

TRABAJO FIN DE MÁSTER

ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN POST-FUEGO DEL NDVI DE ESPECIES FORESTALES MEDIANTE IMÁGENES LANDSAT

M^a Asunción Beamonte San Agustín

**Máster Universitario en Tecnologías de la información geográfica para la ordenación del territorio:
sistemas de información geográfica y teledetección**

Noviembre 2013

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Resumen

Evaluar la recuperación de las especies forestales tras un fuego es importante y el uso de imágenes de satélite es una herramienta útil para la monitorización del nivel de recuperación de la cubierta vegetal. En este trabajo se estudia la evolución del índice NDVI con la información proporcionada por una serie de 17 imágenes Landsat, cuantificando de esta manera la recuperación de las especies mediante la progresión del índice, tanto en términos absolutos como relativos, respecto a un periodo de referencia. Además se analiza la posible relación de los cambios del NDVI a lo largo del tiempo con variables de tipo climático.

Palabras clave: NDVI, recuperación de especies, incendio forestal, Landsat, SPEI

Abstract

Determining the success of forest species after a fire is important and the satellite imagery is useful to monitor de progression of the green-up level. In this work the evolution of the NDVI index is studied by means of a series of 17 Landsat images, quantifying the species recovery through the progression of the index, both in absolute and relative terms in respect to a reference period. A possible relation between NDVI changes over time and climate variables is also analyzed.

Key words: NDVI, species recovery, forest fire, Landsat, SPEI

Agradecimientos

Quisiera dar las gracias a todos aquellos cuyo trabajo fue utilizado como punto de partida de este estudio y que formaron parte del proyecto Caixa-DGA, GA-LC-042/2011. Especialmente mi agradecimiento a Fernando Pérez Cabello por su labor formativa en un campo, la regeneración post-fuego de especies forestales, que me era completamente desconocido. Tengo que decir que ha conseguido capturar mi interés más allá de lo que es la elaboración de este Trabajo Fin de Máster.

No me olvido de Roberto Serrano, compañero de aula y en estos momentos en vías de convertirse en experto en climatología, que generosamente computó los índices de sequía que aquí se han utilizado.

Índice

1.	Introducción	pág. 4
2.	Objetivos	pág. 4
3.	Base de datos	pág. 5
	3.1. Fuentes de información y tratamiento de los datos	pág. 5
	3.2. Análisis exploratorio de los datos	pág. 8
4.	Evolución del NDVI por especies	pág.15
	4.1. Lastonar mixto.....	pág.17
	4.2. <i>Buxus sempervirens</i>	pág.19
	4.3. <i>Pinus halepensis</i>	pág.22
	4.4. <i>Pinus nigra - Pinus sylvestris</i>	pág.24
	4.5. <i>Quercus coccifera</i>	pág.26
	4.6. <i>Quercus gr. cerrioides</i>	pág.29
	4.7. <i>Quercus ilex rotundifolia</i>	pág.31
	4.8. Resumen de los rasgos comunes y diferenciadores de la evolución del NDVI de todas las especies	pág.33
5.	Relación de la evolución del NDVI con variables climáticas	pág.34
6.	Modelización temporal de la evolución del NDVI	pág.36
7.	Evaluación de los errores de ajuste de los modelos	pág.39
8.	Conclusiones	pág.42
9.	Bibliografía.....	pág.44
	Anexos.....	pág.45

1. INTRODUCCIÓN

El impacto de los incendios forestales varía notablemente dependiendo de los ecosistemas implicados, pero en general acarrearán importantes consecuencias tales como la degradación de los montes, la destrucción de ecosistemas, la pérdida de calidad paisajística, así como consecuencias de orden social y económico. Una vez que el fuego se ha producido es importante conocer cuál va a ser el proceso que va a tener lugar en esas áreas quemadas.

Uno de los objetivos de la monitorización de zonas que han sufrido incendios es poder cuantificar el nivel de recuperación de la cubierta vegetal, no solo para valorar la intensidad con que vuelven a ocupar el espacio previo y la velocidad a la que ocurre, si no también para saber cuáles son las especies que regeneran. Los análisis que en este estudio se han llevado a cabo pretenden aproximar respuestas a las dos primeras cuestiones, ya que la determinación de la presencia post-fuego de las especies que previamente ocupaban esos espacios o bien de otras que hayan colonizado no es posible con la información aquí disponible.

Es importante estudiar la capacidad de recuperación de cada una de las especies a través de una precisa modelización de la forma en la que evoluciona el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que ya quedó descrito en Viedma et al. (1997) porque permite conocer con antelación las consecuencias que el fuego tendrá sobre las especies. Saber de antemano cómo se va a comportar una especie tras un incendio sería de gran ayuda en la toma de decisiones para los agentes implicados en la gestión medioambiental de las administraciones.

La resiliencia de las especies es variada y en algunos casos la recuperación tras el fuego parece ser rápida y completa (Vicente-Serrano et al, 2011), sin embargo otras especies no logran ni siquiera en un periodo medio de tiempo los niveles de vigor que poseían en un estado anterior al fuego. Las respuestas que las diferentes especies, forestales en este caso, dan a una situación traumática como un fuego son variadas y como ya se ha apuntado, dependerán de las particularidades del patrón o estrategia de regeneración propia de la especie, pero su recuperación puede depender también de otros factores ajenos a ella, por ejemplo, de algunos de tipo climático tales como la precipitación y la temperatura, tanto individualmente como conjuntamente. Con este propósito ha aparecido en la literatura el índice de sequía SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), presentado por Vicente-Serrano et al. en el año 2010, que tiene en consideración no solo la precipitación sino el efecto de la temperatura que agrava la situación de sequía.

La principal herramienta para ejecutar este propósito, además del trabajo de campo, es la información periódica obtenida por imágenes satelitales, en el caso de este estudio serán imágenes Landsat 5 TM, que permiten capturar los cambios que se producen en el nivel de vigor de la vegetación de zonas que han sufrido un incendio, evaluándolos por medio del índice NDVI. Este índice ha sido extensamente utilizado desde 1969 para evaluar la recuperación de la cobertura vegetal de bosques después de sufrir incendios (Kriegler, F.J. et al. 1969).

2. OBJETIVOS DEL TRABAJO

Los objetivos de este trabajo son en primer lugar analizar temporalmente la regeneración de varias formaciones vegetales en diferentes áreas que fueron afectadas por fuegos forestales en el año 86 en el centro norte de la Comunidad Autónoma de Aragón, mediante el índice NDVI. En segundo lugar analizar las relaciones entre la evolución del NDVI y variables climáticas. A continuación se modelizará el proceso de cambio de este índice para el periodo considerado estudiando y, finalmente, estudiarán los errores de predicción.

3. BASE DE DATOS

3.1. Fuentes de información y tratamiento de los datos

Los datos utilizados para la realización de este trabajo provienen de diferentes fuentes. El bloque más relevante está conformado por la información proporcionada por 17 imágenes del satélite Landsat 5-TM de las localizaciones de siete incendios que ocurrieron durante el año 1986 en la Comunidad Autónoma de Aragón. Seis de ellos tuvieron lugar dentro de los límites de la provincia de Huesca y uno en la de Zaragoza y los términos municipales afectados por los mismos fueron: Agüero, Arguis, Caldearenas, Jaca, Las Peñas de Riglos, Murillo de Gállego, Nueno y Zuera.

Las variables consideradas para los píxeles afectados por dichos incendios fueron: la localización, por medio de coordenadas X e Y, el código del incendio al que pertenecía el píxel, los valores digitales por bandas de las 17 imágenes, el valor del índice NDVI (*Normalized Differenced Vegetation Index*) y las especies forestales que ocupaban esos píxeles según una clasificación previa al incendio llevada a cabo con información del año 1984, dos años antes de producirse el fuego. Este índice está relacionado con las condiciones de la vegetación y su biomasa. El rango de valores oscila entre -1 y +1 y su cálculo se lleva a cabo con los valores de reflectancia espectral de los canales del infrarrojo cercano y del rojo visible. Los valores por encima de 0,2 indican presencia de vegetación y cuanto mayores son, mejores las condiciones de vigor de la misma.

Algunos píxeles carecían de información en algunas de las imágenes, no siendo relevante el número de los datos perdidos salvo en el año 2001 del que no se pudo obtener ninguna o muy escasa información para algunos de los incendios.

Todas las imágenes Landsat consideradas habían sido previamente corregidas/normalizadas tanto atmosférica como geométricamente para el preciso aprovechamiento de la información contenida en las mismas.

Las imágenes fueron tomadas todas en el tercer cuatrimestre del año, casi en su totalidad en el mes de agosto a excepción de una en septiembre y otra en julio. Las fechas concretas de dichas imágenes fueron las siguientes:

- 20 de agosto de 1984
- 27 de septiembre de 1986
- 13 de agosto de 1987
- 02 de agosto de 1989
- 24 de agosto de 1991
- 10 de agosto de 1992
- 29 de agosto de 1993
- 03 de agosto de 1995
- 24 de agosto de 1997
- 14 de agosto de 1999
- 26 de julio de 2001
- 30 de agosto de 2002
- 25 de agosto de 2003
- 27 de agosto de 2004
- 14 de agosto de 2005
- 01 de agosto de 2006
- 04 de agosto de 2007

En ninguna de las zonas incendiadas se tuvo en cuenta el estado de limpieza de las mismas en las fechas anteriores ni en las posteriores al fuego, ni hubo intervención de repoblación en las mismas. Tampoco se tuvo en consideración el origen del fuego, pero sí el nivel de severidad medido a través del índice NBR (*Normalized Burn Ratio*), que en su versión categorizada imputó a todos los píxeles analizados en este trabajo un nivel 4, valor que se interpreta como severo.

Tras la depuración de estos datos, el archivo quedó compuesto por la información de 8577 píxeles en los que no volvió a producirse ningún fuego en el periodo de estudio que cubre hasta el año 2007. La localización y extensión de los incendios puede verse en la figura 1.

Para estudiar la posible relación entre la evolución del NDVI en las diferentes especies con variables de tipo ambiental, tales como la precipitación y la temperatura, se trabajó con información sobre estas variables a nivel mensual para los 21 años considerados procedente de los observatorios más próximos a las zonas incendiadas. En particular los observatorios de referencia para dichas zonas fueron: embalse de La Peña para los incendios con código 29 y 32, Javierrelatre para el codificado como 30, Bernués para el 34, Nueno para 80 y 36 y, finalmente, Zuera para el incendio número 38 (ver figura 1).

En algunos casos los datos faltantes en algunos instantes de tiempo en algunos observatorios se imputaron con información del segundo observatorio más cercano a cada píxel, entendiendo que las variaciones, dada la proximidad, serían irrelevantes, especialmente al considerarse mediciones acumuladas de las variables. Los datos de los observatorios se utilizaron, además, para computar el índice SPEI a los tres, seis, doce y veinticuatro meses, que fueron asignados, respectivamente, a los píxeles más próximos a cada uno de los observatorios. Este un índice multiescalar de sequía basado en datos climáticos que se utiliza para determinar la duración, magnitud e inicio de las condiciones de sequía respecto a las condiciones normales en diferentes sistemas naturales o ecosistemas. El valor medio de SPEI es 0 y su desviación estándar es 1 y por ser una variable estandarizada puede ser comparada con otros valores del mismo índice para otros lugares o momentos.

El proceso de clasificación digital realizado con la imagen Landsat de 1984 para la identificación de las formaciones vegetales afectadas se recoge en Rodrigues et al. (2013).

La elaboración de la base de datos mediante técnicas de teledetección se realizó en el contexto del proyecto (Caixa-DGA, GA-LC-042/2011), con información proporcionada por el Servicio de Gestión de los Incendios Forestales y Coordinación, de la Dirección General de Gestión Forestal (Departamento de Agricultura, Ganadería y Medio Ambiente) del Gobierno de Aragón.

Para la elaboración de la cartografía se ha utilizado información en formato digital de las áreas de estudio. La generación de los polígonos que han servido para la delimitación de las zonas incendiadas se ha digitalizado sobre una ortoimagen del PNOA 2009 (Plan Nacional de Ortoimagen Aérea 2009) descargada del SITAR (Sistema de Información Territorial de Aragón) y se ha trabajado en una escala aproximada de 1:10.000. Las ortoimágenes empleadas en este trabajo han sido las siguientes hojas: 209 (1-4, 2-4, 1-3, 2-3, 3-2, 3-3, 4-3, 2-2, 4-1), 248 (2-1, 2-2), 284 (4-4), 322 (4-1, 3-1), 384 (4-1).

Las divisiones administrativas provincias y municipios de Aragón se obtuvieron, también, del servicio de descargas del SITAR. El Modelo Digital del Terreno utilizado es el MDT25 con una resolución 25x25 m. fue descargado del CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica) perteneciente al Instituto Geográfico Nacional. Hojas: 209, 248, 284 y 322.

LOCALIZACIÓN DE INCENDIOS

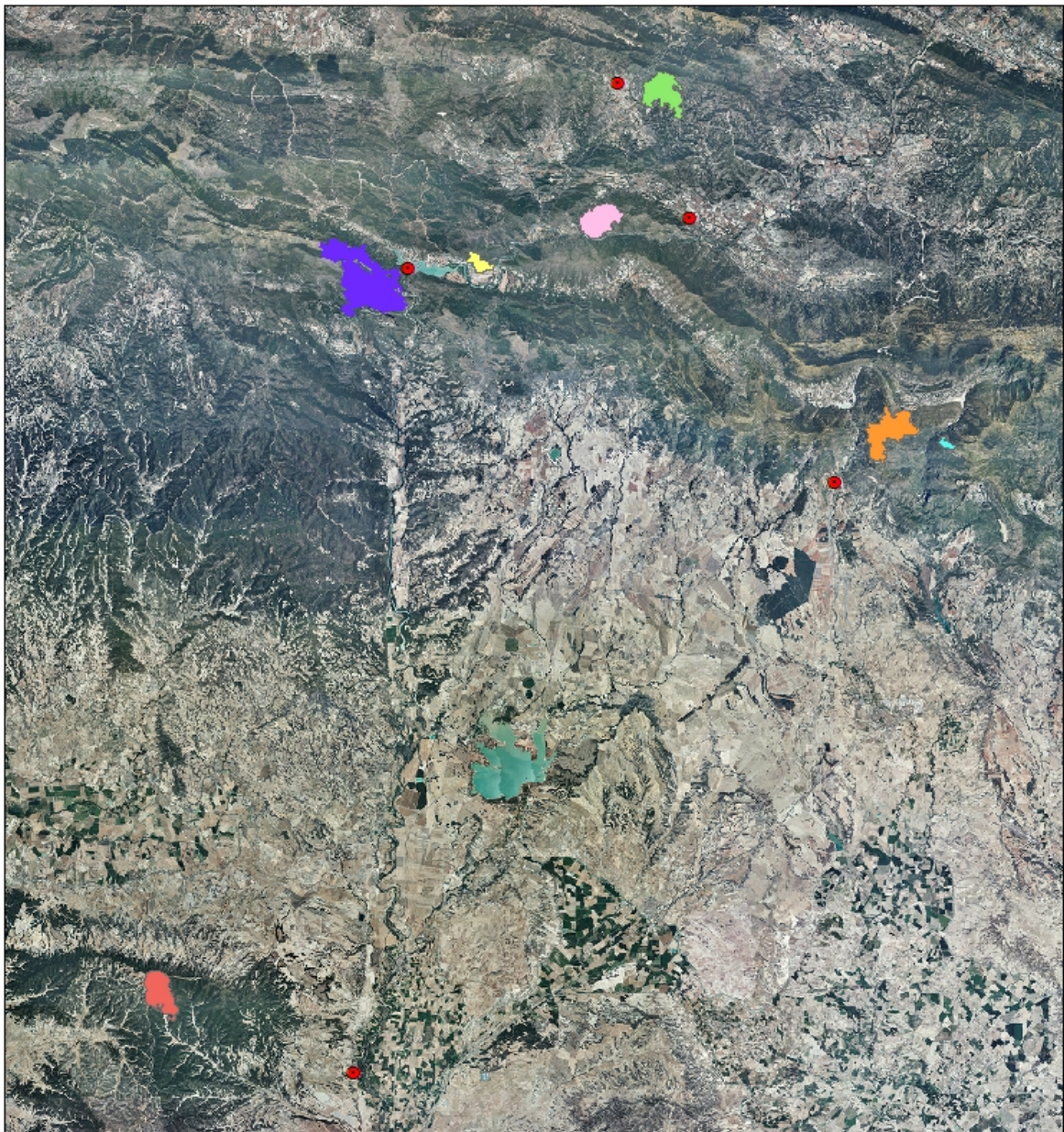
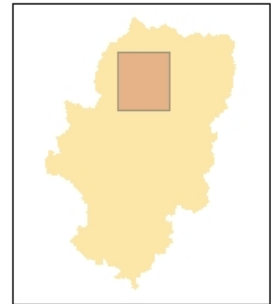
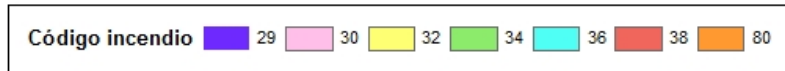


Figura 1. Zonas pertenecientes a áreas quemadas en este estudio y observatorios de referencia

Los datos climáticos se obtuvieron de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) y del SAIH Ebro (Información Hidrológica de la Cuenca Hidrográfica del Ebro). Para el cómputo del *Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index* (SPEI) se siguió la metodología de Vicente-Serrano et al. (2010).

Para llevar a cabo todos los análisis necesarios en este estudio la información ha sido procesada y los resultados generados con los programas Excel, Word, SPSS, R y ArcGis 10.1.

3.2 Análisis exploratorio de los datos.

Las formaciones vegetales que cubrían las zonas incendiadas y su respectiva presencia dentro del total de píxeles de la base de datos, de acuerdo con la clasificación realizada con la imagen del satélite Landsat 5 en el año 1984 correspondiente a un estado pre-fuego, eran las que aparecen en la tabla 1.

Como puede observarse, en las áreas a estudio se encuentran 15 especies/formaciones vegetales diferentes, entre las cuales predominan Lastonar mixto, *Buxus sempervirens*, *Brachypodium retusum* y *Quercus ilex rotundifolia*, que contabilizan entre ellas más del 50% de la ocupación. De las 15 especies se decidió incorporar al estudio aquellas cuya presencia supusiera al menos el 2,5% del total de la superficie quemada, por ello, finalmente, solo se incluyeron 9 especies que quedaron agrupadas en 7 categorías, ya que se consideró que *Brachypodium retusum* y lastonar mixto poseían estrategias de regeneración similares y quedaron como un solo grupo. De forma análoga se procedió con *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*, que confluyeron en una clase.

Tabla 1. Distribución de especies forestales en el área de estudio

ESPECIES Y PORCENTAJE DE OCUPACIÓN	
<i>Brachypodium retusum</i>	12,8
<i>Buxus sempervirens</i>	13,9
Garriga degradada	1
Garriga densa	0,1
<i>Juniperus oxycedrus</i>	1,3
Lastonar mixto	16,5
<i>Pinus halepensis</i>	5,6
<i>Pinus nigra</i>	7,1
<i>Pinus sylvestris</i>	6,5
<i>Quercus coccifera</i>	6,2
<i>Quercus gr. cerrioides</i>	14
<i>Quercus ilex rotundifolia</i>	12,4
Rosa, una o varias especies, arbustivas o subarbus	0,2
Sabino-enebral o enebral mixto (arbóreo o menor)	0,2
Tomillar mixto	2,2
TOTAL	100

Las figura 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8 muestran la distribución de las especies en los diferentes incendios y tabla 2 las cuantifican. Resulta interesante apuntar que dos de las especies, *Pinus halepensis* y *Quercus coccifera* están presentes, únicamente, en un incendio cada una, el 38 y el

29 respectivamente, aunque solo hay un incendio, el 38, que afecta a una sola especie, a *Pinus halepensis*.

