wave Infrared), en tres imágenes Landsat 8.
- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)
- La información relativa a las 15 clases generadas en la fase de planificación de campo
- Datos de orientación, pendientes y elevaciones
- Tres zonas fisiológicas en las que se divide la zona de trabajo (Costeras, Montañas, Valles)
- Información sobre el número de incendios desde 1972, así como el año del último incendio

La puesta en práctica de los clasificadores en árbol conlleva la selección de un algoritmo de clasificación previo. En base a las experiencias que el equipo ha tenido en todos sus trabajos en los que ha empleado SPSS se seleccionan el método Classification And Regression Trees (CRT), es decir árboles de clasificación y regresión. Se trata de un método recurrente de partición que va construyendo árboles dicotómicos en función del valor de una variable en cada nodo, los cuales crece en profundidad hasta que la homogeneidad de los nodos se maximiza, definiéndose ahora sí todos los nodos terminales. Los métodos de árbol requieren una interacción elevada del experto analista, lo que al mismo tiempo permite un análisis muy detallado y una identificación de nodos de asignación menos fiables de lo esperado.

Como garante de la buena calidad del método, se aplica una validación cruzada con la que se evalúa la predicción del análisis estadístico una vez generaliza más allá de la verdad terreno a cada modelo de combustible (Tabla 1, Tabla 2).

Así, para alcanzar la clasificación más óptima que permita tipificar los diferentes modelos de combustible con solvencia, se ejecuta un análisis estadístico dividido en dos grandes pasos:

1. Análisis agrupado de los modelos de combustible en grandes clases de comportamiento homogéneo (herbáceas, arbustos, leñosos y terreno no quemable), donde se obtiene una precisión de acierto alta (en concreto 86.9%) , mayor del 85% (CHUVIECO, 2002), con un riesgo bajo en la validación cruzada. Este método permite sentar una primera fragmentación del terreno ubicando las teselas derivadas del OBIA en alguno de estos grandes grupos a la espera de ser desagregados internamente, en pasos posteriores, en categorías más precisas y detalladas.
2. Análisis detallado de los diferentes modelos de combustible, de donde se extraen las precisiones de acierto individuales para cada una de las categorías de análisis. La precisión obtenida fue superior al 70%, una precisión de acierto considerada alta cuando la cercanía y similitud entre varios de los modelos a caracterizar está muy pronunciada (situación que se da entre todos los subgrupos de una misma gran categoría). Gracias a la flexibilidad de los clasificadores en árbol, estos resultados pueden ser continuamente mejorados mediante la consecución de un análisis de expertos

Tabla 1. Matriz de clasificación obtenida en el análisis estadístico de Camp Pendleton

Observed	Predicted											Percent correct
	GR1	GR2	GS1	GS2	NB8	NB9	SH4	SH5	SH7	TL6	TL9	
GR1	85	30	0	10	0	1	0	0	0	0	1	66.9 %
GR2	9	172	1	35	0	1	0	0	0	1	1	78.2 %
GS1	7	9	20	38	0	0	2	0	1	0	0	26.0 %
GS2	9	36	1	209	0	0	11	0	0	9	5	74.6 %
NB8	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	100.0 %
NB9	2	7	0	0	0	188	0	0	0	0	0	95.4 %
SH4	4	4	1	43	0	0	137	0	0	6	4	68.8 %
SH5	0	1	0	4	0	0	11	31	0	1	5	58.5 %
SH7	0	0	0	8	0	0	20	1	9	5	12	16.4 %
TL6	0	2	0	8	0	0	3	0	0	154	1	91.7 %
TL9	0	2	0	8	0	0	13	4	0	27	87	61.7 %
Overall Percentage	7.6 %	17.3 %	1.5 %	23.9 %	0.3 %	12.5 %	12.9 %	2.4 %	0.7 %	13.3 %	7.6 %	72.1 %

Tabla 2. Precisión global y de validación cruzada obtenida en el análisis estadístico de Camp Pendleton

Method	Estimate
Resubstitution	0.279
Cross validation	0.421

Derivado de estos análisis, se extraen las reglas de clasificación con las que se categorizarán todas y cada una de las teselas obtenidas de la ejecución del OBIA en alguna de las categorías de modelos de combustibles pre-definidas mediante la toma de datos de verdad terreno en campo. Estos resultados deberán ser revisados minuciosamente mediante criterio experto.