El incendio con más píxeles, y por tanto superficie afectada por el fuego, fue el codificado como 29 con un total de 2970 píxeles y el grupo vegetal más afectado, en cuanto a superficie fue el formado por *Brachypodium retusum* y lastonar mixto.

Tabla 2. Distribución de especies forestales en los diferentes incendios

ESPECIES	CÓDIGO DE INCENDIO							Total
	29	30	32	34	36	38	80	
<i>Brachypodium retusum</i> - <i>Lastonar mixto</i>	1099	0	0	61	0	0	1494	2654
<i>Buxus sempervirens</i>	216	0	0	0	41	0	1001	1258
<i>Pinus halepensis</i>	0	0	0	0	0	504	0	504
<i>Pinus nigra</i> - <i>Pinus sylvestris</i>	124	392	225	350	0	0	134	1225
<i>Quercus coccifera</i>	556	0	0	0	0	0	0	556
<i>Quercus gr. cerrioides</i>	975	191	16	0	80	0	1	1263
<i>Quercus ilex rotundifolia</i>	0	0	0	1080	13	0	24	1117
Total	2970	583	241	1491	134	504	2654	8577

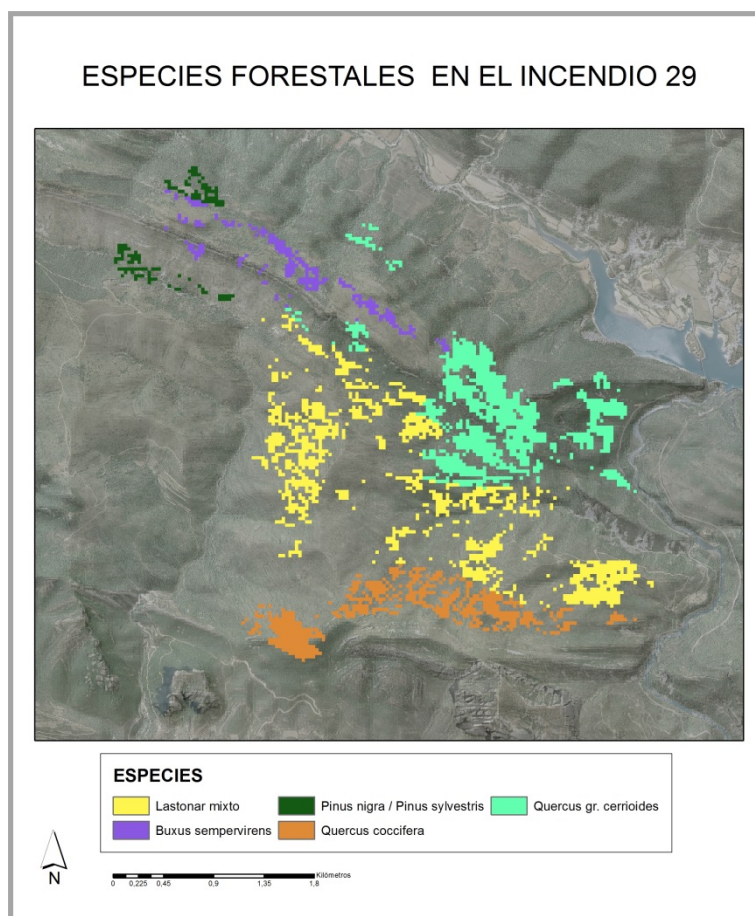
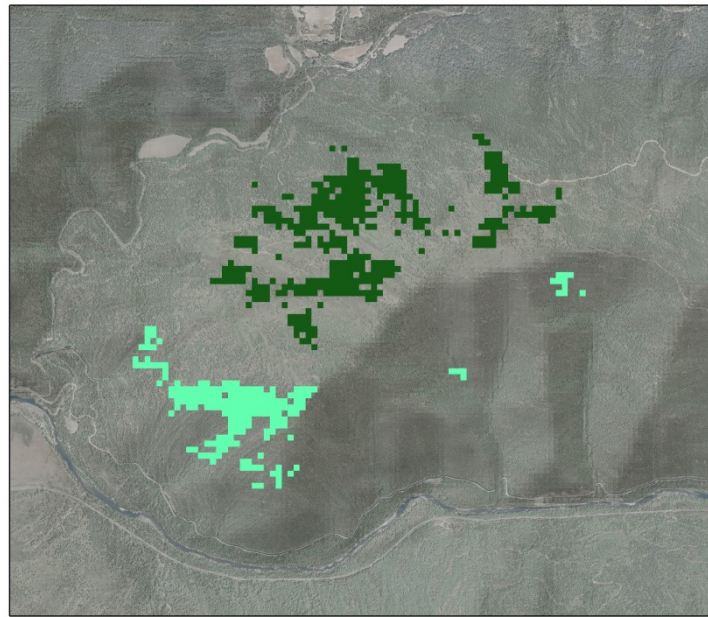


Figura 2. Especies forestales representadas en el incendio 29

ESPECIES FORESTALES EN EL INCENDIO 30



0 0.125 0.25 0.5 0.75 1 Kilómetros

ESPECIES

■ Pinus nigra / Pinus sylvestris ■ Quercus faginea

Figura 3. Especies forestales representadas en el incendio 30

ESPECIES FORESTALES EN EL INCENDIO 32

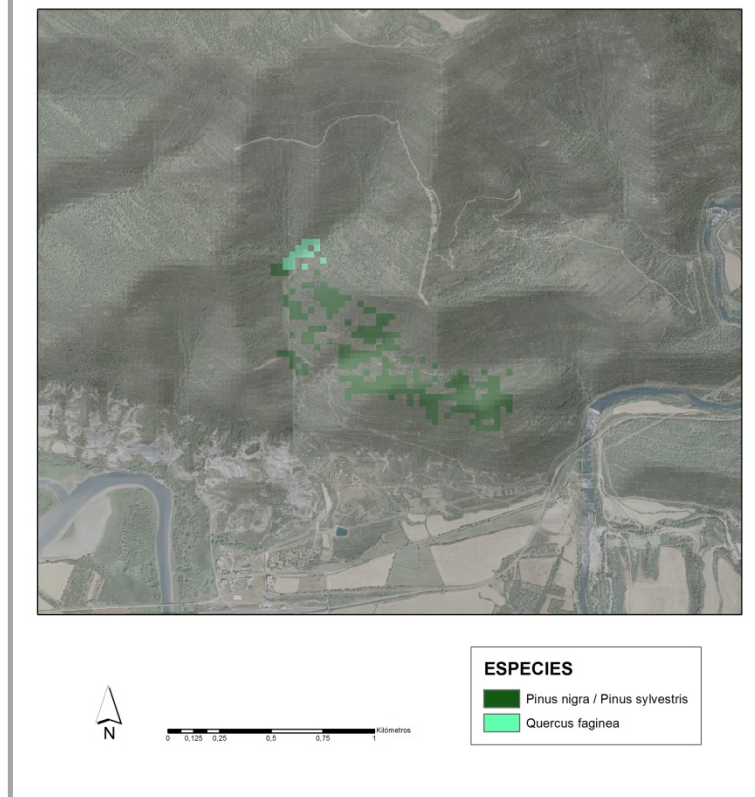
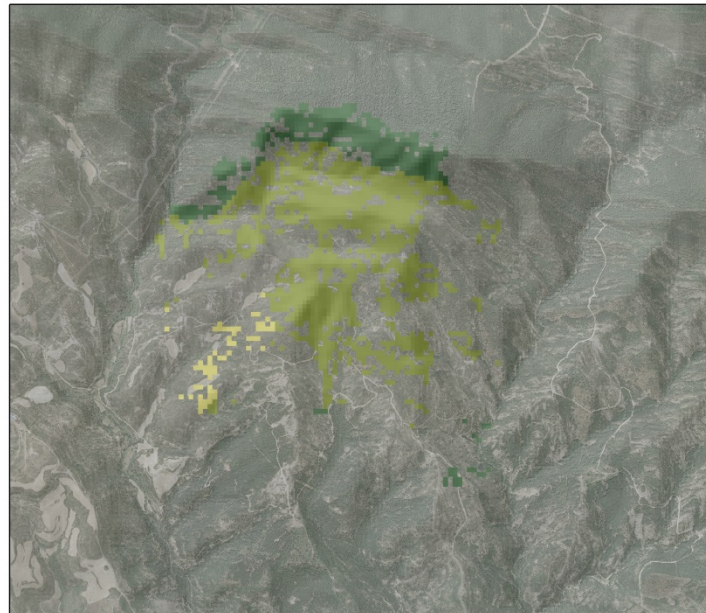


Figura 4. Especies forestales representadas en el incendio 32

ESPECIES FORESTALES EN EL INCENDIO 34



0 0.15 0.3 0.6 0.9 1.2 Kilómetros

ESPECIES




-  Brachypodium retusum / Lastonar mixto
-  Pinus nigra / Pinus sylvestris
-  Quercus ilex rotundifolia

Figura 3. Especies forestales representadas en el incendio 34

ESPECIES FORESTALES EN EL INCENDIO 36

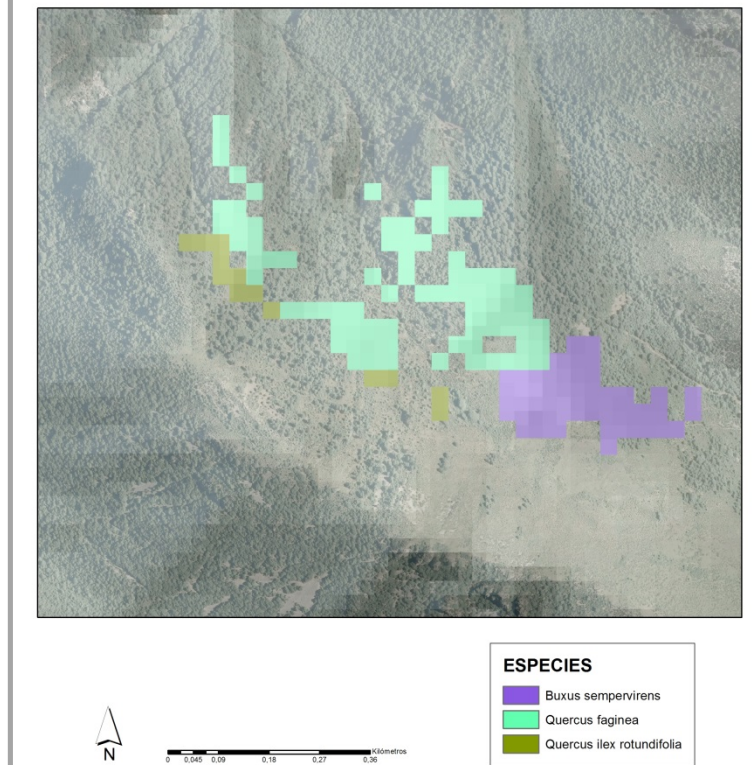


Figura 0. Especies forestales representadas en el incendio 36

ESPECIES FORESTALES EN EL INCENDIO 38

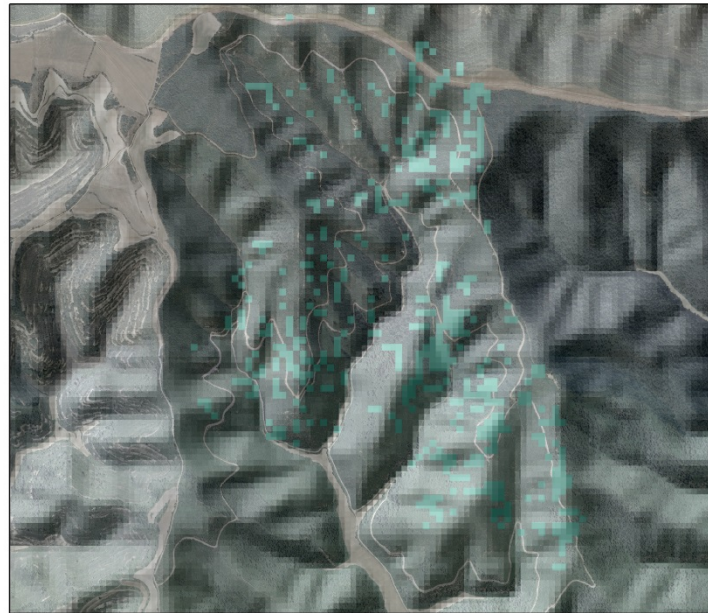


Figura 7. Especies forestales representadas en el incendio 38

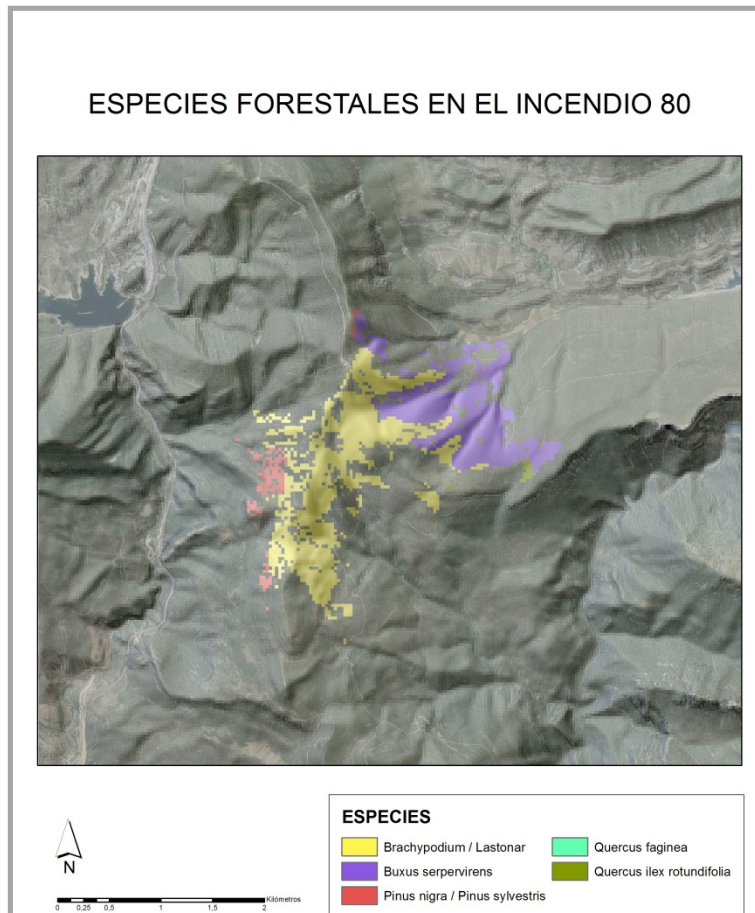


Figura 6. Especies forestales representadas en el incendio 80

Para los análisis que se exponen a continuación se consideraron los siete grupos de formaciones vegetales sin tener en cuenta su localización en los diferentes incendios y siguiendo de forma correlativa la información sobre el NDVI que se obtuvo de las imágenes Landsat. El primer valor del mismo se computó para el año 1984 y se toma como referencia del estado de la vegetación antes de que el incendio se produjese. A partir del año del incendio, 1986, se dispone de información cada año o cada dos años, por tanto en periodos irregulares.

En primer lugar se va a examinar la evolución del NDVI por grupos para explorar el comportamiento general de las series de NDVI. En paralelo se representarán los vectores de recuperación del NDVI junto con tablas de índices simples y de valor para cuantificar, tanto la intensidad como el tiempo necesario para alcanzar el nivel pre-fuego. Posteriormente, se estudiarán posibles relaciones del índice con variables climáticas tales como la precipitación y el índice de sequía SPEI y a continuación se modelizará la serie de NDVI para el periodo de tiempo considerado por grupo vegetal y localización. Por último se estudiarán los errores de predicción con los modelos de ajuste

4 EVOLUCIÓN TEMPORAL DEL NDVI

En este apartado se va a analizar el nivel de recuperación de la cubierta vegetal en las zonas quemadas, valorando tanto la intensidad como la velocidad a la que ocurre a través de la evolución del índice NDVI.

En la figura 9 se representa la evolución temporal de la media de NDVI para todos los grupos considerados en este estudio. En una primera inspección visual se aprecia un patrón

común que comienza tras la lógica caída del índice en el momento del incendio, con una recuperación de fuerte pendiente en los primeros años. Se observan a asimismo, picos ascendientes y descendientes en todas las series que, aunque de diferente magnitud, son coincidentes en el tiempo.

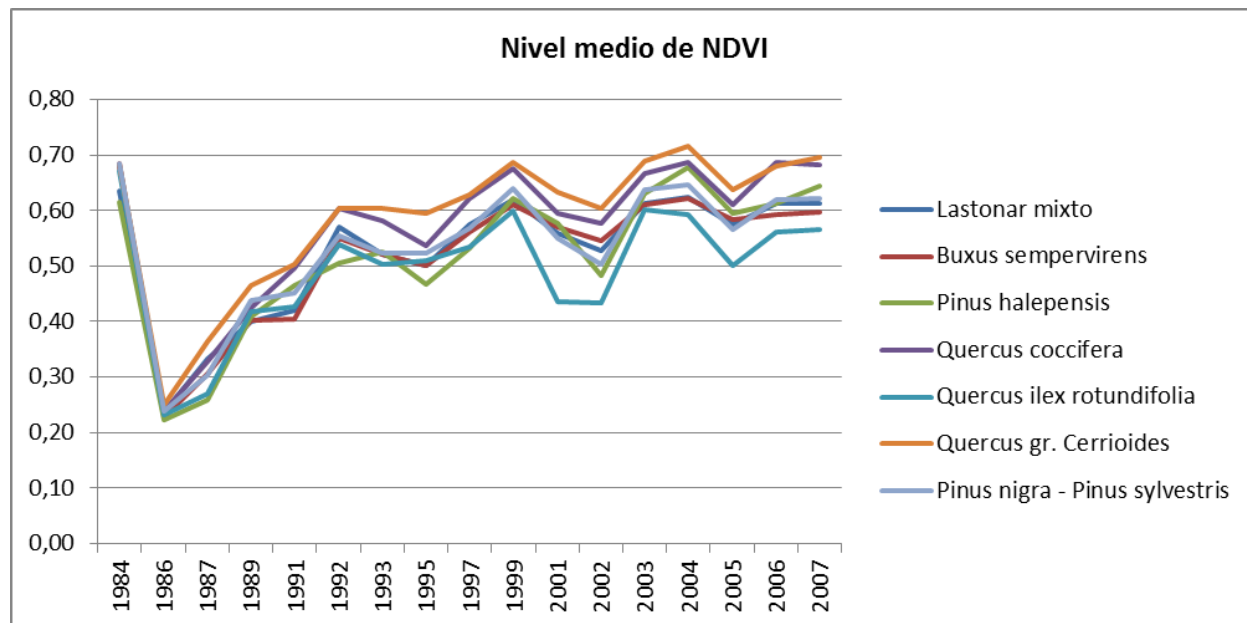


Figura 9. Evolución del nivel medio de NDVI para todos los grupos

Tabla 3. Series de las desviaciones típicas del índice NDVI por grupo

	<i>Lastonar mixto</i>	<i>Buxus sempervirens</i>	<i>Pinus halepensis</i>	<i>Quercus coccifera</i>	<i>Quercus ilex</i>	<i>Quercus gr. cerrioides</i>	<i>Pinus nigra - Pinus sylvestris</i>
1984	0,067	0,057	0,038	0,057	0,061	0,055	0,055
1986	0,040	0,041	0,036	0,076	0,052	0,045	0,055
1987	0,057	0,055	0,037	0,068	0,040	0,054	0,058
1989	0,050	0,053	0,050	0,078	0,047	0,072	0,060
1991	0,052	0,052	0,056	0,097	0,048	0,075	0,065
1992	0,052	0,051	0,054	0,063	0,046	0,054	0,057
1993	0,058	0,055	0,064	0,079	0,050	0,067	0,067
1995	0,063	0,052	0,056	0,099	0,057	0,069	0,074
1997	0,052	0,051	0,047	0,063	0,052	0,052	0,056
1999	0,054	0,048	0,065	0,066	0,057	0,057	0,061
2001	0,056	0,072	0,052	0,078	0,053	0,065	0,079
2002	0,065	0,052	0,092	0,071	0,076	0,069	0,070
2003	0,064	0,050	0,062	0,096	0,077	0,066	0,065
2004	0,061	0,054	0,066	0,075	0,071	0,060	0,064
2005	0,072	0,058	0,070	0,075	0,079	0,069	0,079
2006	0,060	0,054	0,064	0,069	0,069	0,060	0,065
2007	0,065	0,056	0,064	0,070	0,072	0,060	0,069

Para complementar la información de las medias se presentan las desviaciones típicas en la tabla 3, donde se puede observar que, en general, se mantienen en unos rangos similares en toda la trayectoria de la serie para cada grupo vegetal y en todos los instantes temporales, excepto *Quercus coccifera* que presenta fuertes aumentos en algunos momentos y en menor medida *Quercus ilex*.

Con el fin de analizar las peculiaridades que se mencionan, a continuación se presenta un análisis longitudinal individualizado para cada una de las especies.

4.1. Lastonar mixto

El primer grupo es el formado por las especies *Brachypodium* y lastonar, de ahora en adelante lastonar mixto. En la figura 10 está representada la evolución del índice NDVI de las series de los percentiles 5, 10, 25, 50, 75 y 90, además de la media.

La trayectoria de las series, como se puede observar, es prácticamente la misma y la distancia entre el percentil 5 y el 95 en el año 1984 resulta ser prácticamente la misma que al final del periodo de estudio en 2007. Es importante resaltar que media y mediana coinciden, lo que informa de la simetría de la distribución. Además el coeficiente de variación de Pearson se encuentra para cada una de las series e instantes temporales en valores que oscilan entre los 0,086 y 0,173, lo que permite utilizar la media como medida representativa de la distribución.

Se aprecia con claridad la caída en el nivel de NDVI acontecida el año 1986 a consecuencia del incendio y como a partir de ese momento aunque con diferentes gradientes, las series muestran una tendencia global creciente que se estabiliza en los últimos años. De forma más local se puede observar que aparecen descensos importantes en los años 1995, 2002 y 2005.

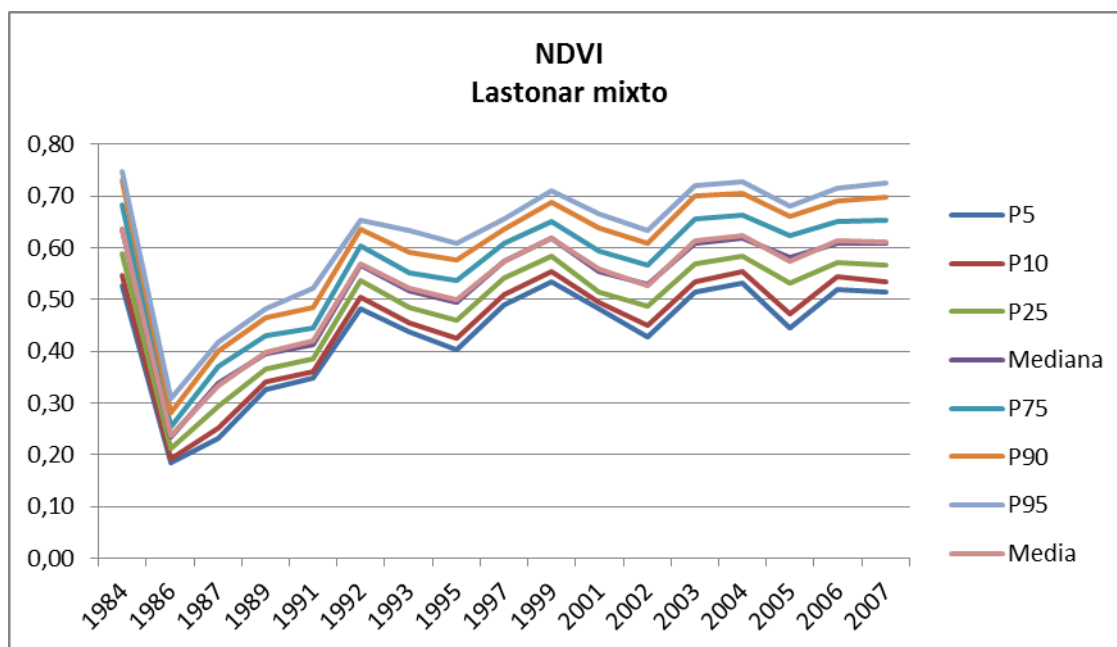


Figura 10. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para el grupo Lastonar

La recuperación del nivel medio de NDVI hasta el final del periodo de estudio, 2007 se visualiza más claramente en la figura 11, donde el vector de recuperación del lastonar mixto, representa la trayectoria que marca el valor del NDVI en tres instantes de tiempo: pre-fuego (1984), fuego (1986), el año en el que alcanza el valor máximo post-fuego (2004). Queda patente

la caída que se produce en el momento del incendio y señala el nivel alcanzado al final de periodo de estudio, que en este caso no llega al valor de referencia a pesar del tiempo transcurrido, más de 20 años.

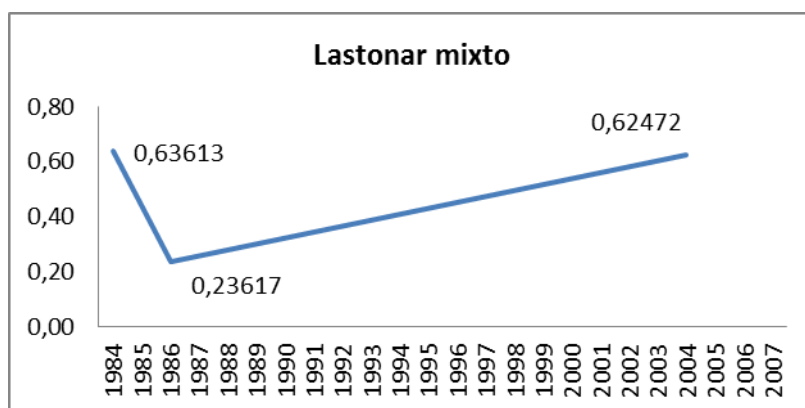


Figura 11. Vector de recuperación de NDVI para Lastonar mixto

A la vista de la figura parece oportuno cuantificar porcentualmente y de forma relativa la recuperación del nivel de NDVI. Para llevar a cabo esta valoración se han calculado varios índices, cuyos resultados se presentan en la tabla 3 y que completan la información del vector de recuperación.

En primer lugar se ha calculado un índice simple tomando como base el valor del NDVI en el año 1984.

Tabla 4. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para Lastonar mixto

	NDVI medio	Índice base 84	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,63613	100,00%		
1986	0,23617	37,13%	-62,87%	-62,87%
1987	0,33226	52,23%	-47,77%	15,11%
1989	0,39905	62,73%	-37,27%	10,50%
1991	0,41991	66,01%	-33,99%	3,28%
1992	0,57005	89,61%	-10,39%	23,60%
1993	0,52139	81,96%	-18,04%	-7,65%
1995	0,50047	78,67%	-21,33%	-3,29%
1997	0,57403	90,24%	-9,76%	11,56%
1999	0,61920	97,34%	-2,66%	7,10%
2001	0,55899	87,87%	-12,13%	-9,47%
2002	0,52734	82,90%	-17,10%	-4,98%
2003	0,61292	96,35%	-3,65%	13,45%
2004	0,62472	98,21%	-1,79%	1,85%
2005	0,57423	90,27%	-9,73%	-7,94%
2006	0,61304	96,37%	-3,63%	6,10%
2007	0,61228	96,25%	-3,75%	-0,12%

De acuerdo con este, se puede tasar el nivel de recuperación de la vegetación tomando como valor de comparación el que tenía antes del fuego, que es la única referencia del NDVI para los

píxeles ocupados por esa especie. Esto no quiere decir que dicho valor sea o haya sido el nivel óptimo, el valor medio o incluso un ‘mal’ año para la vegetación en términos del NDVI, pero se considera que la recuperación o regeneración de la cobertura vegetal debería de estar próximo a él y se toma, pues, como el 100%. A continuación se observa como el NDVI desciende al 37,13% del valor anterior, es decir se ha producido un descenso del 62,87% respecto al que tenía en 1984. De esta forma la segunda columna de la tabla informa de la evolución del NDVI en porcentaje respecto a su estado antes del incendio. La tercera columna, el Índice de Variación respecto al año 1984, cuantifica la modificación en el nivel de NDVI sufrida en ese instante respecto al estado pre-fuego y la última columna proporciona la variación del índice NDVI con respecto al instante inmediatamente anterior de la serie.

Tal y como aparece en la tabla 4 se puede ver que al final del periodo de estudio el NDVI alcanzó el 96,25% del valor que tenía antes del fuego, aunque este no fue el máximo de la serie que tuvo lugar el año 2004. Asimismo, se puede apreciar que la rápida recuperación de los primeros años experimenta una desaceleración o casi estabilización, con algunas oscilaciones, en los últimos años que ya quedaban de manifiesto en la representación gráfica.

A través del gráfico de los intervalos de confianza al 95% para las medias de NDVI para el periodo de referencia (1984), el año en que se alcanzó el máximo (2004) y el último año a estudio (2007) (ver figura 12), se concluye que existen diferencias estadísticamente significativas, por lo que se puede aseverar que el nivel de NDVI que poseía esta especie en el instante pre-fuego no se ha llegado a recuperar y tras un proceso de regeneración de 18 años todavía necesitaría un aumento de alrededor de un 4% para igualarlo.

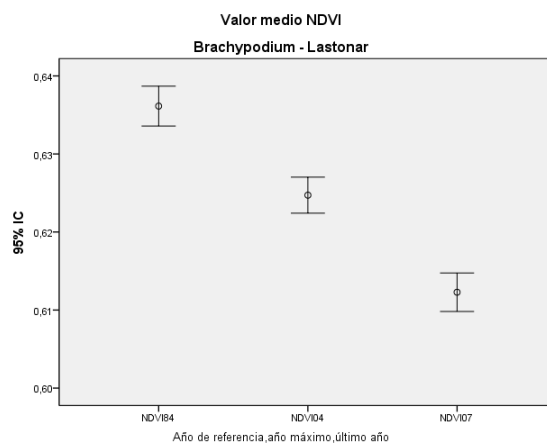


Figura 12. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio.

4.2. *Buxus sempervirens*

Para la especie *Buxus sempervirens* se representan, de nuevo, las series de percentiles del nivel de NDVI, ver figura 13.

De nuevo la trayectoria de las series es prácticamente la misma. La variabilidad del NDVI en todos los puntos es similar y la media y mediana coinciden informando de la simetría de la distribución. Además el coeficiente de variación de Pearson se encuentra para cada una de las series e instantes temporales en valores que oscilan entre 0,079 y 0,182, lo que autoriza a utilizar la media como medida representativa de la distribución.

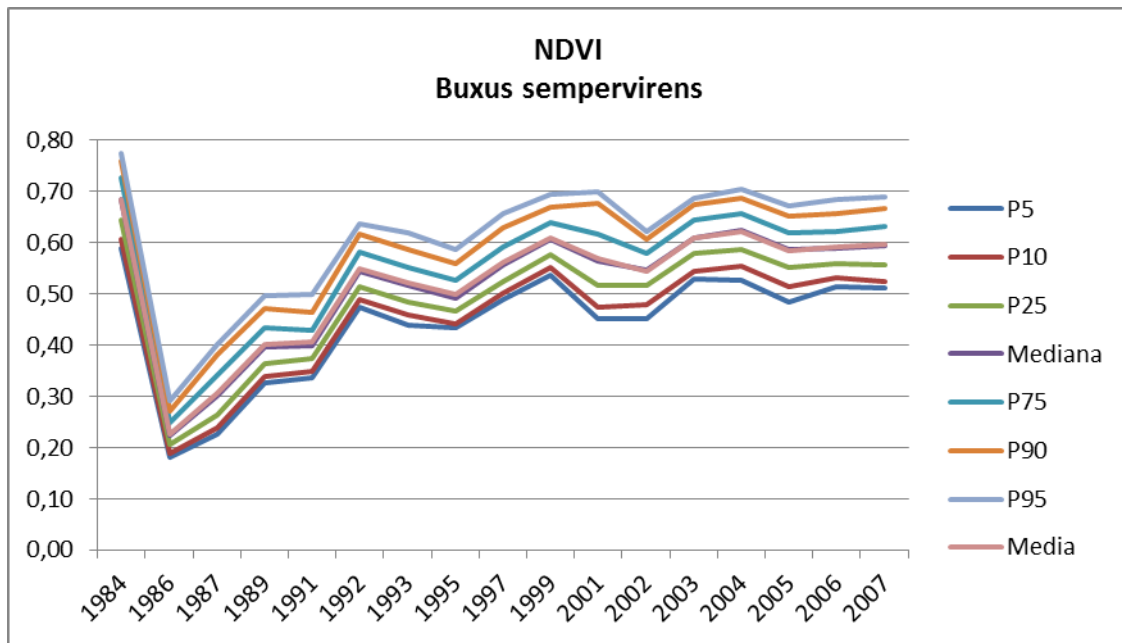


Figura 13. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para *Buxus sempervirens*

El brusco descenso el nivel de NDVI en el año 1986 a consecuencia del incendio da lugar al mínimo valor de las series que a partir de ese momento, aunque con diferentes pendientes, muestra una tendencia global creciente que se estabiliza alrededor de los años intermedios y que continua hasta el año 2007. De forma local, se puede observar que aparecen descensos en algunos años, aunque sin la relevancia, en general, de los observados para el grupo lastonar mixto. La recuperación del nivel medio de NDVI hasta el final del periodo de estudio se puede visualizar más claramente en la figura 14 donde se representa el vector de recuperación de *Buxus sempervirens* del NDVI en tres instantes de tiempo: pre-fuego (1984), fuego (1986), año en el que alcanza el nivel máximo post-fuego (2004). En esta especie el nivel final de NDVI es claramente inferior al que tenía en el año de referencia, 1984.

Partiendo de un NDVI de 0,68461 en el año 1984, tras 21 años después del fuego, en 2007, este alcanzó un valor de 0,59634 lo que supone un 87,11% del inicial. Una pérdida no recuperada de casi un 13% podría indicar la dificultad de esta especie para regenerarse tras un incendio. Ni siquiera considerando el año en el que se alcanzó el máximo, 2004 con una cifra de 0,62188, podría hablarse de completa recuperación ya que se encuentra en menos de un 91% del valor de referencia.

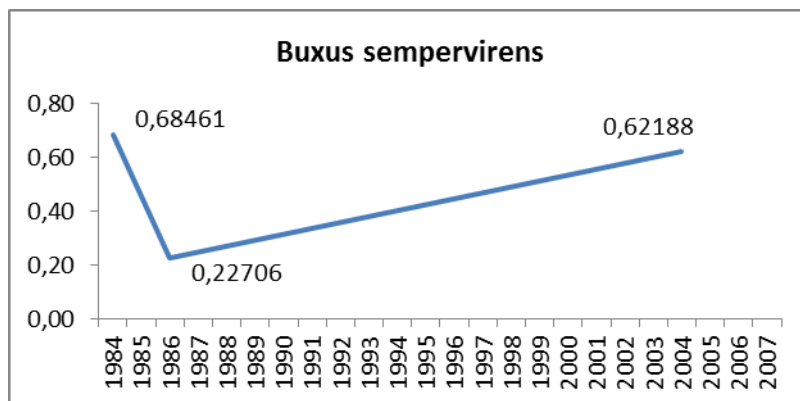


Figura 14. Vector de recuperación de NDVI para *Buxus sempervirens*

Tabla 5. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio de *Buxus sempervirens*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,68461	100,00%		
1986	0,22705	33,17%	-66,83%	-66,83%
1987	0,30609	44,71%	-55,29%	11,54%
1989	0,40118	58,60%	-41,40%	13,89%
1991	0,40534	59,21%	-40,79%	0,61%
1992	0,54948	80,26%	-19,74%	21,06%
1993	0,52073	76,06%	-23,94%	-4,20%
1995	0,50021	73,07%	-26,93%	-3,00%
1997	0,56142	82,01%	-17,99%	8,94%
1999	0,60998	89,10%	-10,90%	7,09%
2001	0,56959	83,20%	-16,80%	-5,90%
2002	0,54503	79,61%	-20,39%	-3,59%
2003	0,61020	89,13%	-10,87%	9,52%
2004	0,62188	90,84%	-9,16%	1,71%
2005	0,58418	85,33%	-14,67%	-5,51%
2006	0,59218	86,50%	-13,50%	1,17%
2007	0,59634	87,11%	-12,89%	0,61%

Numéricamente, la tabla 5 muestra como el mayor crecimiento tiene lugar hasta el año 1999, donde parece haber un estancamiento en la tendencia con algunas oscilaciones, como ya se percibía en la gráfica de percentiles. La mayor caída respecto al periodo anterior corresponde al año 2001, resultado que habría que considerar con reservas, puesto que de la imagen de Landsat de ese año solamente se obtuvo información para un 10% de los píxeles ocupados por esa especie, que se encontraban todos localizados en un área concreta.

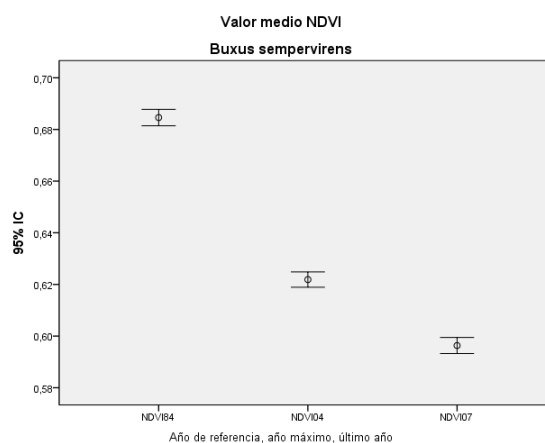


Figura 15. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

La figura 15 muestra como para el nivel de confianza del 95%, las medias de NDVI tanto del año 2007 como del año 2004, donde se alcanza el máximo valor tras el incendio, no pueden considerarse iguales a la media de NDVI del año 1984 ya que no existe solape entre los intervalos calculados. Este grupo después de un proceso de regeneración de 18 se encuentra muy alejado del valor pre-fuego del índice cifrándose su recuperación en algo menos del 91%.

4.3. *Pinus halepensis*

La inspección visual de las series de los percentiles del NDVI del *Pinus halepensis* en la figura 16 muestra, también para esta especie, la tendencia general que ya se ha visto en las estudiadas anteriormente, pero con algunas particularidades.