## B. Dinamismo de los modelos de combustible

### B.1. Análisis de la dinámica fenológica

Si bien conocer las principales características de los diferentes modelos de combustibles presentes en la base de los marines Camp Pendleton es fundamental y vital en la modelización del comportamiento del fuego, conocer y comprender la dinámica fenológica de cada uno de ellos puede ayudar a entender su respuesta y estado ante ciertas condiciones ambientales adversas. Una forma fácil y precisa de estudiar esta dinámica vegetal se encuentra en el manejo de diferentes índices de vegetación. Mucho se ha escrito a este respecto en la literatura científica y, de la gran variedad de índices vegetales disponibles, solamente unos pocos permiten estudiar este dinamismo con detalle, entre los que destaca el NDVI como el índice que ofrece los mejores resultados.

- NDVI (Normalized Difference Vegetation Index): cociente o índice de vegetación normalizado más utilizado en la discriminación de los usos del suelo, que utiliza información del infrarrojo cercano (NIR) y del rojo (R). Es un índice utilizado profusamente para estimar diversos parámetros de la cubierta vegetal lo que le confiere un papel protagonista de cara a la evaluación ambiental.

La consecución de este análisis basado, pues, en el estudio del NDVI requiere de la selección de unas fuentes de información adecuadas y del obligatorio cumplimiento de los siguientes pasos.

#### *B.1.1. Adquisición de los datos*

El cálculo del NDVI para cada uno de los modelos de combustibles existentes en el área de estudio requiere del uso de información espectral, en la región del rojo y del NIR, derivada de fuentes satelitales de libre acceso disponibles.

En esta línea, el sensor MODIS fue la fuente de datos satelitales seleccionada. Si bien este sensor ofrece diferentes productos con información espectral-temporal variada, para el desarrollo de los cálculos de dinamismo se ha elegido (por su amplia resolución temporal y su buena resolución espectral) el producto MOD09Q1 pues ofrece información espectral de las bandas 1 (ρ R) y 2 (ρ NIR) a una resolución espacial de 250 metros cada 8 días. Junto a esta información, se emplean otros datos derivados del sensor MODIS con información sobre el inicio y final del periodo de desarrollo vegetal en cada pixel existente dentro del condado de San Diego.

El tiempo de análisis de la información en este tipo de estudios influye en la calidad de los resultados alcanzados. Por este motivo, se decide analizar todas las escenas MODIS MOD09Q1 disponibles desde el año 2000 hasta la fecha actual (más de 722 escenas) lo que trae consigo una gran fuente de información espectral histórica durante 14 años de análisis (catorce ciclos vegetales completos) sobre el comportamiento diario, mensual y anual de la dinámica fenológica.

#### *B.1.2. Procesado y preparación de los resultados*

Una vez adquirida la información base con la que trabajar, se ponen en marcha los diferentes procesos cartográficos y de análisis SIG destinados al cálculo de las diferentes estadísticas del dinamismo vegetal. Los datos resultantes de estos procesos son tratados y depurados de forma que se puedan analizar los mismos, fácil y satisfactoriamente, en diferentes gráficos lineales donde se plasma la tendencia media anual (derivada del análisis de 14 ciclos anuales de comportamiento del NDVI) así como los umbrales de estrés vegetal de la dinámica fenológica en cada uno de los grandes grupos de modelos de combustibles identificados.

#### B.2. Análisis del contenido de humedad del combustible vivo (LFMC)

Tras analizar/estudiar el comportamiento fenológico de los diferentes modelos de combustible, se busca establecer una relación del LFMC con los índices de vegetación pues numerosos modelos de comportamiento del fuego (y más específicamente si se basan en la metodología de Scott & Burgan)

requieren del uso de datos de LFMC de los componentes herbáceos (grass) y leñosos (woody) como “input” (elemento de entrada).

En esta línea se identifica una forma de calcular/analizar el LFMC mediante el uso de los valores relativos (percentiles) de los índices de vegetación. Este método se basa en una serie de premisas principales:

- Adquisición y procesado de la serie completa del producto MODIS MOD09Q1 de 2000 a 2014 en aras de obtener información sobre los umbrales mínimo y máximo de los siguientes índices de vegetación: EVI, NDVI y SAVI.
- Un índice de vegetación relativo explicará un LFMC relativo, asumiendo que de 2000 a 2014 se alcanza su máximo y mínimo y que esta relación es lineal.
- Un píxel explica los datos promedio de toda la vegetación (herbáceos, leñosos, arbolado, suelo desnudo...) Por lo tanto, se deben identificar píxeles puros de combustibles leñosos y herbáceos con el fin de calcular, en base a ellos, índices de vegetación de FMC válido que sirvan de input en el modelo de comportamiento.
- FMC de los combustibles leñosos y herbáceos será similar en una zona de humedad homogénea como MCP.