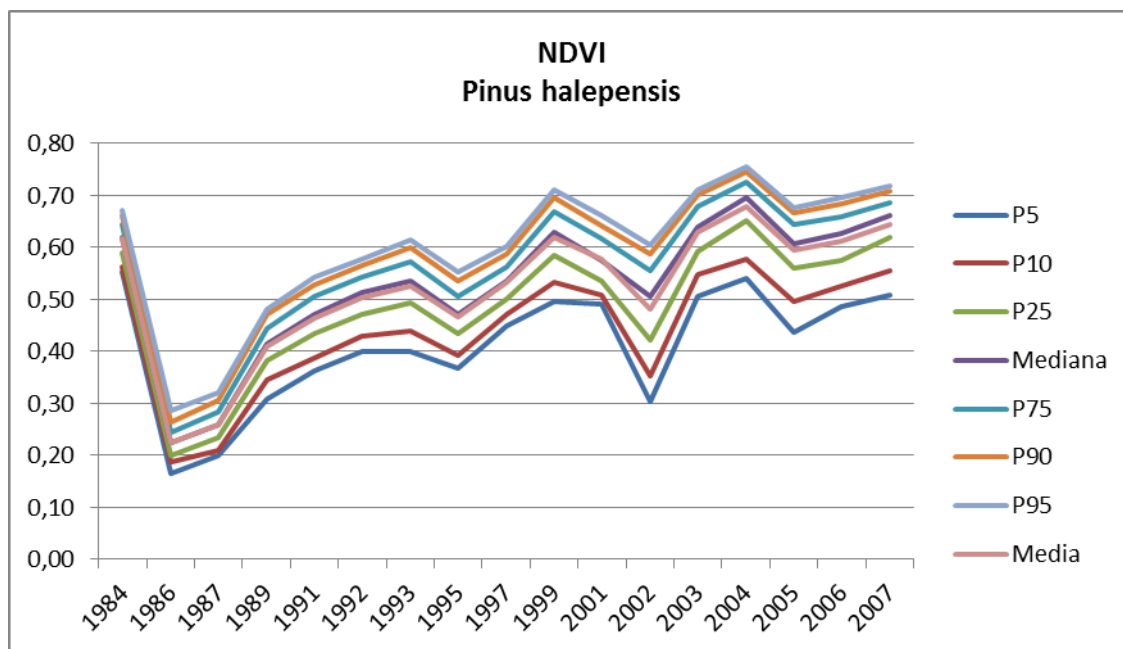


Figura 16. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para *Pinus halepensis*

En primer lugar hacer notar, obviamente, la brusca caída en el año 1986 del incendio para iniciarse una recuperación que en este caso llega no solo a alcanzar sino a superar los niveles de referencia del índice de esta especie antes del fuego.

Resulta llamativo el pico descendente ocurrido en el año 2002, que aunque no es el único sí resulta especialmente dramático, observándose a continuación una rápida recuperación del índice en el corto espacio de tiempo de un año, a partir del cual la serie avanza con una tendencia ligeramente creciente.

La variabilidad del NDVI tiende a aumentar ligeramente con el paso del tiempo y la media y la mediana, que muestran valores similares en los primeros años, acaban con un ligero distanciamiento, situándose la mediana en valores superiores a la media lo que indica una cierta tendencia a la asimetría negativa. En cualquier caso el coeficiente de variación de Pearson se encuentra para cada una de las series e instantes temporales en valores que oscilan entre 0,061 y 0,191, por lo que se puede seguir empleando la media como medida de representación de la distribución del NDVI a lo largo del tiempo.

La representación del vector de recuperación de la figura 17 informa del instante en el que recupera su nivel pre-fuego de NDVI en el año 1999, que posteriormente siguió aumentando, pasando de 0,61602 en 1986 a 0,64424 en 2004.

Los índices calculados para esta especie (ver tabla 6) permiten evaluar la evolución numéricamente. Se observa que en el año 1999 ya se ha alcanzado el valor de NDVI anterior al fuego y llega al máximo en el año 2004, superando en más de un 10% el valor del año 1984. Este hecho hace reflexionar sobre la capacidad de regeneración de la especie que podría calificarse de

notable, o bien plantear la hipótesis de que, quizás, otra u otras especies de rápido crecimiento hubieran colonizado parte del espacio ocupado originalmente por *Pinus halepensis*.

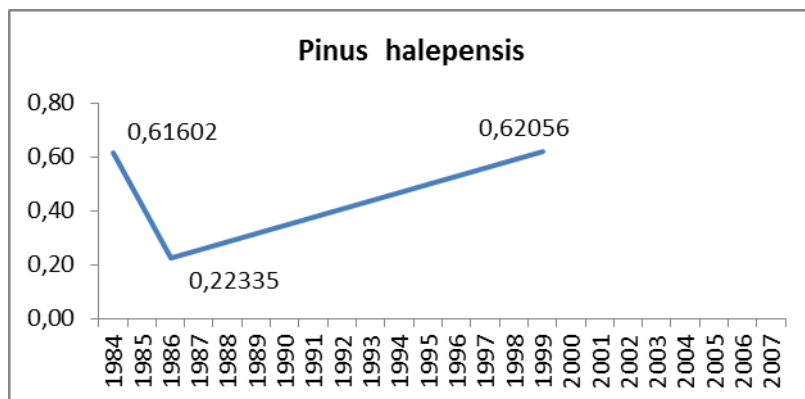


Figura 17. Vector de recuperación de NDVI para *Pinus halepensis*

Una observación al índice de valor respecto al periodo anterior da una información sorprendente y es que del año 2003 a 2004 el NDVI experimentó un aumento de más del 24%.

Para analizar la significación estadística del nivel de recuperación se acude al cálculo del intervalo de confianza para las medias que están más próximas al nivel de referencia de 1984 (ver figura 18).

Tabla 6. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para *Pinus halepensis*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,61602	100,00%		
1986	0,22335	36,26%	-63,74%	-63,74%
1987	0,25861	41,98%	-58,02%	5,72%
1989	0,40969	66,51%	-33,49%	24,52%
1991	0,46451	75,40%	-24,60%	8,90%
1992	0,50456	81,91%	-18,09%	6,50%
1993	0,52573	85,34%	-14,66%	3,44%
1995	0,46671	75,76%	-24,24%	-9,58%
1997	0,53207	86,37%	-13,63%	10,61%
1999	0,62056	100,74%	0,74%	14,36%
2001	0,57652	93,59%	-6,41%	-7,15%
2002	0,48247	78,32%	-21,68%	-15,27%
2003	0,63067	102,38%	2,38%	24,06%
2004	0,67779	110,03%	10,03%	7,65%
2005	0,59386	96,40%	-3,60%	-13,63%
2006	0,61301	99,51%	-0,49%	3,11%
2007	0,64424	104,58%	4,58%	5,07%

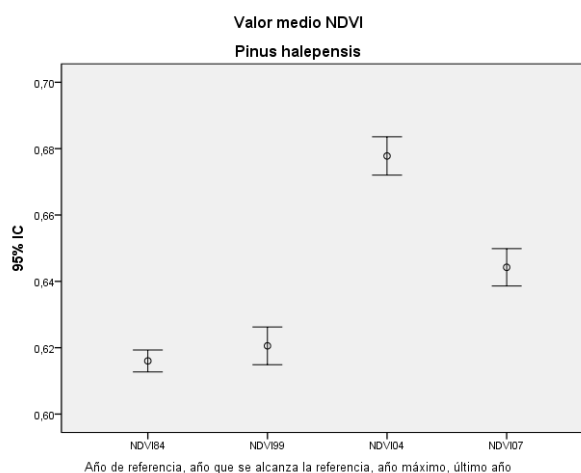


Figura 18. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

De acuerdo con el gráfico se puede concluir que el valor medio de NDVI del año 1999 no presenta diferencias con respecto al del año 1984, confirmando el momento en el que se alcanzó el valor de NDVI pre-fuego, pero sí que existen tanto con el año 2004 como con el 2007 aunque menos notables con este último, indicando que el nivel de referencia del índice quedó superado con amplitud en ambos años. Por tanto, se puede concluir que esta especie presenta una notable capacidad de recuperación ya que ha necesitado, únicamente, 13 años para recuperar su nivel de NDVI pre-fuego.

4.4. *Pinus nigra* – *Pinus sylvestris*

Las especies *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris*, como ya se ha comentado anteriormente, se agruparon en una sola categoría y permanecerán como una sola clase para todos los análisis en este trabajo.

La representación de los percentiles, en la figura 19, muestra el patrón, ya conocido, de la importante caída del nivel de NDVI debida al incendio, que posteriormente crecen con pendiente acusada en los primeros años y se estabilizan en los últimos años. De nuevo se observa la presencia de fuertes oscilaciones, especialmente en los años 2002 y 2005. Media y mediana evolucionan tomando valores prácticamente iguales a lo largo de casi toda la serie y se observa que la variabilidad al final de la serie es algo mayor que al principio, sin ser esta notable. El coeficiente de variación de Pearson se mantiene en valores reducidos en todo momento, moviéndose entre 0,095 y 0,229. Esta información sobre la distribución permite utilizar la media como medida resumen de la serie de NDVI.

Una vez analizado el perfil de las series, nuestro interés se centra en valorar la recuperación del nivel de NDVI tras el incendio del año 1986. En la figura 20 se ve como el nivel anterior al fuego no llega a recuperarse 21 años después. Los valores absolutos lo indican con claridad, no obstante una cuidadosa mirada a los índices simples y de variación calculados para la especie permiten conocer de forma puntual la evolución y reconocer tanto estados intermedios de la regeneración como finales, con medidas relativas.

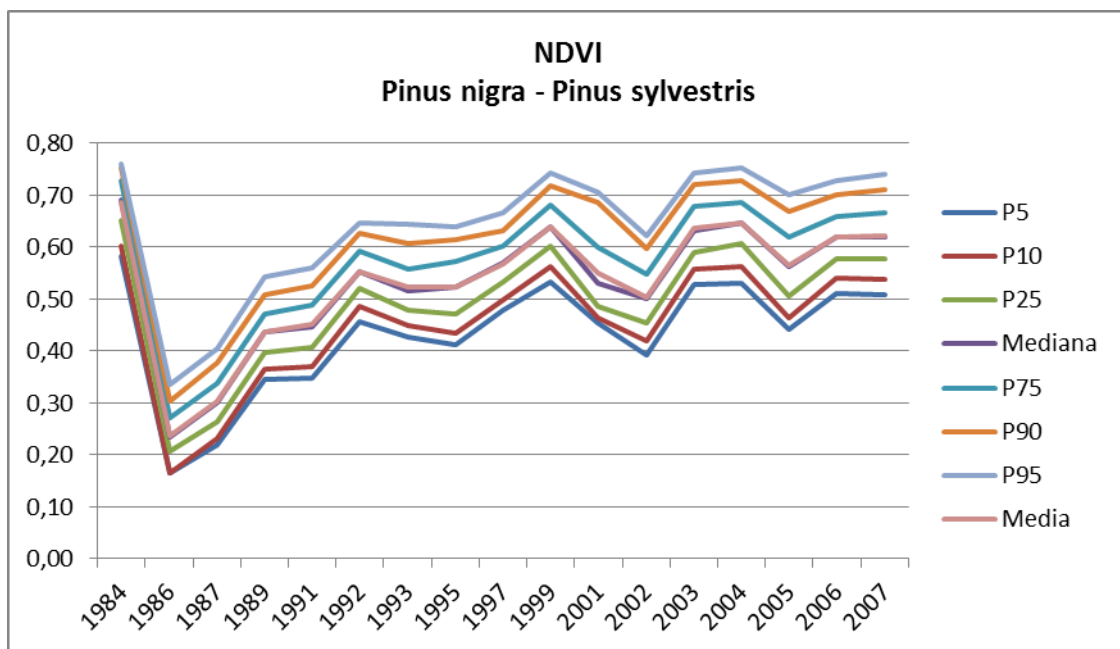


Figura 19. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para el grupo *Pinus nigra - Pinus sylvestris*

En la tabla 7 se aprecia como el máximo nivel de NDVI se obtuvo en el año 2004 alcanzando un 94,22% del valor de referencia pre-fuego, todavía lejos del 100%. Los años 2001 y 2005 presentan las mayores caídas respecto al año anterior cifradas en más de un 10%, extremo que ya aparecía en la gráfica de percentiles. Reseñar que la mayor caída de NDVI con respecto al periodo anterior se produce en el año 2001, repitiéndose el problema que ya apareció para *Buxus sempervirens*, causado por la falta de información de ese año, de la que carecen un 80% de los píxeles de esta especie.

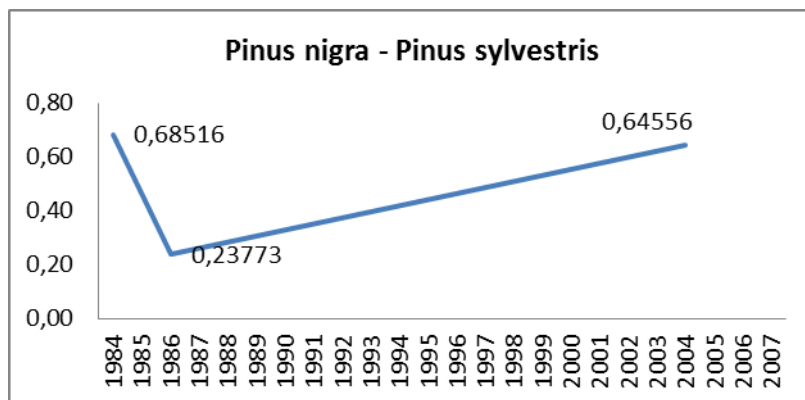


Figura 20. Vector de recuperación de NDVI para *Pinus nigra - Pinus sylvestris*

La figura 21 deja patente la diferencia de las medias, a través de sus intervalos de confianza al nivel del 95%, para los instantes pre-fuego, el año en el que se alcanza el valor máximo, 2004 y la media del año 2007, final de la serie.

Tabla 7. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para *Pinus nigra* - *Pinus sylvestris*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,68516	100,00%		
1986	0,23773	34,70%	-65,30%	-65,30%
1987	0,30407	44,38%	-55,62%	9,68%
1989	0,43713	63,80%	-36,20%	19,42%
1991	0,45044	65,74%	-34,26%	1,94%
1992	0,55400	80,86%	-19,14%	15,11%
1993	0,52300	76,33%	-23,67%	-4,52%
1995	0,52261	76,28%	-23,72%	-0,06%
1997	0,56873	83,01%	-16,99%	6,73%
1999	0,64003	93,41%	-6,59%	10,41%
2001	0,54942	80,19%	-19,81%	-13,22%
2002	0,50280	73,38%	-26,62%	-6,80%
2003	0,63640	92,88%	-7,12%	19,50%
2004	0,64556	94,22%	-5,78%	1,34%
2005	0,56460	82,40%	-17,60%	-11,82%
2006	0,61896	90,34%	-9,66%	7,93%
2007	0,62137	90,69%	-9,31%	0,35%

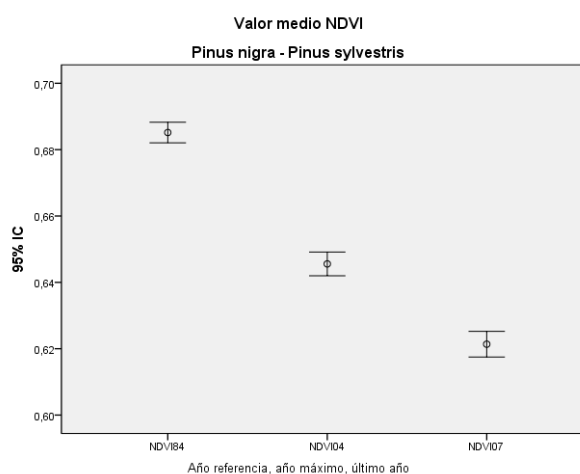


Figura 21. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

Se puede concluir que esta especie presenta problemas de regeneración, con una pérdida del 10% del nivel de referencia pre-fuego al final del periodo de estudio y que además necesitó 18 años para alcanzar el valor máximo de NDVI post-fuego, cifrado en un 94,22% del que tenía antes del incendio.

4.5. *Quercus coccifera*

Las series de percentiles que muestran la evolución del NDVI (ver figura 22), describen la tendencia de todas las series estudiadas hasta ahora, con el lógico descenso de su valor en el año del incendio para delinear una trayectoria con un rápido crecimiento inicial que se mantiene

prácticamente estable a partir del año 1999. También para esta especie aparecen oscilaciones perceptibles para los años 1995, 2001 y 2005, aunque no tan pronunciadas como en otras especies.

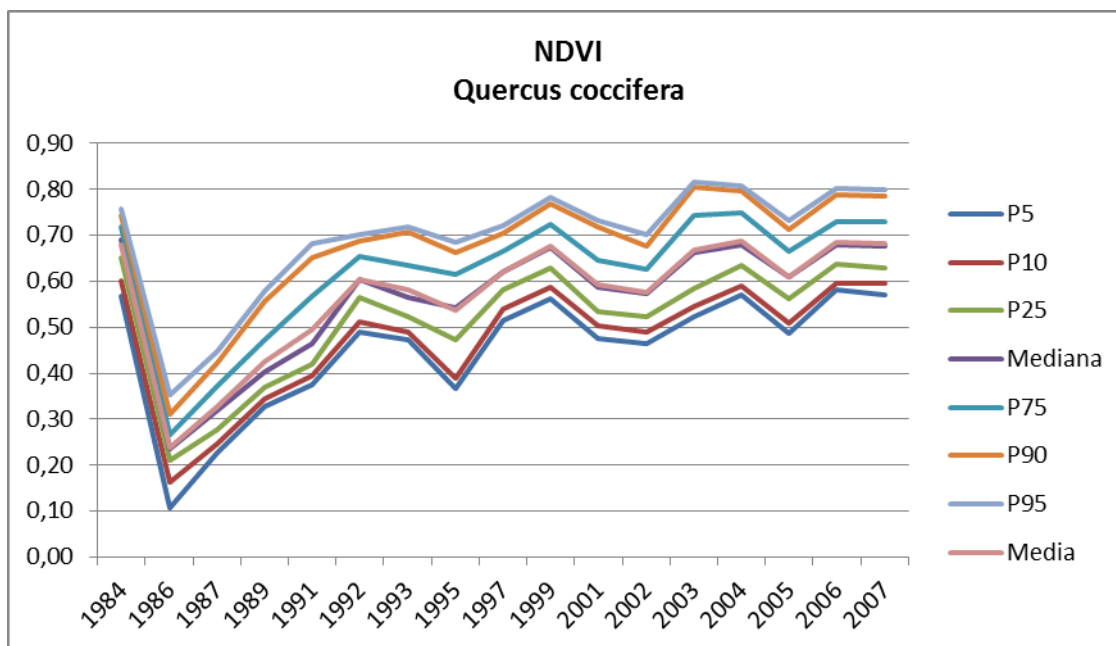


Figura 22. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para el grupo *Quercus coccifera*

La media y la mediana son casi completamente coincidentes en su evolución y se puede decir que la distribución de este índice es prácticamente simétrica. La variabilidad de la distribución es algo mayor al final del periodo de estudio, aunque sin diferencias notables. El coeficiente de variación de Pearson con valores entre 0,097 y 0,322 permiten trabajar con la media como medida de representación de toda la distribución.

Una mirada al vector de recuperación de *Quercus coccifera*, representado en la figura 23, permite observar como el nivel de NDVI en el año 1999 es similar al que la especie presentaba en las zonas analizadas antes del incendio de 1986.