Tomando como referencia estas premisas se inicia el proceso de obtención de resultados, donde se analiza, en primer lugar, la idoneidad de la participación los diferentes índices de vegetación en el cálculo del LFMC. A pesar de que el EVI y el SAVI ofrecen resultados parecidos de alta precisión de acierto, el índice de vegetación seleccionado fue el EVI pues es uno de los índices más robusto a la hora de absorber la influencia del suelo y de la atmósfera y es uno de los índices que devuelve series temporales más consistentes (SALESKA et al., 2007).

Así pues, el EVI fue el índice seleccionado para llevar a cabo el cálculo del LFMC y es el índice sobre el que se le estimará el percentil para poder llegar a estimar el FMC.

### **C. Patrones de recuperación del terreno**

Conseguir entender el comportamiento del terreno ante la afectación que los focos de ignición provocan en él, supone uno de los elementos de análisis de mayor interés pues ayuda a predecir el grado de afectación al que se puede ver sometido el terreno (severidad de quema) así como el ritmo de recuperación de cada modelo de combustible tras la pérdida de sus características a consecuencia del fuego. En este sentido, se preparan dos tipos de análisis con los que poder entender y analizar estos patrones de recuperación:

#### C.1. Análisis de severidad

Conocer el comportamiento del terreno tras el incendio, su regeneración y los grados de afectación en las diferentes zonas (en lo que a severidad de daño se refiere) es un paso crucial y necesario a la hora de preparar la capa definitiva de modelos de combustible.

Las fuentes satelitales base utilizadas en el proceso de caracterización de modelos de combustible tienen fecha de verano de 2012, lo que implica que la capa de combustibles generada en este proyecto no incluye los efectos provocados en el terreno por todos aquellos focos de ignición acaecidos en fechas posteriores al verano de 2012. Antes esta situación, que implica una desactualización de la verdad terreno en algunos sectores concretos de la región, es fundamental definir una forma con la que poder renovar las cargas y las características generales de los combustibles en las zonas que se han quemado posteriores al verano de 2012

En la búsqueda de este objetivo se decide llevar a cabo un análisis de severidad, técnica de análisis espectral con la que es posible parametrizar los daños en el terreno causados por el fuego, basado en el Normalized Burn Ratio (NBR): cociente normalizado tipo NDVI, que en este caso utiliza información del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta (ROGAN & FRANKLIN, 2001).

Las escenas escogidas para llevar a cabo el análisis de severidad son imágenes Landsat 8 corregidas, previas a su uso, tanto espectralmente como topográficamente. De acuerdo con las características de estas escenas, las bandas utilizadas para el cálculo de este índice serán la banda 5 ( $\rho$ NIR) y la banda 7 ( $\rho$ SWIR):

$$NBR = \rho \text{ NIR} - \rho \text{ SWIR} / \rho \text{ NIR} + \rho \text{ SWIR}$$

El objetivo fundamental del análisis de severidad es conseguir conocer los cambios acaecidos en el terreno a raíz de un incendio. Teniendo en cuenta esto, para alcanzar un buen resultado en el estudio de la severidad se hace necesario utilizar, mínimo, dos escenas satelitales diferentes: una previa al incendio y una posterior al mismo. Dicha fórmula del NBR, explicada con anterioridad, se aplica en ambas escenas por separado para ejecutar, con posterioridad, la diferencia entre ellas:

$$\Delta NBR = NBR \text{ pre-incendio} - NBR \text{ post-incendio}$$

Los resultados que ofrece esta diferencia no pueden ser interpretados libremente. Hay unos comportamientos fijados en la respuesta de este índice y, para poder entender los mismos, se utiliza la tabla de referencia que propone el programa USGS FireMon, donde se clasifican los resultados obtenidos del cálculo de este diferencial en 7 categorías (Tabla 3).

Tabla 3. Categorías de severidad de quema definidas por el programa USGS FireMon

$\Delta NBR$	Severidad
< -0,25	Alta recuperación post-incendio
-0,25 a -0,1	Baja recuperación post-incendio
-0,1 a 0,1	No quemado
0,1 a 0,27	Incendio de baja severidad
0,27 a 0,44	Incendio de baja-moderada severidad
0,44 a 0,66	Incendio de alta-moderada severidad
> 0,66	Incendio de alta severidad

Con el objetivo de automatizar todo el proceso que se ha expuesto se ha generado un pequeño modelo cartográfico con el que se pretende optimizar el cálculo de la severidad post-incendio en las áreas quemadas. Haciendo uso del mismo, se prepara el análisis de severidad de todas las áreas quemadas desde el verano de 2012 en Camp Pendleton.

### C.2. Estudio de la recuperación post-incendio del terreno

La aparición de incendios forestales es muy frecuente en Camp Pendleton donde la vegetación principal es el chaparral californiano, una comunidad de arbustos mediterráneos semiáridos más susceptibles y adaptado al fuego (HANES, 1988). Perturbaciones externas como, por ejemplo, los incendios forestales, cambian la estructura de la vegetación, el funcionamiento de los ecosistemas e interrumpen el natural proceso de sucesión de la vegetación (la conducción de la vegetación por etapas en la que evoluciona cambiando de estadillos). Se trata, pues, de cambios que reducen, también, la carga del combustible en la vegetación afectando esto a los ratios de propagación de los incendios futuros (propagación); por tanto, los modelos de combustible que se cartografiaron previo análisis de los efectos provocados por los incendios, deben ser actualizados en el futuro en aras de

identificar los requisitos prescritos de la quema así como de diseñar un plan de gestión para la recuperación de la vegetación con el que se consiga minimizar la erosión del suelo (KEELEY, 2000).

En esta línea se analizan 15 incendios. De cada uno se seleccionan píxeles puros que cumplan obligatoriamente tres criterios:

- Estar totalmente afectados por el incendio
- Estar totalmente incluidos en un mismo modelo de combustible
- No estar afectados por ningún otro incendios posterior a la fecha seleccionada

Una vez escogidos los píxeles de análisis, se prepara de nuevo el histórico del NDVI de las escenas MODIS del producto MOD09Q1 para cada uno de ellos, de modo que su cálculo proporcione una evaluación simple y rápida del proceso de regeneración siguiendo a RIAÑO et al. (2002) y mucho otros antes. En base a la información que proporcionaban estos autores se establecieron umbrales de comportamiento en el cambio del NDVI de modo que fuese posible parametrizar el cambio de un modelo de combustible a otro por medio del análisis del NDVI.

#### **D. FDR (Fire Danger Calculator)**

Como apoyo a las tareas de prevención y a las actividades de entrenamiento que se realizan en la base de los marines Camp Pendleton, se diseña una calculadora de peligro de incendio (FDR) con la que se busca procesar información meteorológica y de combustibles, proporcionando los resultados en una computadora de escritorio.

Para llevar a cabo este análisis, los cálculos deben basarse en las normas del Sistema Nacional de Clasificación del Peligro de Incendios (NFDRS, National Fire Danger Rating System Standards), combinadas estas con otras condiciones y conocimientos locales para llegar a la mejor solución en el proceso de control y gestión de los problemas.

Por tanto, este desarrollo tiene como objetivo desplegar una interfaz fácil de usar mediante el uso del software EXCEL2010 (requisito del usuario final), que sea capaz de:

- Descargar los datos meteorológicos de las estaciones meteorológicas más cercanas
- Calcular índices NFDRS asociados para todos los tipos de combustible encontrados en el área de Camp Pendleton
- Tratar los índices obtenidos en base a un conjunto de factores de ponderación definidos por el usuario
- Evaluar el riesgo final esperado para un conjunto de áreas ecológicas y de capacitación

La calculadora FDR permitirá y actuará, pues, como una herramienta que proporcionará diariamente los cálculos necesarios para configurar el MCP FDR (Marines Camp Pendleton Fire Danger Rating); es decir, la clasificación del peligro de incendio en la base de Camp Pendleton.

## **4. Resultados**

Todos y cada uno de los análisis realizados generan unos resultados finales claros. A continuación se detallan los obtenidos en cada uno de los estudios metodológicamente descritos con anterioridad.

### **A. Generación de una cartografía ex-novo de modelos de combustible**

Tras ejecutar los diferentes pasos, procesos y análisis pertenecientes a esta tarea, se elabora la cartografía final de modelos de combustible en base a la metodología de SCOTT & BURGAN (2005), tanto en formato vectorial como raster (Figura 5).