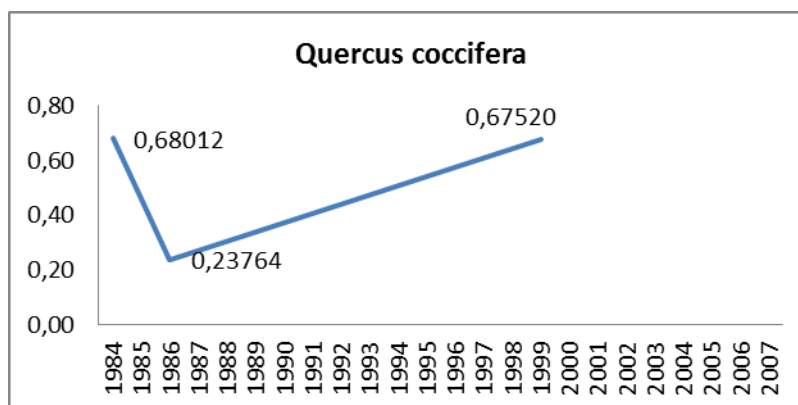


Figura 23. Vector de recuperación de NDVI para *Quercus coccifera*

De forma pormenorizada en las series de índices elaborados para esta especie (ver tabla 8), se observa que aunque el valor al final del periodo de estudio sobrepasó ligeramente el 100% del de referencia, el valor máximo de NDVI se alcanzó en el año 2004. No obstante, en términos

estadísticos podría, quizás, considerarse que la recuperación ya ocurrió en el año 1999, cuando su valor fue de 0,67520, es decir de un 99,28% del nivel pre-fuego. Como ya se constataba gráficamente, las oscilaciones no son excesivamente pronunciadas dando una imagen suavizada de la tendencia de la serie.

Tabla 8. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para *Quercus coccifera*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,68012	100,00%		
1986	0,23764	34,94%	-65,06%	-65,06%
1987	0,32879	48,34%	-51,66%	13,40%
1989	0,42545	62,55%	-37,45%	14,21%
1991	0,49582	72,90%	-27,10%	10,35%
1992	0,60436	88,86%	-11,14%	15,96%
1993	0,58056	85,36%	-14,64%	-3,50%
1995	0,53712	78,97%	-21,03%	-6,39%
1997	0,62116	91,33%	-8,67%	12,36%
1999	0,67520	99,28%	-0,72%	7,94%
2001	0,59375	87,30%	-12,70%	-11,98%
2002	0,57702	84,84%	-15,16%	-2,46%
2003	0,66751	98,15%	-1,85%	13,30%
2004	0,68736	101,06%	1,06%	2,92%
2005	0,61072	89,80%	-10,20%	-11,27%
2006	0,68555	100,80%	0,80%	11,00%
2007	0,68287	100,41%	0,41%	-0,39%

Con el objetivo de validar los comentarios sobre la recuperación de esta especie y la estabilidad que la serie muestra a partir del año 1999, se calculan los intervalos de confianza al 95% para las medias de los instantes en los que se alcanza o parece alcanzarse el 100% del nivel de NDVI pre-fuego (ver figura 24). Se observa que en los años 1999, 2004 y 2007 los intervalos de confianza se solapan con el de la media de 1984, con lo que se concluye que no existen diferencias estadísticamente significativas entre los niveles medios de NDVI en estos cuatro instantes.

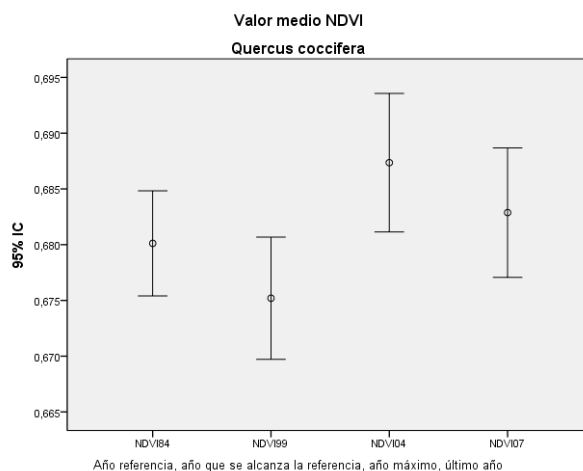


Figura 24. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año que alcanza la referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

Se puede concluir que los píxeles clasificados como *Quercus coccifera* han recuperado su nivel previo de NDVI sin gran dificultad ya que lo consiguen en un periodo de alrededor de 13 años.

4.6. *Quercus gr. cerrioides*

La especie *Quercus gr. cerrioides* repite patrón en la evolución del NDVI (ver figura 25). Tras el incendio el crecimiento del índice se inicia con fuerte pendiente que se suaviza a partir del año 1992, manteniendo una ligera tendencia creciente, aunque parsimoniosa, hasta el final del periodo de estudio. De nuevo aparecen descensos importantes en los años 2001, 2002 y 2005, aunque no con la relevancia observada en otras especies. La variabilidad de la serie se mantiene en límites similares del comienzo al fin del periodo. La mediana y la media son coincidentes, prácticamente, a lo largo de la serie y el coeficiente de variación de Pearson oscila entre 0,082 y 0,180. La media resulta ser un representante adecuado de la serie de NDVI para esta especie. Parece observarse una recuperación del nivel del índice hasta valores pre-fuego a partir de 1999 que habrá que validar posteriormente con información numérica.

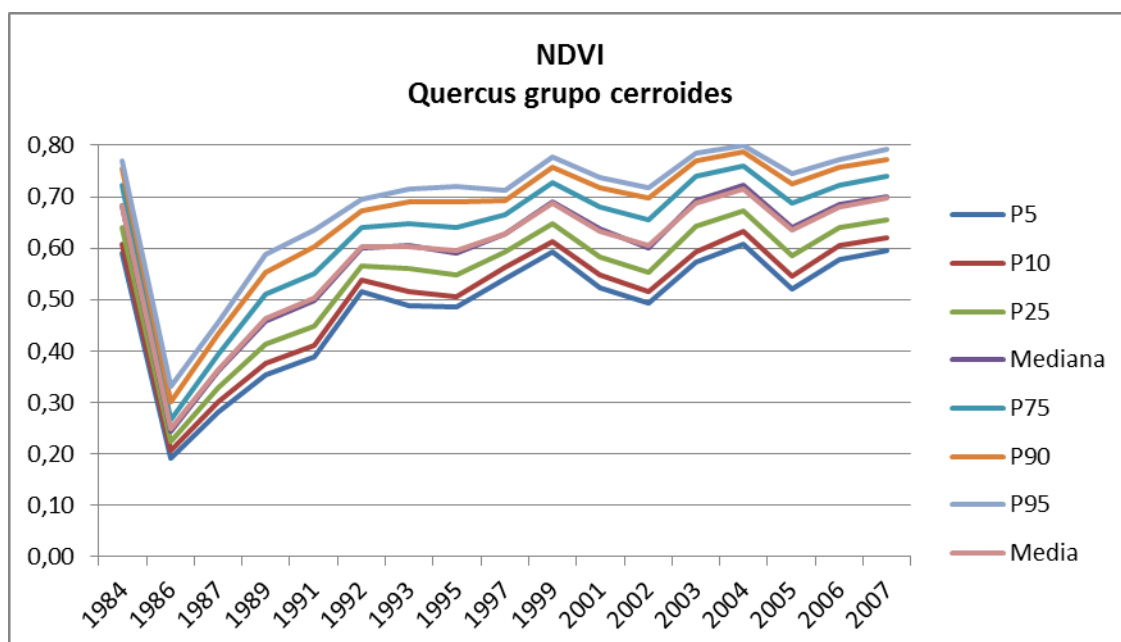


Figura 25. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para el grupo *Quercus gr. cerrioides*

El vector de recuperación de *Quercus gr. cerrioides* que aparece en la figura 26, exhibe un resultado acorde con una regeneración total del nivel de NDVI en el año 1999, llegando a superar el valor inicial del estado pre-fuego al final de la serie en 2007.

De acuerdo con la información proporcionada por la tabla 9, el nivel de referencia de NDVI se alcanzó en el año 1999 y aunque presenta oscilaciones a partir de ese momento se puede decir que se estabiliza alrededor de ese valor. Los descensos de los años 2001, 2002 y 2005, ya comentados con la figura de la serie de percentiles, son notables siendo la pérdida para el índice en este último año de más del 11% respecto al año anterior.

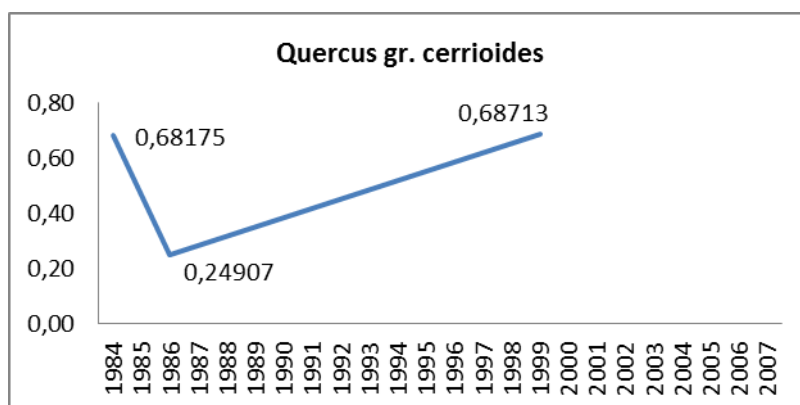


Figura 26. Vector de recuperación de NDVI para *Quercus gr. cerrioides*

La figura 27 que muestra los intervalos de confianza al 95% de las medias de NDVI para comparar el valor alcanzado en los años 1999, 2004 y 2007 con el de referencia pre-fuego de 1984, informa que tanto en 2004 como en 2007 las diferencias son estadísticamente significativas, pudiéndose considerar que al final del periodo de estudio el nivel de NDVI es algo superior al inicial. Es notable la capacidad de recuperación de este grupo que en 13 años ha recuperado su nivel anterior al fuego.

Tabla 9. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para *Quercus gr. cerrioides*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,68175	100,00%		
1986	0,24907	36,53%	-63,47%	-63,47%
1987	0,36393	53,38%	-46,62%	16,85%
1989	0,46368	68,01%	-31,99%	14,63%
1991	0,50393	73,92%	-26,08%	5,90%
1992	0,60277	88,41%	-11,59%	14,50%
1993	0,60405	88,60%	-11,40%	0,19%
1995	0,59485	87,25%	-12,75%	-1,35%
1997	0,62780	92,09%	-7,91%	4,83%
1999	0,68713	100,79%	0,79%	8,70%
2001	0,63373	92,96%	-7,04%	-7,83%
2002	0,60435	88,65%	-11,35%	-4,31%
2003	0,68822	100,95%	0,95%	12,30%
2004	0,71466	104,83%	4,83%	3,88%
2005	0,63647	93,36%	-6,64%	-11,47%
2006	0,68041	99,80%	-0,20%	6,45%
2007	0,69668	102,19%	2,19%	2,39%

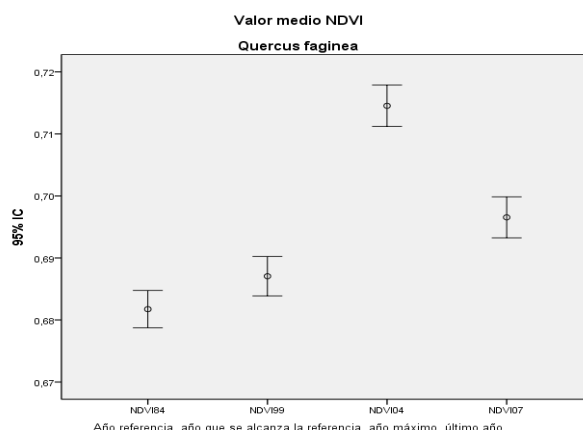


Figura 27. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año que alcanza la referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

4.7. *Quercus ilex rotundifolia*

El análisis de la evolución de los percentiles de la distribución del índice NDVI de los píxeles clasificados como *Quercus ilex rotundifolia* (ver figura 28), muestra de forma global la misma tendencia que las especies estudiadas hasta este momento. No obstante, aparece una anomalía en el año 2001, debida al problema con la imagen satelital de aquel año. En concreto, solamente alrededor del 1% de los píxeles en los que aparece esta especie disponen de información, por lo que los valores asignados a ese instante deben ser tomados con precaución. Salvo en ese año, los percentiles siguen trayectorias similares, con un ligero aumento en la variabilidad a lo largo del tiempo. Media y mediana dan cuenta de la simetría de la distribución y los valores del coeficiente de variación de Pearson, entre 0,085 y 0,226, permiten considerar a la media valor representativo para la serie de NDVI.

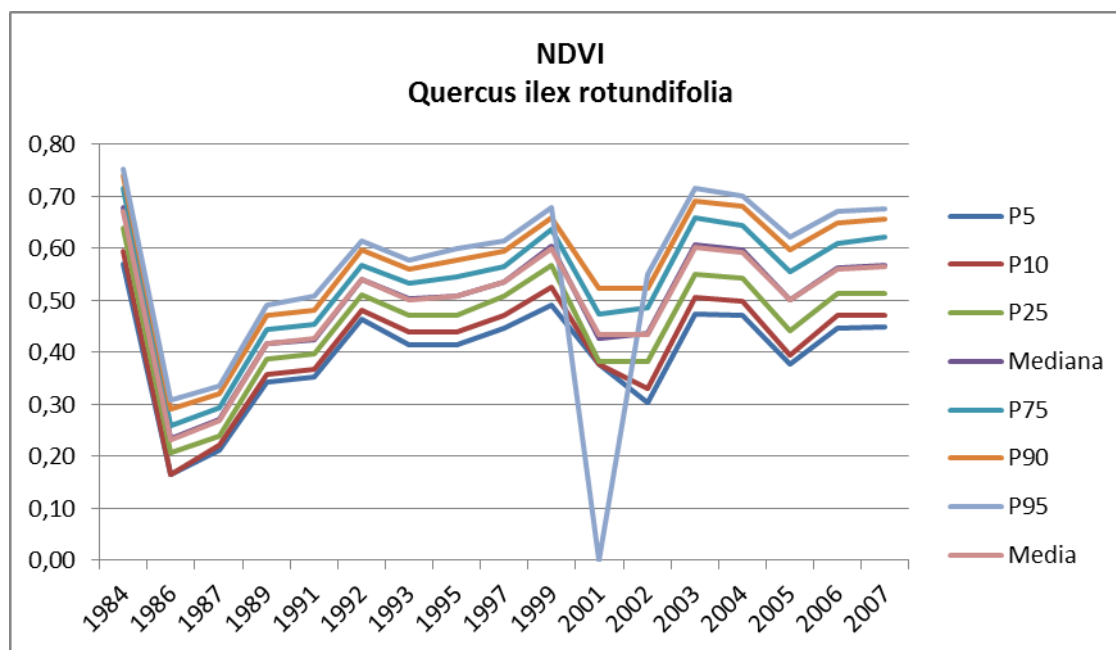


Figura 28. Evolución de los percentiles del nivel de NDVI para el grupo *Quercus ilex rotundifolia*

El vector de recuperación (ver figura 29), exhibe con claridad que la especie no ha sido capaz de regenerarse hasta alcanzar niveles pre-fuego de NDVI, encontrándose el valor del índice en el año 2003 cuando escala hasta su valor máximo, lejos todavía del de referencia.

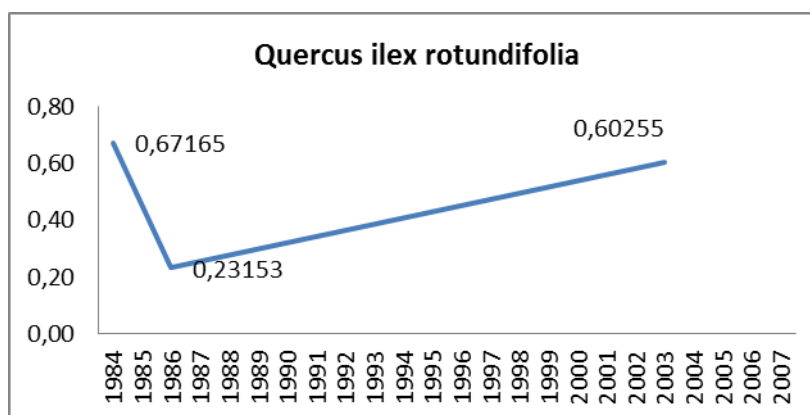


Figura 29. Vector de recuperación de NDVI para *Quercus ilex rotundifolia*

La tabla 10 permite dar cuenta de forma numérica, a través de los índices computados, de la falta de recuperación del NDVI. El máximo se alcanzó en 2003 no llegando al 90% del valor pre-fuego. En más de 20 años, por tanto se concluye que la especie *Quercus ilex rotundifolia* no ha podido regenerarse completamente. De nuevo recordar que los cálculos que hacen referencia al año 2001 deberán de tomarse con cautela por el escasísimo número de píxeles de los que se tiene información.

La figura 30 con los intervalos de confianza para la media de NDVI en los años 2003, máximo de la serie, y 2007 con respecto a 1984 corrobora la existencia de diferencias muy significativas en NDVI, claramente a la baja. Esta especie muestra importantes dificultades para regenerarse después de un incendio como el sufrido en el año 1986.

Tabla 10. Índice simple e índices de variación del nivel de NDVI medio para *Quercus ilex rotundifolia*

	NDVI medio	Índice base 86	IV respecto a 1984	IV resp. al periodo anterior
1984	0,67165	100,00%		
1986	0,23153	34,47%	-65,53%	-65,53%
1987	0,27010	40,21%	-59,79%	5,74%
1989	0,41672	62,04%	-37,96%	21,83%
1991	0,42727	63,62%	-36,38%	1,57%
1992	0,53937	80,31%	-19,69%	16,69%
1993	0,50176	74,71%	-25,29%	-5,60%
1995	0,50886	75,76%	-24,24%	1,06%
1997	0,53535	79,71%	-20,29%	3,94%
1999	0,59874	89,15%	-10,85%	9,44%
2001	0,43544	64,83%	-35,17%	-24,31%
2002	0,43353	64,55%	-35,45%	-0,28%
2003	0,60255	89,71%	-10,29%	25,16%
2004	0,59253	88,22%	-11,78%	-1,49%
2005	0,49999	74,44%	-25,56%	-13,78%
2006	0,56075	83,49%	-16,51%	9,05%
2007	0,56628	84,31%	-15,69%	0,82%

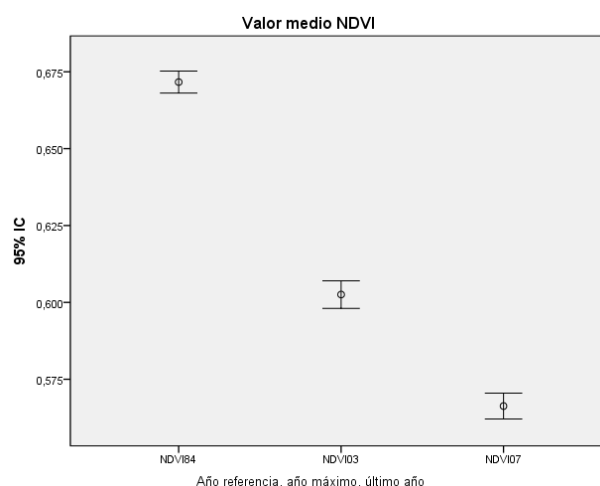


Figura 30. Intervalo de confianza (95%) para las medias de NDVI en el periodo de referencia, el año con valor máximo y el último año de estudio

4.8. Resumen de los rasgos comunes y diferenciadores de la evolución del NDVI de todas las especies

Tras el análisis de las series de percentiles de NDVI para los 7 grupos considerados, de sus vectores de recuperación y de los índices simples y de variación calculados para todos ellos, se pueden extraer, a modo de resumen, algunos rasgos comunes y ciertas características diferenciales.