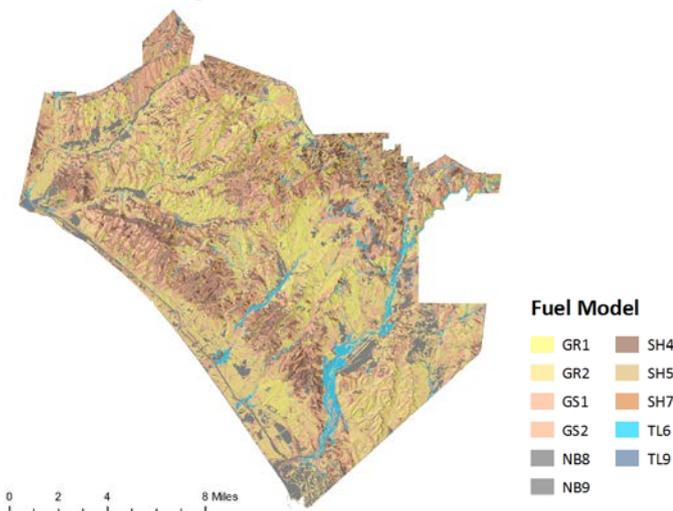


Figura5. Cartografía de modelos de combustible de la familia de Scott & Burgan en el condado de San Diego

## B. Dinamismo de los modelos de combustible

### B.1. Análisis de la dinámica fenológica

Derivado del análisis completo de los catorce ciclos anuales de NDVI en cada modelo de combustible, se extraen curvas de comportamiento histórico medio del NDVI así como umbrales de estrés vegetal sobre los que poder comparar los datos particulares de un determinado mes o de un determinado año (Figura 6).

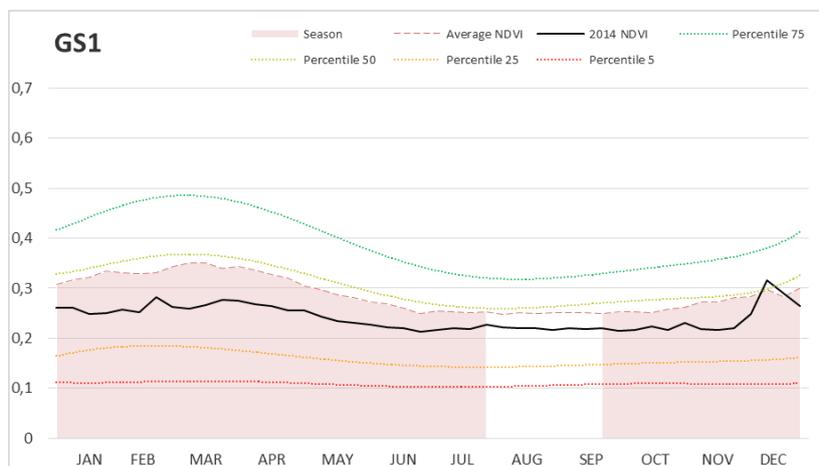


Figura6. Análisis de la curva de comportamiento del NDVI en el combustible GS1 durante el año 2014 en comparación con el comportamiento fenológico medio histórico

### B.2. Análisis del contenido de humedad del combustible vivo (LFMC)

Las tareas de cálculo del LFMC en base al análisis de los percentiles del histórico de datos del índice de vegetación EVI durante 14 años, permite elaborar/obtener diferentes resultados estadísticos comparativos donde:

- Se hace una relación entre el EVI y el FMC por zona y modelo de combustible
- Se hace un análisis de la evolución del FMC durante el periodo 2000-2014 por zona y modelo de combustible

Finalmente se elabora un conjunto de gráficos donde se refleja la variación/tendencia de comportamiento típica del FMC por zona y tipo de combustible (Figura 7).

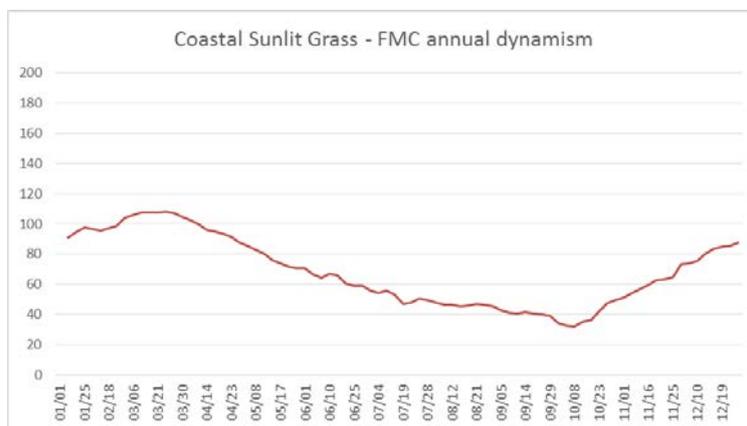


Figura 7. Línea de comportamiento anual del LFMC en los combustibles herbáceos situados en la solana de la zona Coastal (Camp Pendleton)

### C. Patrones de recuperación del terreno

El estudio del comportamiento del terreno tras un periodo de quema prolongado y el análisis de las pautas de cambio que se muestran cuando un modelo de combustible evoluciona a otro, permite generar resultados diversos y de gran riqueza con los que poder definir líneas de gestión y actuación en los procesos de prevención y control del peligro de aparición de incendios forestales, así como el desarrollo de herramientas de control y mantenimiento de las áreas afectadas por incendios que se encuentran en fases de recuperación (Figura 8, Figura 9).

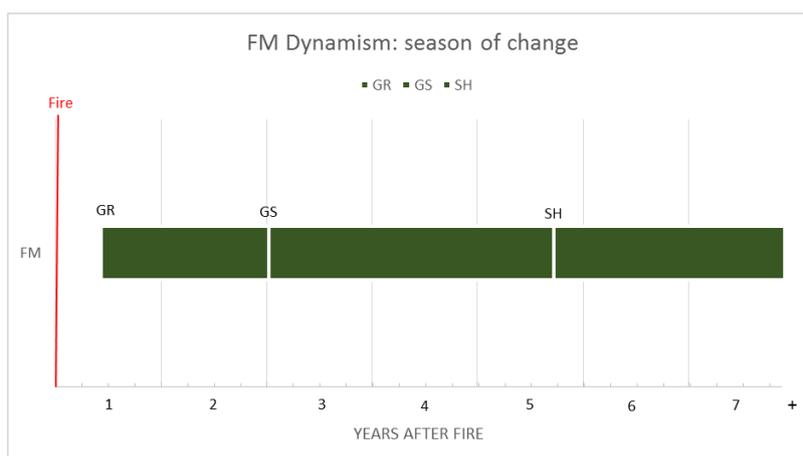


Figura 8. Análisis del dinamismo de cambio de los grandes grupos de modelos de combustible en Camp Pendleton

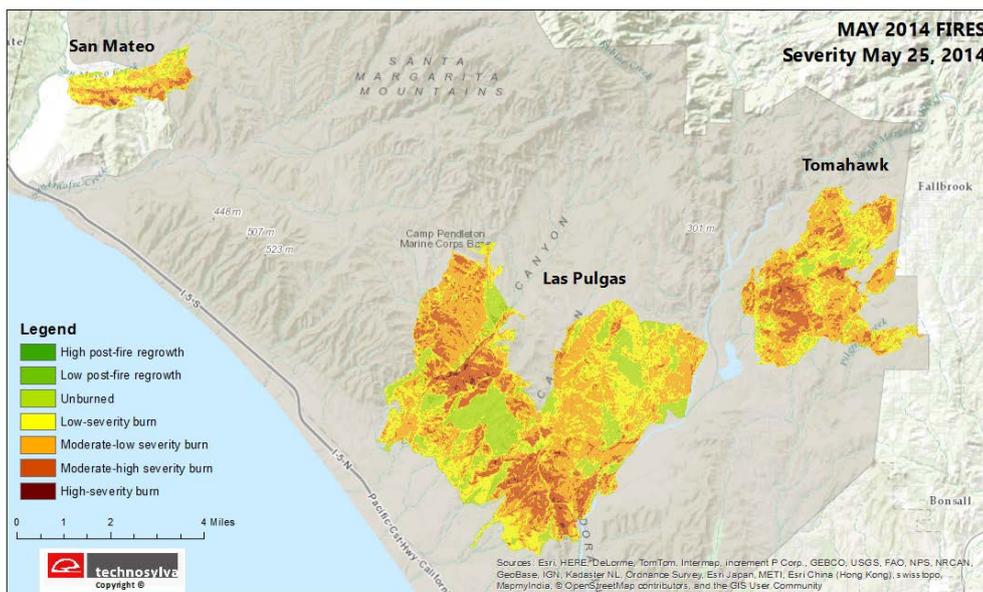


Figura9. Resultado cartográfico del análisis de severidad de los incendio de mayo de 2014 en Camp Pendleton

### D. FDR (Fire Danger Calculator)

El resultado fundamental de la configuración/preparación de esta calculadora de peligro de incendio es dar soporte al usuario en el proceso de prevención y control de los incendios.