Es importante remarcar que la recuperación del NDVI no implica que la especie que ocupa la superficie tras el incendio sea la que anteriormente se encontraba en dicha localización o que si lo es tenga la misma representación. Hay que recordar, además, que la clasificación hecha en el año 1984 utilizó el criterio de asignar una especie a un píxel cuando esta se extendía al menos por el 50% de la superficie. Del resto de la ocupación no se tiene información, y podría fácilmente darse la circunstancia de que una segunda especie presente en el píxel poseyera una estrategia de regeneración agresiva, invirtiéndose tras el fuego la relación/proporción ocupada por cada una. Este extremo no puede ser predicho, ni siquiera aproximadamente con la información de que se dispone en este trabajo, pero de los análisis llevados a cabo se pueden extraer algunas conclusiones.

Cuando el nivel de NDVI previo al fuego no se llega a alcanzar en un periodo de tiempo fijado, suficientemente largo, podría indicar que la especie original presenta problemas para regenerarse en esas condiciones.

En el periodo de 21 años considerado en el estudio las especies o la vegetación que ocupa los píxeles clasificados como *Quercus coccifera* y *Quercus gr. cerrioides* recuperan el nivel de NDVI que tenían antes del incendio. Los etiquetados como lastonar mixto, *Buxus sempervirens*, *Pinus nigra - Pinus sylvestris* y *Quercus ilex rotundifolia* no alcanzan los valores de NDVI que tenían en el estado pre-fuego, lo cual puede ser un indicador de la dificultad para regenerarse tras un fuego. En el extremo opuesto se sitúa *Pinus halepensis* que supera con creces su situación previa de NDVI del año de referencia, 1984, dando paso a la hipótesis de que la regeneración se ha podido, quizás, llevar a cabo no solo por aportación de la especie original, sino con la colaboración alguna especie de rápido crecimiento que haya colonizado el área después del fuego.

Las razones por las cuales se observan diferentes grados de recuperación del índice NDVI en las diferentes especies podrían ser debidas no solo a la estrategia reproductiva, a especies colonizadoras que invaden el espacio en el que no estaban anteriormente representadas o lo estaban en menor grado, si no también a otras circunstancias como factores propios del terreno en el que se encuentran o alteraciones de las condiciones meteorológicas esperadas durante el periodo de regeneración.

Como características comunes a todas las especies mencionar dos:

- La existencia de caídas en el NDVI en determinados instantes temporales que afectaron a todas las especies.
- La forma que presenta la tendencia global marcada por un crecimiento importante en los primeros años para enlentecerse e incluso en algunos casos estabilizarse al cabo de unos años.

Estas dos características van a ser estudiadas a continuación. En el primer caso para localizar alguna variable de tipo ambiental que pudiera ser responsable de la presencia de las oscilaciones en las series de todas las especies en determinados momentos y en el segundo caso encontrar un modelo que ajuste la evolución de temporal del índice de vegetación para cada grupo.

5. RELACIÓN DE LA EVOLUCIÓN DEL NDVI CON VARIABLES CLIMÁTICAS

Como se acaba de mencionar la presencia de perceptibles picos de caída en el nivel de NDVI en todas las especies, hace pensar en fenómenos no intrínsecos a las especies, si no tal vez factores ambientales, que por su coincidencia temporal influyen en todas a la vez, aunque con diferente impacto. Parece, por tanto, razonable estudiar la existencia de relación de esos descensos con periodos alteraciones meteorológicas capaces de afectar la regeneración de las especies forestales, para lo que se ha tenido en cuenta información sobre la precipitación y la temperatura recogidas en observatorios próximos a las áreas estudiadas. Los observatorios considerados de referencia para cada incendio han sido los situados en el Embalse de La Peña, Bernués, Javierrelatre, Nueno y Zuera (ver figura 1). Con esos datos se han computado las medias de las precipitaciones mensuales para los periodos entre las imágenes de Landsat y el índice de sequía SPEI a los 3, 6, 12 y 24 meses para los mismos observatorios y los años en los que se dispone de información del NDVI.

En la figura 31 aparecen representadas las precipitaciones medias entre imágenes y se observa que existe una importante disminución de estas precisamente en los puntos en los que la trayectoria del NDVI presenta picos de profundo descenso.

A fin de estudiar la existencia de posibles relaciones de la evolución del NDVI con la precipitación y los índices SPEI a 3, 6, 12, 24 meses se ha realizado un análisis de correlaciones bivariadas para cada especie y localización.

Los resultados obtenidos han sido irregulares y no confirmatorios en todos los casos, pero ciertas relaciones han sido detectadas (ver tabla 11). El grupo formado por Lastonar mixto y *Quercus coccifera* han presentado correlación positiva significativa con algunas de estas variables de forma casi general en todas las localizaciones en las que el grupo está presente. En el extremo opuesto se encuentra *Pinus halepensis*, para el cual la evolución del NDVI en la superficie en la que está presente no muestra ninguna relación con la precipitación o con el índice SPEI en ninguno de los periodos, 3, 6, 12 y 24. En una situación parecida se halla *Quercus ilex rotundifolia*. Sin embargo *Buxus sempervirens*, *Pinus nigra - sylvestris* y *Quercus*

gr. cerrioides se encuentran en una posición intermedia en la que aparecen correlaciones positivas significativas en algunas localizaciones pero no en otras. Reseñar que para ninguna especie ni localización de los considerados el índice SPEI a 3 meses ha presentado correlación significativa con el nivel de NDVI.

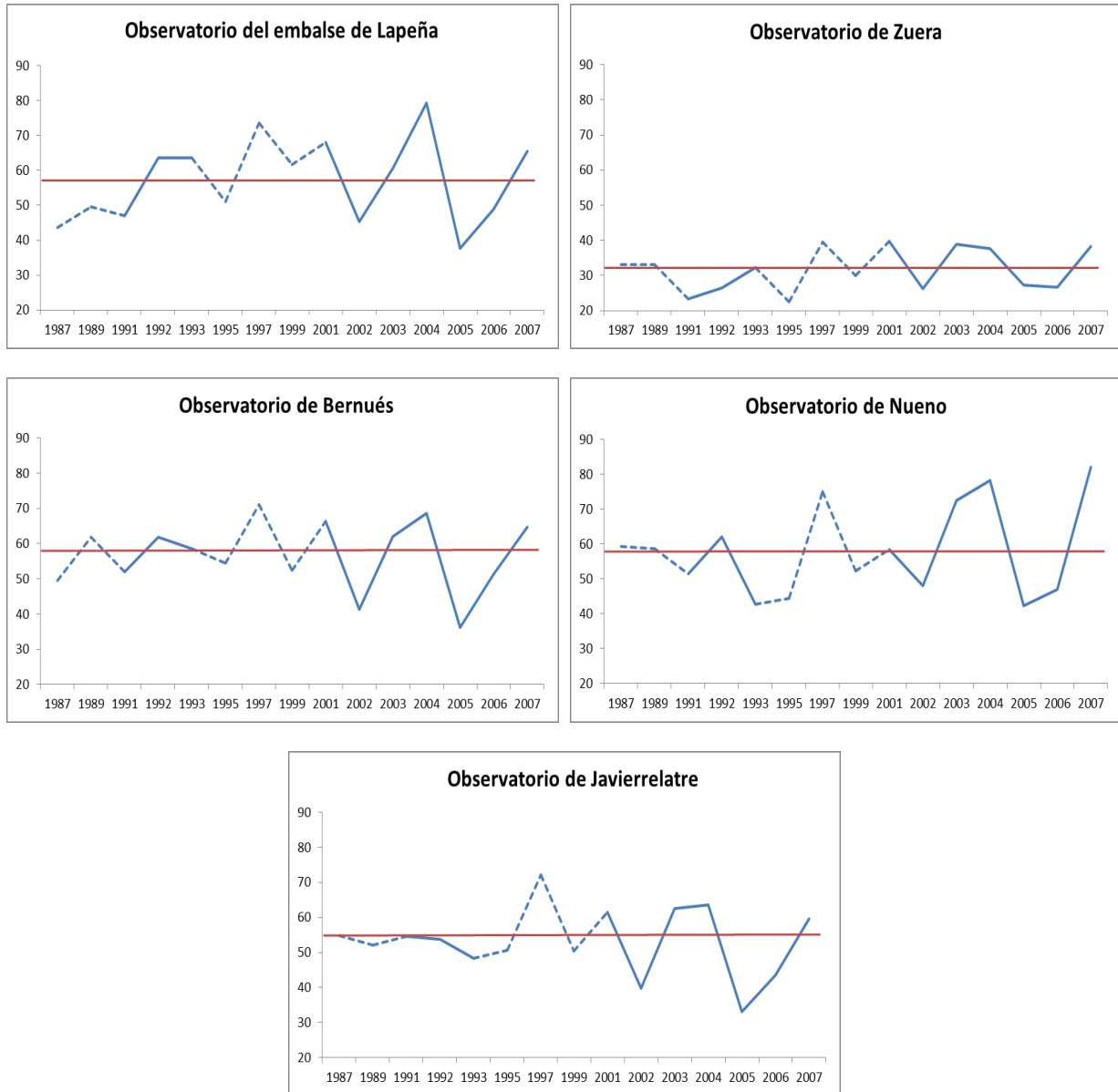


Figura 31. Series de la precipitación media (mm) entre imágenes, recogida en los cinco observatorios de referencia desde 1987 hasta 2007. En línea sólida los periodos son anuales, en línea de guiones bianuales. La línea roja indica la precipitación media de los 21 años en el observatorio.

Sobre la variabilidad encontrada en el comportamiento de una misma especie en diferentes localizaciones, apuntar que todas las especies, 5 en total, presentes en el incendio con código 29, cercano al embalse de La Peña, muestran correlaciones significativas. Otra cuestión interesante a mencionar es que en casi todos los casos en los que se encontró alguna correlación significativa del nivel de NDVI lo fue con la precipitación mensual entre imágenes y/o con el índice SPEI a 12 meses.

Tabla 11. Correlaciones bivariadas entre NDVI y precipitación, SPEI 6, SPEI 12, SPEI 24

ESPECIE	Cod Inc	Precipitación media mensual entre imágenes			SPEI 6		SPEI 12				SPEI 24	
<i>Lastonar mixto</i>	29						1986-> 0,543	1987-> 0,640	1989-> 0,610			
	34	1999-> 0,580	2002-> 0,834					1989-> 0,600				
	80	1991-> 0,593	1992-> 0,658	1993-> 0,700	1989-> 0,546	1991-> 0,584	1989-> 0,597					
<i>Buxus sempervirens</i>	29	1987-> 0,584	1989-> 0,533					1987-> 0,636	1989-> 0,631			
	36											
	80								1989-> 0,619			
<i>Pinus halepensis</i>	38											
<i>Pinus nigra</i> <i>Pinus sylvestris</i>	29	1987-> 0,628	1989-> 0,589	1991-> 0,572			1987-> 0,621	1989-> 0,601				
	30											
	32											
	80											
<i>Quercus coccifera</i>	29	1987-> 0,528					1989-> 0,537					
<i>Quercus gr. cerrioides</i>	29	1987-> 0,522					1987-> 0,564			1987-> 0,629		
	30	1999-> 0,833	2002-> 0,886					1989-> 0,583	1993-> 0,640	1995-> 0,675	1999-> 0,818	2002-> 0,837
	32											
	36						1987-> 0,610	1997-> 0,710				
<i>Quercus ilex rotundifolia</i>	34											
	36											
	80						1989-> 0,595					

Las correlaciones que se mencionan en este apartado, cuyos valores oscilaron entre 0,52 y 0,83, si bien no son capaces de explicar completamente la evolución del NDVI todas fueron estadísticamente significativas. Así mismo, el hecho de que parezca aflorar algún comportamiento espacial, merecería la consideración de que, tal vez, la severidad del fuego o variables topográficas asociadas con la localización tales como pendiente, orientación, etc., pudieran aportar una cierta capacidad explicativa a la evolución del NDVI en el proceso de regeneración tras un incendio.

Las correlaciones se han calculado para diferentes ventanas temporales observando que dentro de ellas la influencia de esas variables de sequía y precipitación para la misma formación y localización no permanece invariable (ver tabla 11), lo que permite conjeturar que en cada periodo de la regeneración la gestión que hacen las especies de la precipitación o de la falta de esta no se lleva a cabo de la misma manera. Quizás existan umbrales para diferentes momentos dentro de los cuales el desarrollo continúa siguiendo un modelo y solamente cuando esos umbrales se cruzan, se pone en peligro la regeneración, modificando el modelo de estrategia de que de modo intrínseco posee la especie, algo que en otros seres vivos se ha estudiado extensivamente.

Como un hecho aislado y peculiar mencionar que han aparecido correlaciones muy intensas para *Quercus gr. cerrioides* en la zona correspondiente al incendio con código 29, próximo al Embalse de la Peña, en el periodo 1987-1999, cuyos valores del coeficiente de correlación de Pearson con la precipitación, SPEI 12 y SPEI 24 han sido, respectivamente, 0,79, 0,83 y 0,73.

6. MODELIZACIÓN TEMPORAL DE LA EVOLUCIÓN DEL NDVI

La percepción visual que se tiene al representar la evolución media del NDVI para las especies en este estudio (ver figura 9), así como las figuras de los percentiles para cada una de

ellas, sugieren, como ya se ha mencionado, la existencia de un patrón común. El hecho de que algunas especies estén representadas en más de un incendio, todas salvo *Pinus halepensis* y *Quercus coccifera* (ver tabla 2), puede hacer pensar que la evolución del mismo puede estar influenciada, al menos parcialmente, por la situación geográfica y a tal fin se ha llevado a cabo en primer lugar un ANOVA (análisis de la varianza) para determinar la existencia de variaciones significativas del NDVI en relación con la localización.

Para estos 5 grupos se muestran, en primer lugar las gráficas de la evolución del NDVI por incendio (ver figura 32). Además de esta representación se llevó a cabo un análisis de la varianza (ANOVA) del NDVI de estas 5 especies tomando como factor el código del incendio. Los resultados fueron irregulares, pues para la misma especie se obtuvieron diferencias significativas en algunos instantes de tiempo y en otros no. Así pues, se ha optado por ajustar una curva por especie en primer lugar y posteriormente por especie e incendio. Aquí se mostrarán los resultados de los primeros, quedando los segundos en un apéndice (ver apéndice 1), ya que los resultados son semejantes y en rasgos generales presentan similares características.

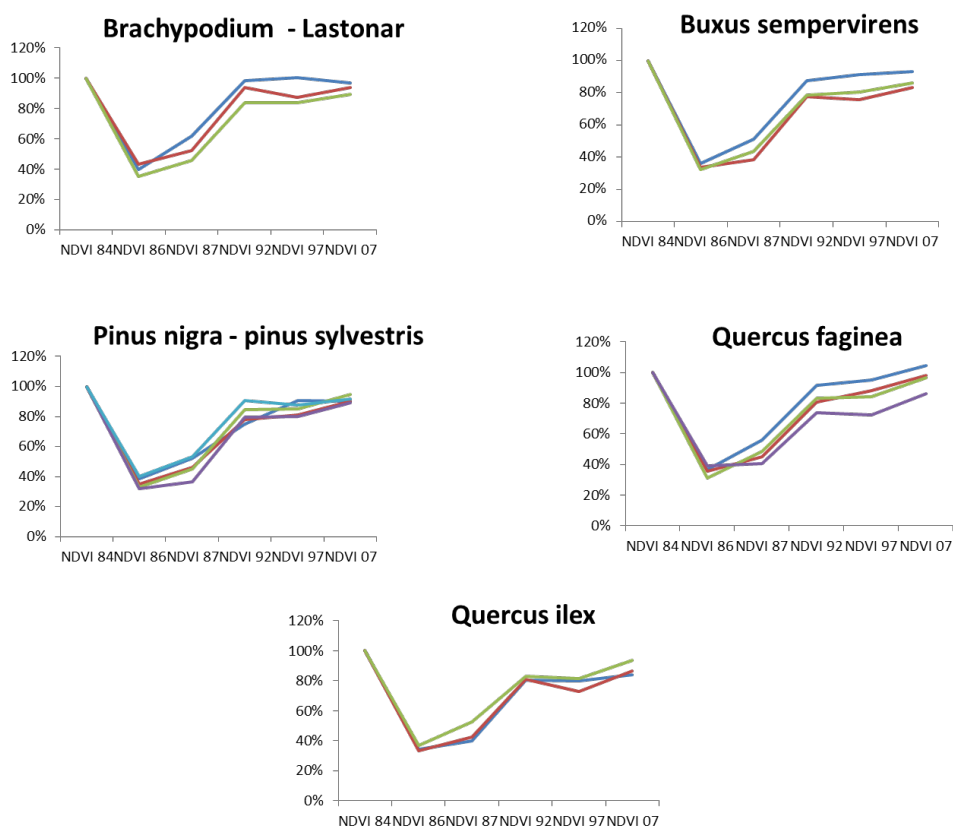


Figura 32. Medias del nivel de NDVI por especie y en diferentes colores los incendios en el que la especie se encuentra localizada localización

Como puede observarse en la figura 33 la función logarítmica da lugar a un buen ajuste a los datos con valores de R^2 que oscilan entre 0,87 y 0,93, salvo en el caso de *Quercus ilex rotundifolia*, que aun siendo correcto se sitúa en 0,78. Este resultado, ya descrito en la literatura (Viedma et al. 1997), se confirma aquí para las especies estudiadas. Esta última dispone de un año menos de información, ya que como ya se ha comentado el porcentaje de datos faltantes en 2001 está próximo al 99%, por lo que ese instante de tiempo se ha omitido. En la mencionada

figura se muestra, también, la ecuación del modelo y se sitúa con un punto rojo el valor de referencia de NDVI antes del incendio.

La primera y más llamativa de las conclusiones en este apartado es que todas las especies se pueden modelizar con la misma función consiguiendo un buen ajuste. Por lo tanto, teniendo en cuenta que las especies consideradas presentan diferentes estrategias de respuesta ante el fuego y, en consecuencia, ritmos de regeneración también diferentes, el NDVI es un indicador que debe ser interpretado con cierta cautela a hora de caracterizar el proceso de regeneración post-incendio. Se intentaron otros ajustes que en alguna especie parecían apropiados para el intervalo temporal del que se disponía, tales como el potencial y el polinómico de segundo grado, pero quedaron descartados, ya que en ninguna circunstancia podrían modelar una serie más larga con buenos resultados, puesto que en el primer caso implicaría un constante aumento del NDVI a un ritmo rápido y en el otro un cambio de tendencia dando paso a un decrecimiento importante en un periodo de tiempo relativamente corto.

Este insistente patrón de regeneración describe un crecimiento importante en los primeros instantes temporales de la serie, ralentizándose alrededor de los 5-7 años tras el incendio, marcando a partir de entonces un ritmo de mejora más parsimonioso. Este resultado permite predecir la evolución de la regeneración de áreas quemadas con una buena precisión, de forma que se podría pronosticar si en el proceso de regeneración de la vegetación el NDVI puede alcanzar el nivel anterior al fuego y si esto sucediera conjeturar cuando tendrá lugar.

Otra consideración de interés es que los datos con los que se han realizado estos ajustes no están equiespaciados ni se dispone de una serie larga, lo que no ha obstaculizado una correcta modelización.

Otros procedimientos de análisis de series de tiempo como son las técnicas estocásticas de modelización de series de tiempo, modelos ARIMA basados en la metodología Box-Jenkins, no han podido aplicarse de forma acurada ya que el número de instantes de tiempo considerados, años, no es suficiente para garantizar los resultados ni permiten realizar inferencias. No obstante una mirada exploratoria a las mismas con la información disponible ha dado como resultado modelos simples de suavizado exponencial y modelos ARIMA, con únicamente términos de diferenciación pero sin parte autorregresiva ni de media móvil. Para estos últimos en algunas especies aparecía como variable predictora el índice SPEI, aunque como ya se ha mencionado los resultados no pueden ser tenidos en cuenta de manera estrictamente formal. En cualquier caso, ninguno de ellos ha podido ajustarse mejor que el modelo logarítmico presentado anteriormente.