Este desarrollo brinda la información en una interface sencilla con la que el usuario interactúa y extraer información estadística de relevancia en la lucha contra los incendios forestales (Figura 10, Figura 11, Figura 12, Figura 13).

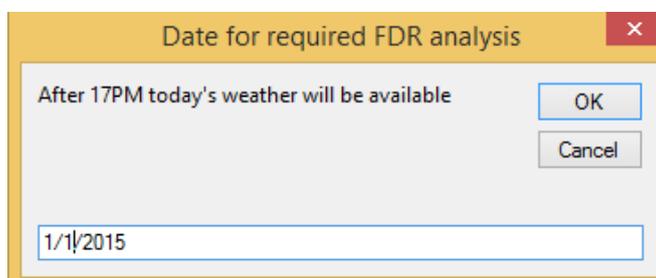


Figura10. Cuadro diálogo del FDR en el que se introduce la fecha de consulta de la información histórica

Current weather				
Station	Temperature(°F)	Humidity(%)	Speed wind(mph)	Condition
Las Flores	55	69	1.53	few clouds
Wire Mountain	62	100	5.31	few clouds
Mateo Ridge	55	69	1.53	few clouds
Talega Ridge	55	69	1.53	few clouds
Case Spring	55	69	1.53	few clouds
Roblar Canyon	55	69	1.53	few clouds

Figura11. Ejemplo de una consulta de las condiciones meteorológicas actuales en Camp Pendleton mediante el uso del FDR

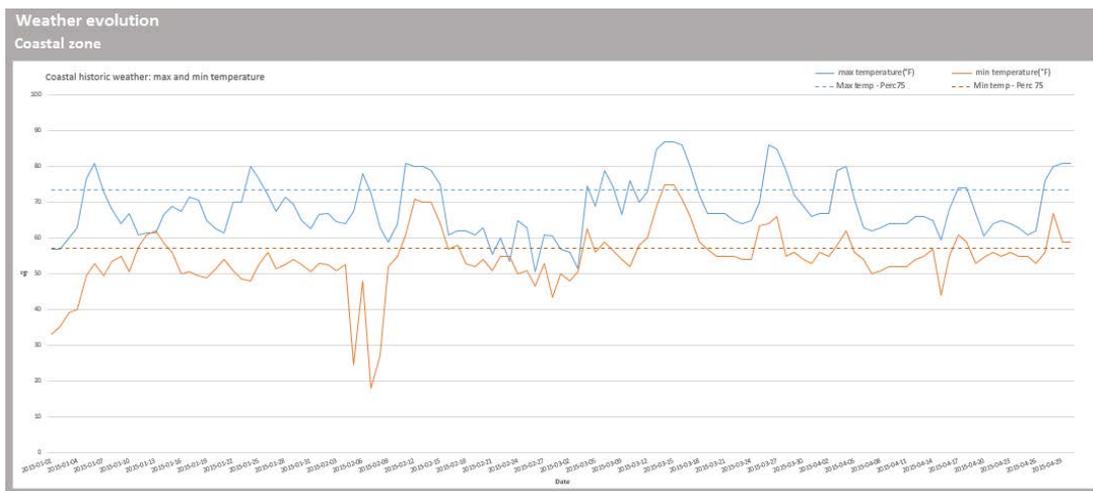


Figura12. Ejemplo de la representación gráfica de la evolución histórica de los datos meteorológicos en Camp Pendleton mediante una consulta del FDR

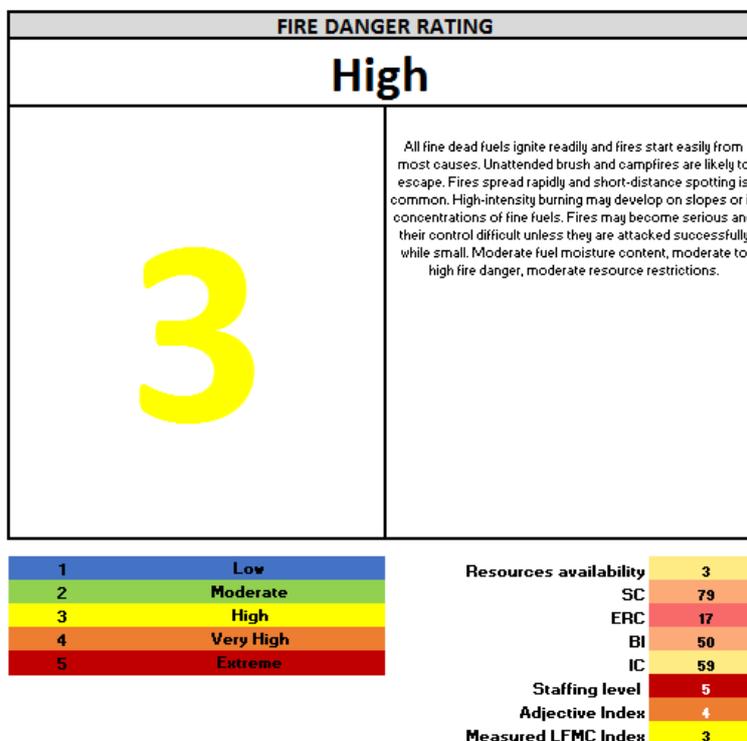


Figura13. Ejemplo de cuantificación del nivel de riesgo (FDR) en el interfaz de usuario

## 5. Discusión

La base de los marines Camp Pendleton se constituía como un espacio peligroso, donde la práctica de actividades militares controladas sobre un espacio que carecía de medios de análisis y prevención implicaba un importante incremento del riesgo de ignición. La ausencia de una cartografía sólida y en detalle de los modelos de combustible existente en este espacio, ponía de manifiesto la existencia de serias deficiencias en las tareas de organización y gestión de incendios. En el momento actual, gracias a la cartografía de modelos de combustible, y a los extensos análisis llevados a cabo sobre la misma, es posible planificar las actividades y prácticas militares y minimizar la exposición del terreno a daños producidos por la aparición de focos de ignición severos

## 6. Conclusiones

La consecución de este análisis, gracias al cual se han percibido las deficiencias conceptuales en lo que a gestión y control de los incendios forestales se refiere dentro de Camp Pendleton, ha permitido preparar no solo una base conceptual sólida sobre la que trabajar así como poder diseñar pautas de prevención y control de los incendios, si no también formas de reducir sus efectos y mejorar la recuperación del terreno tras de sí. Se consigue, pues, desarrollar unas herramientas completas cuyo uso facilita a los técnicos y responsables de los diferentes espacios ubicar las problemáticas, organizar los medios y estructurar las principales tareas de defensa y lucha contra los incendios forestales.

## 7. Bibliografía

BLASCHKE, T.; 2010. Object based image analysis for remote sensing, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 65, 2-16

CHAVEZ, P.S.; KWARTENG, A.; 1989. Extracting spectral contrast in Landsar Thematic Mapper image data using selective principal component analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 55, 339-348

CHUVIECO, E.; 2002. Teledetección ambiental. Ediciones Ariel. 586. Barcelona

HANES, T.L.; 1988. California Chaparral. En: BARBOUR, M.G.; MAJOR, J.; (eds.) *Terrestrial Vegetation of California*. 417-470. California Native Plant Society, Spec. Publ 9. Davis Sacramento

KEELEY, J.E; 2000. Chaparral. En: BARBOUR, M.G.; BILLINGS, W.D.; (eds.) *North American terrestrial vegetation*. 204-253. Cambridge University Press. Nueva York

MATHER, P.M.; 1998. *Computer Procesing of Remotely Sensed Images*. Chichester, John Wiley & Sons.

RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; USTIN, S.; ZOMER, R.; DENNISON, P.; ROBERTS, D.; SALAS, J.; 2002. Assessment of vegetation regeneration after fire through multitemporal analysis of AVIRIS images in the Santa Monica Mountains. *Remote Sens. Environ.* 79, 60-71

ROGAN, J.; FRANKLIN, J.; 2001. Mapping wildfire burn severity in Southern California forests and shrublands using enhanced thematic mapper imagery. *Geocarto International*, 16(4), 91-106

SALESKA, S.R.; DIDAN, K.; HUETE, A.; DA ROCHA, H.R.; 2007. Amazon Forests Green-Up During 2005 Drought. *Science* 318:612

SCOTT, J.H.; BURGAN, R. E.; 2005. Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. Department of Agriculture, Forest Service. 72. Rocky Mountain Research Station

USGS 2013 Remote Sensing Phenology. <http://phenology.cr.usgs.gov/>