No obstante, sería interesante trabajar en el futuro los datos de la evolución del NDVI con estas técnicas cuando la serie fuese suficientemente larga para poder predecir con garantías, ya que estos modelos permiten la incorporación, de una manera correcta, de la incertidumbre en el proceso tanto de estimación como de predicción. Además, estos modelos dan la oportunidad de incluir sucesos puntuales disruptivos que rompen la evolución natural y generan modelos específicos para ellos.



Figura 33. Ajuste de la serie de NDVI para todos los grupos considerados en este trabajo. Se muestra la ecuación y el valor de R^2 para cada uno de los ajustes. El punto rojo representa el valor de referencia de NDVI pre-fuego para cada especie

7. EVALUACIÓN DE LOS ERRORES DE AJUSTE DE LOS MODELOS

A fin de evaluar el ajuste de los modelos a los datos, se ha llevado a cabo un procedimiento de validación ‘dejando uno fuera’ (*leave one out*) y calculando el error que se produce para cada una de las predicciones puntuales por píxel para los cuatro últimos años de la serie: 2004, 2005, 2006 y 2007.

Los modelos utilizados han sido los obtenidos para cada especie y localización y con los errores computados se han calculado el error medio de predicción y el RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio).

El error medio de predicción se ha calculado con el objetivo de reconocer las especies y localizaciones en los que los modelos han realizado un ajuste menos acorde a los datos. En general se puede observar que los errores se mantienen dentro de unos límites razonables próximos a cero (ver tabla 12). Especialmente interesante resultan, en una rápida inspección, los signos de estas medias de errores. En el año 2004 son todas positivas y con valores absolutos no despreciables, indicando que para ese año los modelos para todas las especies infrapredijeron los niveles de NDVI, es decir el valor observado fue mayor que el que se esperaba bajo el control del modelo, mientras que para el año 2005 se aprecia el fenómeno contrario, una sobrepredicción con casi todas las medias negativas, resultado el valor predicho superior al valor observado. Es necesario recordar aquí que en el año 2004 la precipitación recogida en todos los observatorios superó ampliamente la media del periodo, circunstancia no contabilizada por los modelos; observándose el fenómeno contrario en el año 2005 en el que la precipitación media cayó al mínimo de toda la serie. En los años 2006 y 2007 aparecen errores con ambos signos y en magnitudes absolutas en general inferiores a los de 2004 y 2005 indicando un ajuste más preciso en esos años.

Tabla 12. Error medio de predicción por especie y localización

ESPECIE	Cod Inc	ERROR MEDIO DE PREDICCIÓN			
		2004	2005	2006	2007
Lastonar mixto	29	0,03364	-0,07362	0,01396	0,00202
	34	0,03316	-0,07963	-0,01927	-0,00494
	80	0,01562	-0,00842	-0,01501	-0,01956
<i>Buxus sempervirens</i>	29	0,01864	-0,06776	-0,00302	-0,01476
	36	0,03963	-0,01453	-0,03800	-0,01669
	80	0,02461	-0,01709	-0,02770	-0,02879
<i>Pinus halepensis</i>	38	0,07602	-0,02555	-0,01139	0,01674
<i>Pinus nigra</i> <i>Pinus sylvestris</i>	29	0,02285	-0,05800	0,00520	-0,01322
	30	0,04179	-0,06229	-0,00399	-0,00621
	32	0,06274	-0,07866	0,00058	0,01462
	34	0,03473	-0,06719	-0,00811	-0,01393
	80	0,01597	0,00038	-0,01791	-0,03261
<i>Quercus coccifera</i>	29	0,02941	-0,06447	0,01197	0,00473
<i>Quercus gr.</i> <i>cerrioides</i>	29	0,03260	-0,05978	-0,01165	-0,00701
	30	0,05737	-0,08035	-0,04250	-0,00697
	32	0,02902	-0,06653	-0,01471	0,02804
	36	0,04324	0,00605	-0,02342	0,00491
<i>Quercus ilex</i> <i>rotundifolia</i>	34	0,04109	-0,07112	-0,00603	-0,00542
	36	0,04800	0,00899	-0,02585	-0,01255
	80	0,03975	0,00240	-0,00096	-0,00340

En la tabla 13 se presentan los valores de la raíz del error cuadrático medio por especie y localización. Los valores se mantienen en general en unos rangos aceptables. Los casos en los que el valor de RSME está por encima de 0,01 pertenecen en su totalidad a colectivos vegetales con un número reducido de píxeles en algunas localizaciones. Los máximos corresponden a

Quercus ilex rotundifolia en el incendio 36, con una ocupación de 13 píxeles, o esa misma especie en el incendio con código 80 con 24 píxeles. Se produce el efecto conocido del aumento de incertidumbre cuando se dispone de poca información, debiendo de forma general tomar con cautela los resultados para estos casos.

Tabla 13. RMSE por especie y localización

ESPECIE	Cod Inc	RSME			
		2004	2005	2006	2007
Lastonar mixto	29	0,00213	0,00324	0,00182	0,00199
	34	0,01020	0,01552	0,00879	0,00911
	80	0,00143	0,00130	0,00134	0,00155
<i>Buxus sempervirens</i>	29	0,00568	0,00807	0,00565	0,00565
	36	0,00707	0,00496	0,00740	0,00484
	80	0,00166	0,00149	0,00162	0,00179
<i>Pinus halepensis</i>	38	0,00449	0,00332	0,00291	0,00296
<i>Pinus nigra</i> <i>Pinus sylvestris</i>	29	0,00883	0,01077	0,00812	0,00892
	30	0,00344	0,00456	0,00262	0,00322
	32	0,00522	0,00605	0,00323	0,00296
	34	0,00388	0,00527	0,00341	0,00372
	80	0,00502	0,00446	0,00498	0,00622
<i>Quercus coccifera</i>	29	0,00340	0,00418	0,00298	0,00296
<i>Quercus</i> <i>gr. cerrioides</i>	29	0,00221	0,00297	0,00186	0,00197
	30	0,00518	0,00703	0,00452	0,00322
	32	0,00880	0,01898	0,00648	0,00818
	36	0,00800	0,00632	0,00751	0,00624
<i>Quercus ilex</i> <i>rotundifolia</i>	34	0,00247	0,00316	0,00205	0,00214
	36	0,03083	0,01640	0,02543	0,02035
	80	0,01134	0,01020	0,01111	0,01104

Adicionalmente, se han cartografiado estos errores de predicción para todas las especies y localizaciones para los cuatro instantes en que se calcularon y que se pueden ver en las figuras A, B, C y D en el anexo 2. Hay que hacer notar que se han representado todas independientemente de que en algunas de las combinaciones el número de píxeles fuera pequeño, a fin de poder observar patrones espaciales que reforzaran la hipótesis de que otras covariables propias del espacio físico pudieran tener influencia en la recuperación de las especies tras el fuego. Las representaciones son comparables para todas las localizaciones de una especie y no todas en su conjunto porque la existencia de errores extremadamente pequeños no son comparables con la misma escala que aquellos mucho mayores, ya que el objetivo de estas cartografías es el reconocimiento visual de patrones espaciales en cada especie, no cuantificar los errores, ya que a tal fin se han presentado las tablas 12 y 13.

En una primera inspección de las figuras se aprecia una heterogeneidad que en algunos casos presenta una disposición de los píxeles que dan cuenta de una distribución espacial diferenciada tanto intra como inter grupo. En particular, en los errores para lastonar mixto, tanto

en el incendio codificado como 29 como en el 80, se puede observar una disposición de los píxeles en clusters que se repiten en todas las imágenes. Similar efecto de agrupaciones aparecen en *Buxus* 29 y 80, en *Pinus nigra* – *Pinus sylvestris* 29, *Quercus coccifera*, *Quercus faginea* 29 y *Quercus ilex* 34. En menor medida se aprecian pequeños rasgos en otras especies y localizaciones, pero no tan relevantes como las mencionadas anteriormente. No obstante, dada la gran cantidad de mapas generados y su tamaño, en la Figura E se presentan con más detalle algunas familias, periodos y localizaciones en los que los errores si pueden ser comparables y que muestran con claridad los patrones comentados.

La existencia de patrones espaciales en los errores sugiere la posibilidad de atacar el problema desde una óptica espacial, lo cual añadido al análisis temporal presentado invita a considerar que una modelización espacio-temporal con covariables explicativas tanto climáticas como topográficas y de localización podría ser la manera correcta de estimar y predecir la evolución del índice NDVI en zonas en las que ha tenido lugar un fuego.

7. CONCLUSIONES

La evolución del índice NDVI post-fuego de las especies consideradas en este estudio sigue un patrón común que se modeliza por medio de una función logarítmica con un notable ajuste en términos de R^2 . La forma que presenta la tendencia global está marcada por un crecimiento importante en los primeros años 5-7 años tras el incendio, siguiendo posteriormente un ritmo más parsimonioso e incluso llegando a estabilizarse. De forma puntual aparecen caídas del índice en todas las formaciones vegetales consideradas.

Índices simples y de variación para cada formación vegetal indican que el número de años que necesitan para igualar el nivel de verdor que poseían antes del incendio es diferente para cada una. En el periodo considerado, 21 años, los píxeles clasificados como *Quercus coccifera* y *Quercus gr. cerrioides* recuperaron el nivel de NDVI que tenían antes del fuego. El lastonar mixto, *Buxus sempervirens*, *Pinus nigra* - *Pinus sylvestris* y *Quercus ilex rotundifolia* no los alcanzaron, lo cual puede ser un indicador de la dificultad para regenerarse tras un incendio, debido a la intervención de otros factores tales como la severidad con la que se manifestó el fuego o el historial de incendios antes del suceso de 1986. *Pinus halepensis* superó con creces su situación previa de NDVI del año de referencia, 1984, dando paso a la hipótesis de que la regeneración se haya podido llevar a cabo no solo por aportación de la especie original, sino con la colaboración alguna especie de rápido crecimiento que haya colonizado el área después del fuego; en este sentido, en diferentes trabajos realizados en incendios producidos con posterioridad en los Montes de Zuera se ha descrito que *Quercus coccifera* acompaña a *Pinus halepensis* en el proceso de regeneración vegetal (Vicente *et al.*, 2011)

El estudio de relación de la evolución del índice NDVI con variables climáticas ha sido irregular. Los grupos formados por –el lastonar mixto y *Quercus coccifera* han presentado correlación positiva significativa de forma casi general con la precipitación y/o el índice de sequía SPEI a los 12 meses. Por el contrario para *Pinus halepensis* la evolución del NDVI no muestra ninguna relación con la precipitación o con el índice SPEI en ninguno de los periodos, 3, 6, 12 y 24 calculados. En una situación parecida está *Quercus ilex rotundifolia*. Por otra parte, las formaciones vegetales dominadas por *Buxus sempervirens*, *Pinus nigra* – *sylvestris* y *Quercus gr. cerrioides* se encuentran en una posición intermedia en la que aparecen correlaciones positivas significativas en algunas localizaciones pero no en otras.

Existen patrones espaciales, recogidos por los errores, que sugieren que una modelización espacio temporal con variables explicativas tanto climáticas como topográficas, sería la correcta óptica para estimar y predecir la evolución del NDVI de áreas forestales tras un incendio.

8 BIBLIOGRAFÍA

Kriegler, F.J., Malila, W.A., Nalepka, R.F., y Richardson, W. (1969) 'Preprocessing transformations and their effects on multispectral recognition.' *Proceedings of the Sixth International Symposium on Remote Sensing of Environment*, p. 97-131.

Rodrigues, M.; Pérez-Cabello, F.; Vlassova, L.; Echeverría, M.T.; Ibarra, P. y de la Riva, J. Assessment of the fire-affected communities' regrowth paths: methodological approach by means of Tasseled Cap time series and the FNI3. Póster. Publicado en Waldram, M., Tansey, K., Page, S. (Eds) (2013), *Proceedings of the 9th EARSeL Forest Fire Special Interest Group Workshop*. Coombe Abbey, Warwickshire, UK, 15-17 October 2013, pp. 127-130.

Vicente-Serrano, S. M., Pérez-Cabello, F., y Lasanta, T. (2011). Pinus halepensis regeneration after a wildfire in a semiarid environment: assessment using multitemporal Landsat images. *International Journal of Wildland Fire*, 20(2), 195-208.

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. y López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718.

Viedma, O., Meliá, J., Segarra, D., & García-Haro, J. (1997). Modeling rates of ecosystem recovery after fires by using Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 61(3), 383-398.

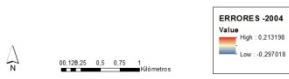
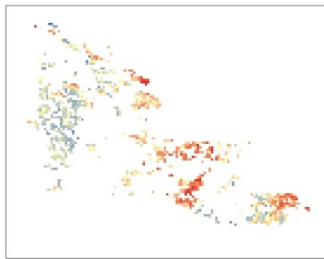
ANEXO 1



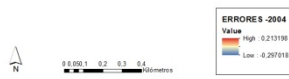
Figura A. Ajuste de la serie de NDVI para todos los grupos y localizaciones. Se muestra la ecuación y el valor de R^2 para cada uno de los ajustes. El punto rojo representa el valor de referencia de NDVI pre-fuego para cada especie y localización

ANEXO 2

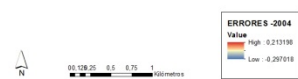
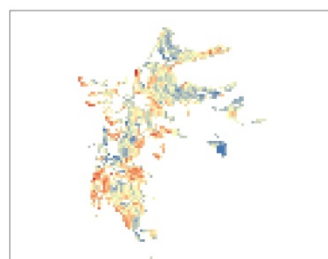
BRACHYPODIUM - LASTONAR (29)



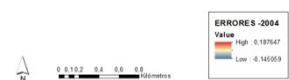
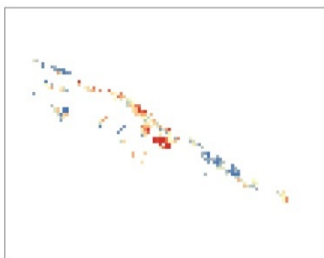
BRACHYPODIUM - LASTONAR (34)



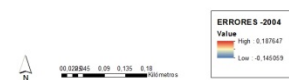
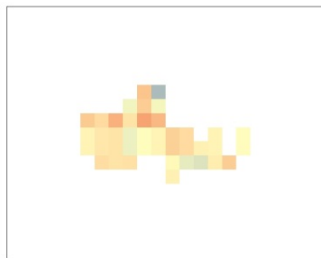
BRACHYPODIUM - LASTONAR (80)



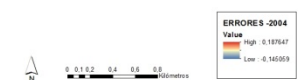
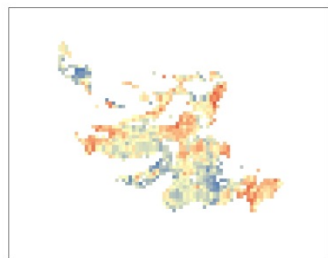
BUXUS SEMPERVIRENS (29)



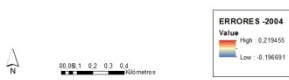
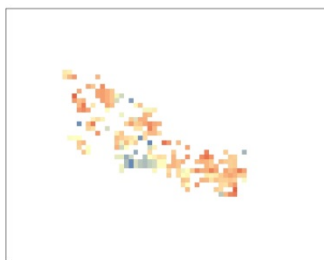
BUXUS SEMPERVIRENS (36)



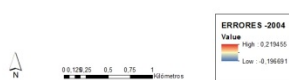
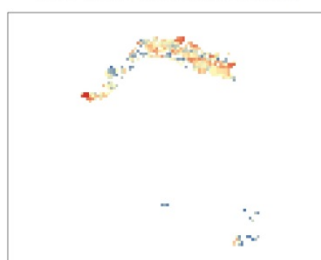
BUXUS SEMPERVIRENS (80)



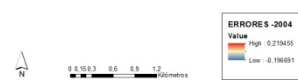
PINUS NIGRA - PINUS SYLVESTRIS (32)



PINUS NIGRA - PINUS SYLVESTRIS (34)



PINUS NIGRA - PINUS SYLVESTRIS (80)



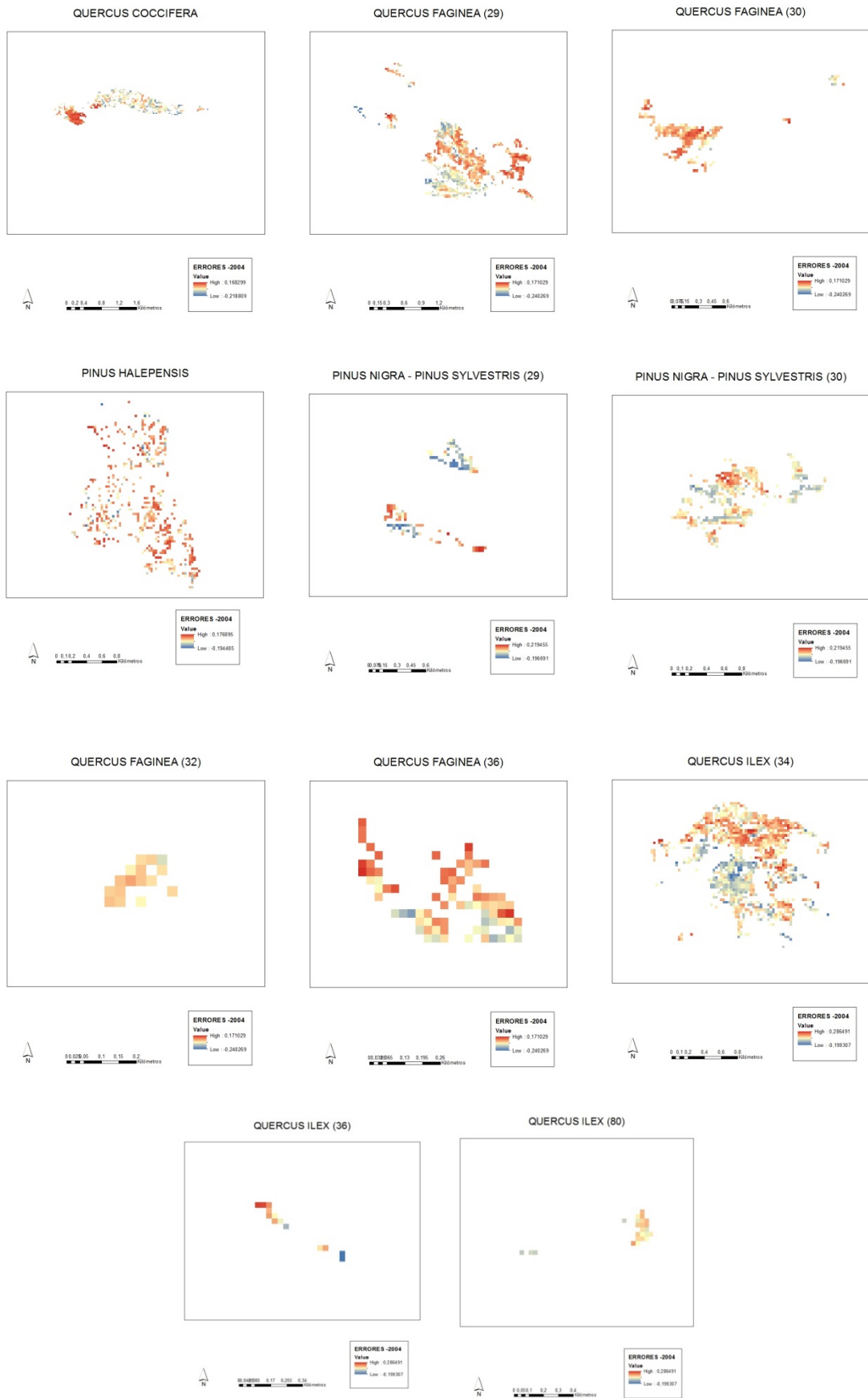
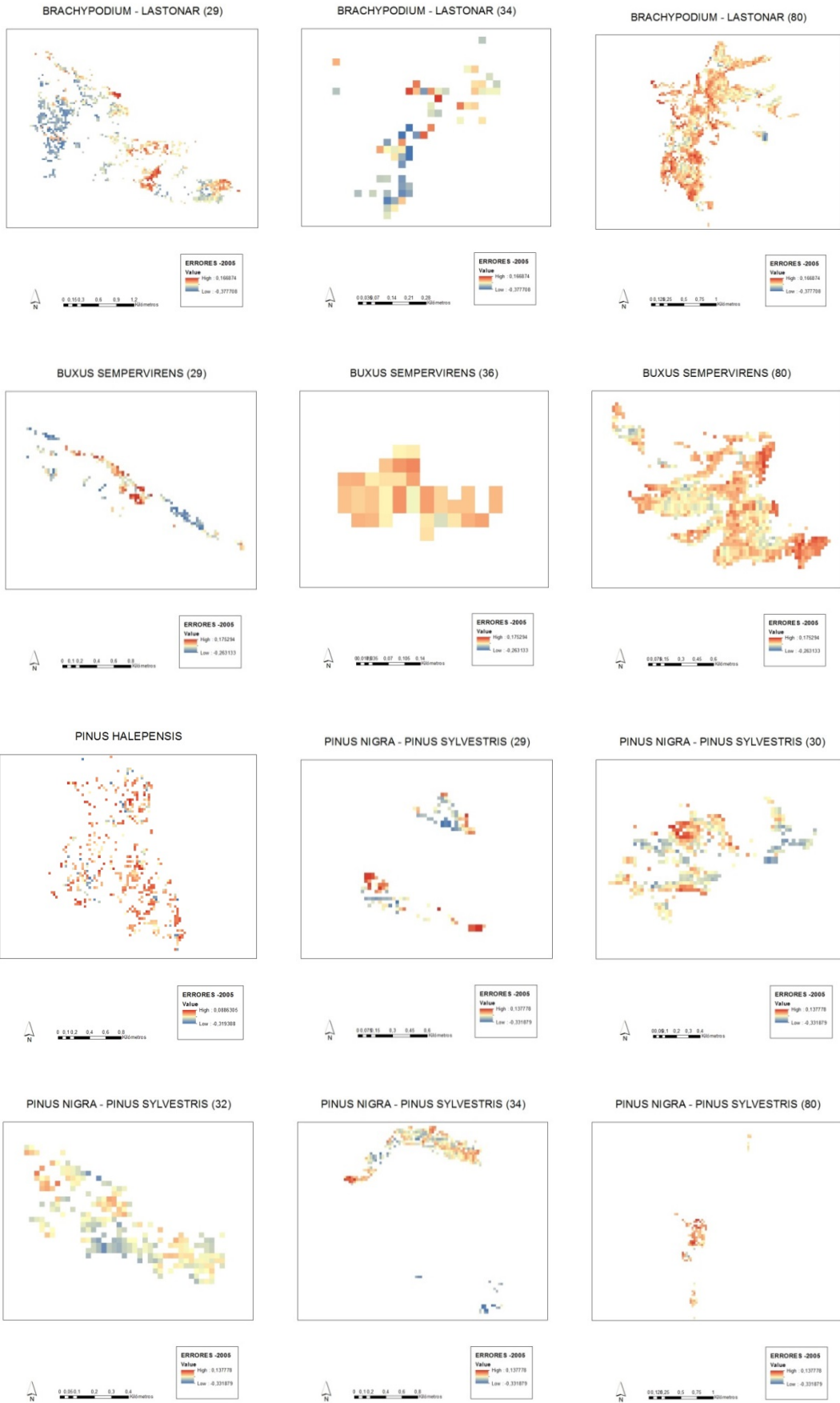


Figura A. Errores de predicción mediante validación cruzada dejando fuera el valor de NDVI del año 2004



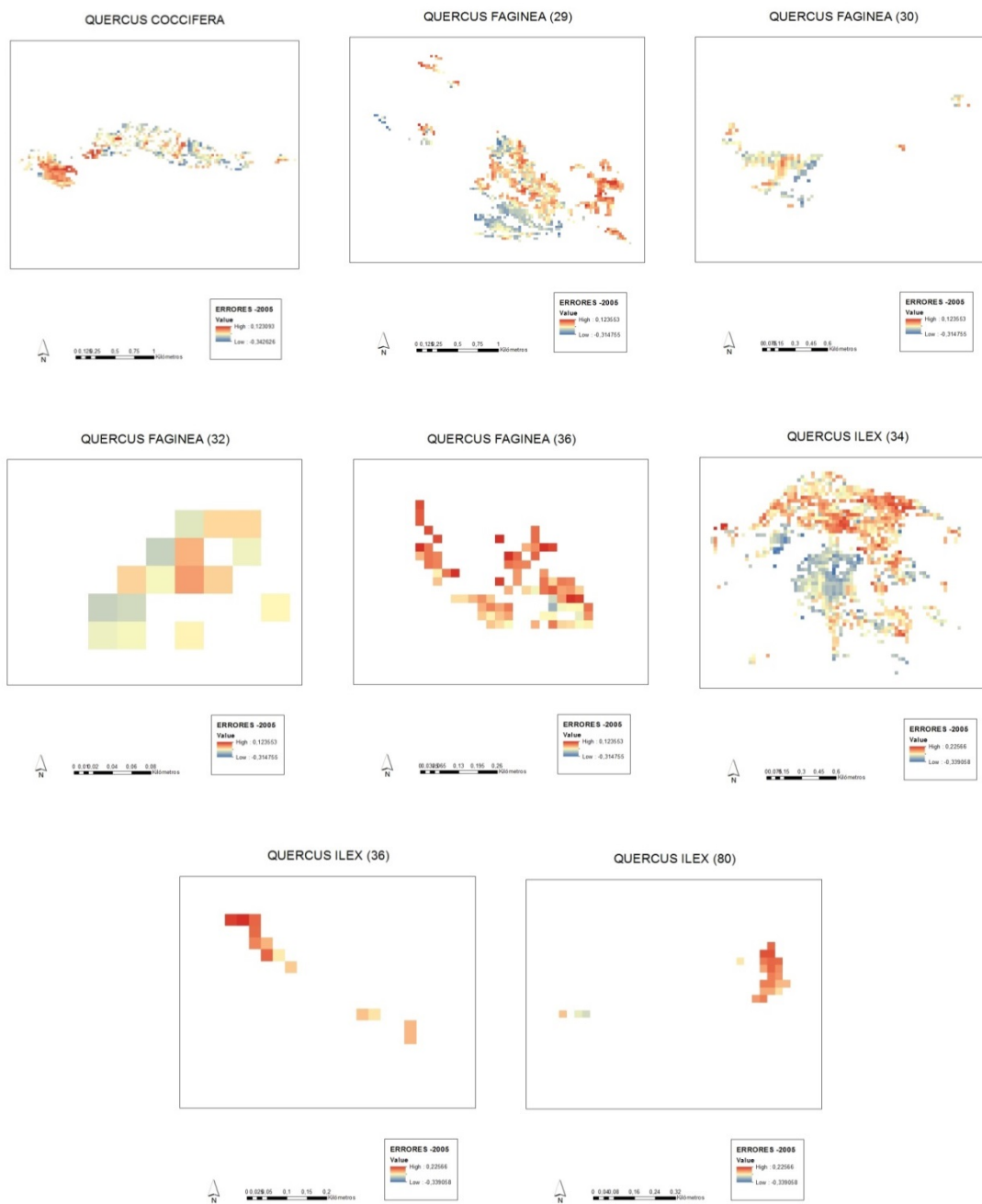
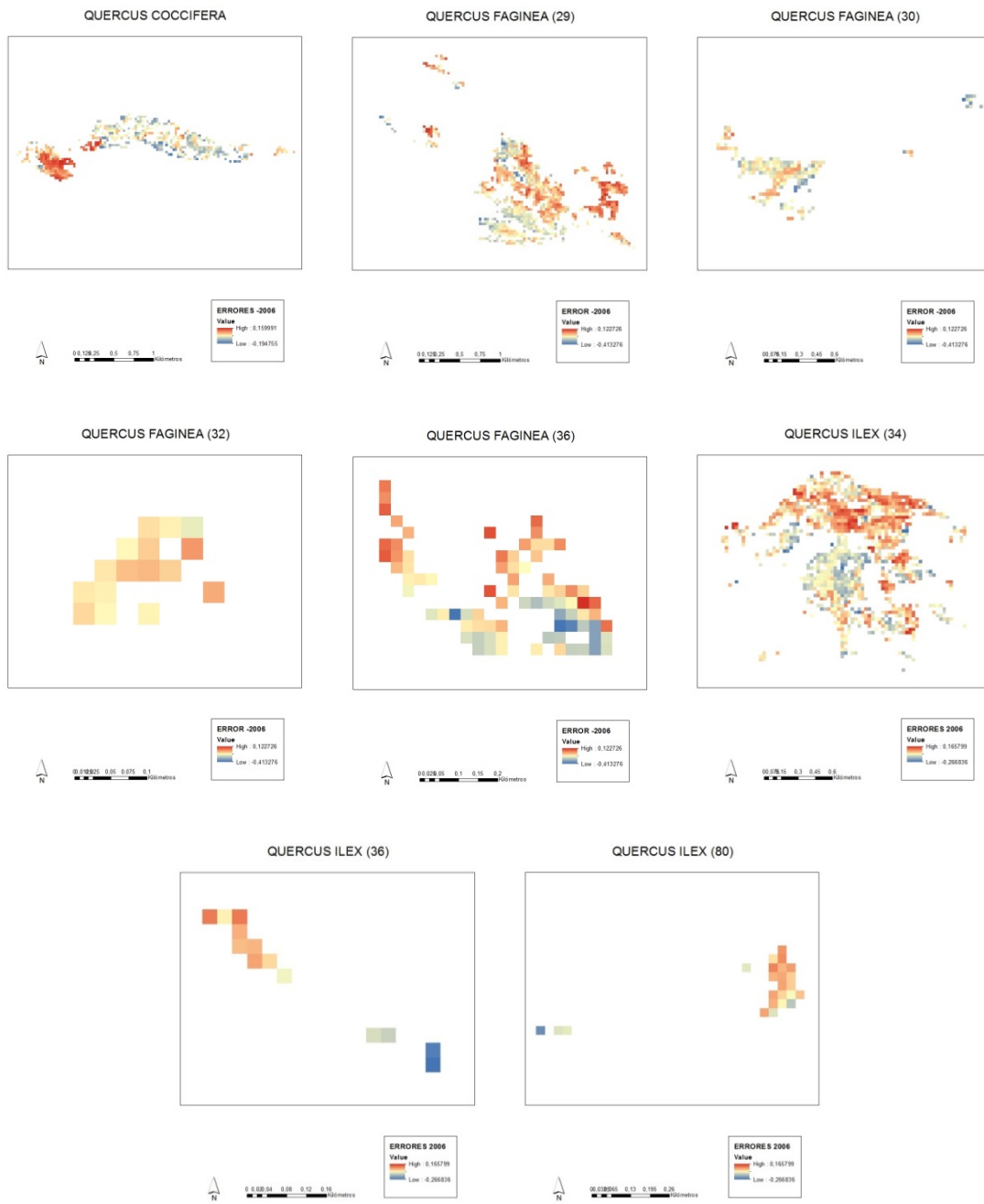
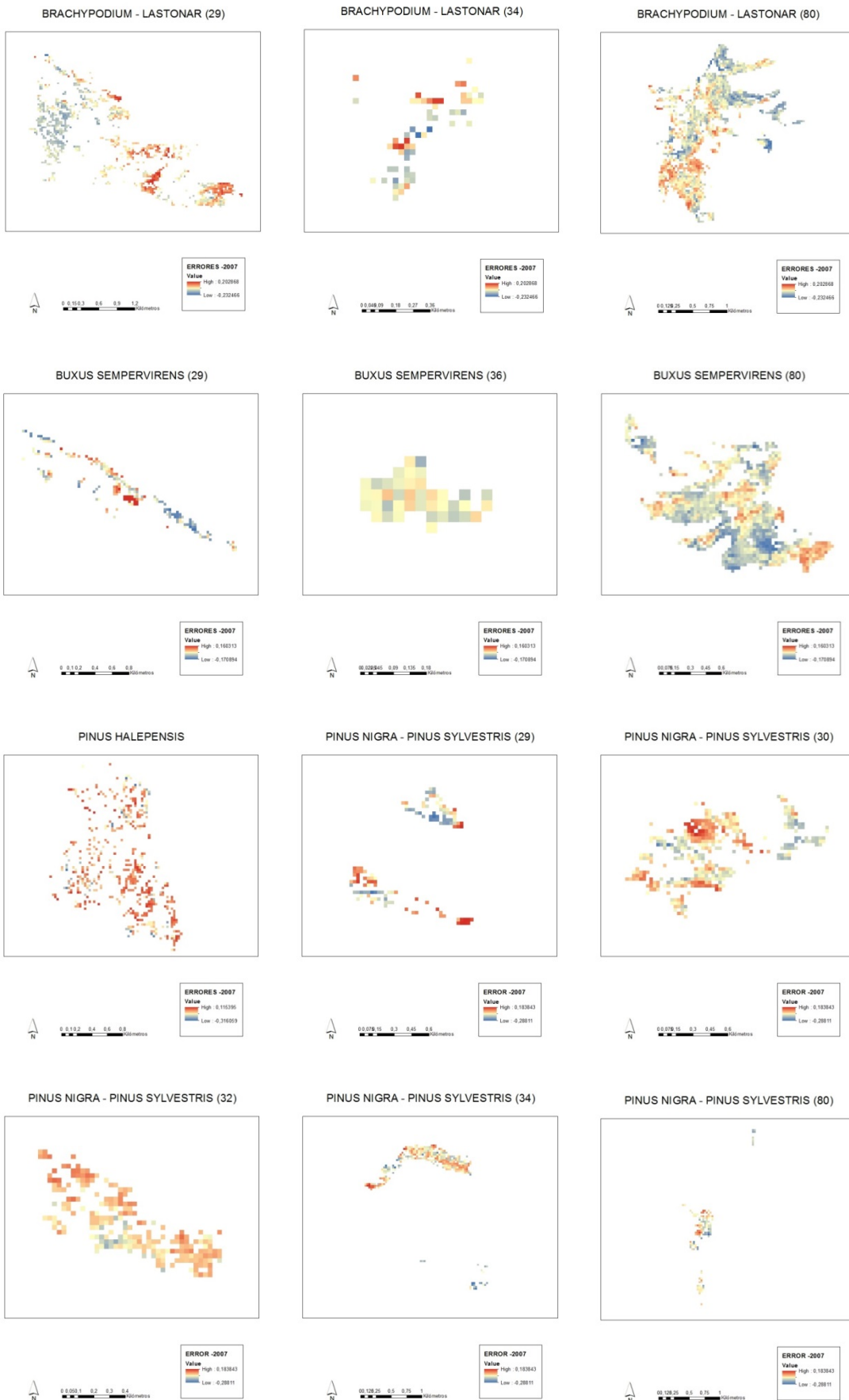


Figura B. Errores de predicción mediante validación cruzada dejando fuera el valor de NDVI del año 2005





FiguraC. Errores de predicción mediante validación cruzada dejando fuera el valor de NDVI del año 2006



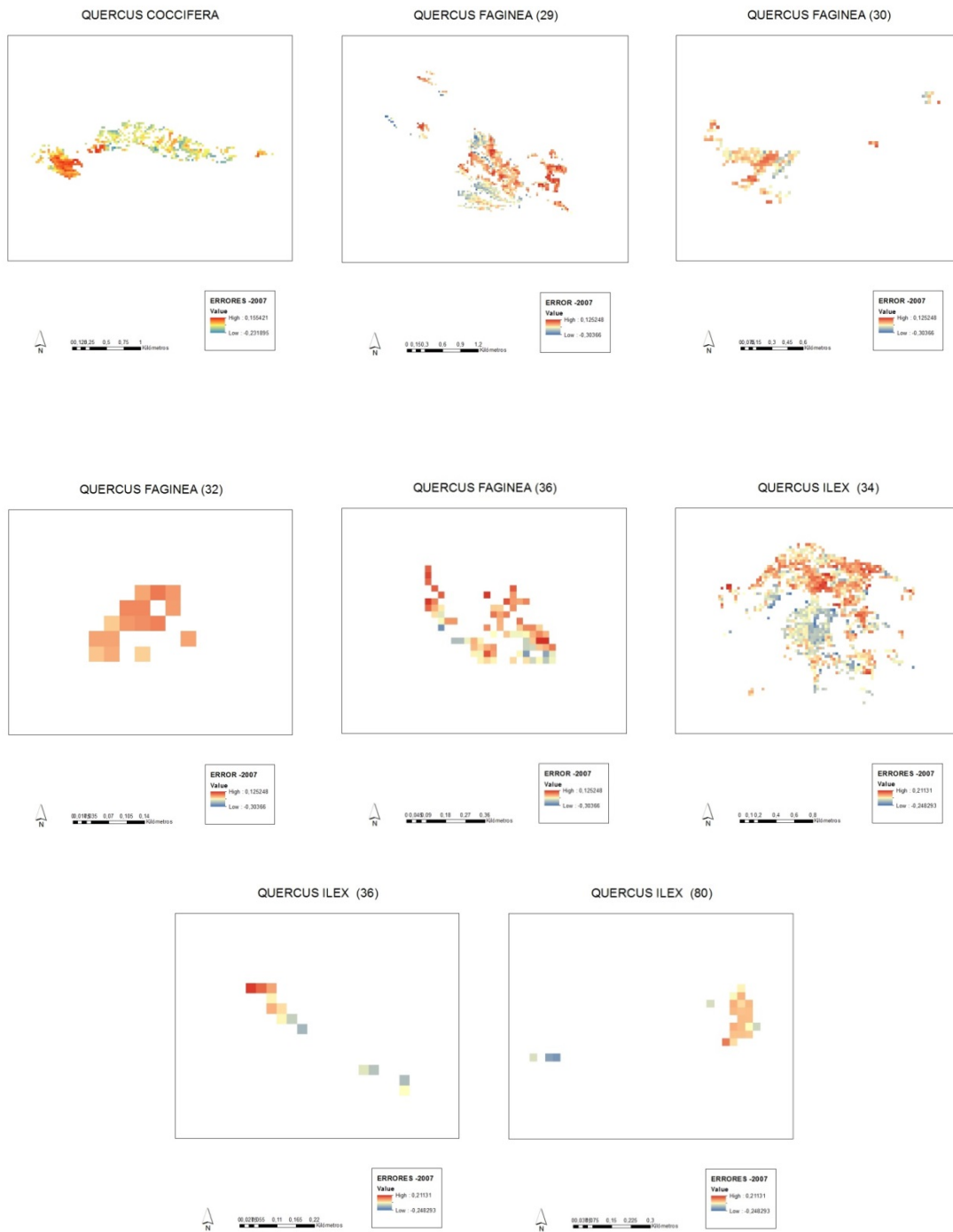


Figura D. Errores de predicción mediante validación cruzada dejando fuera el valor de NDVI del año 2007

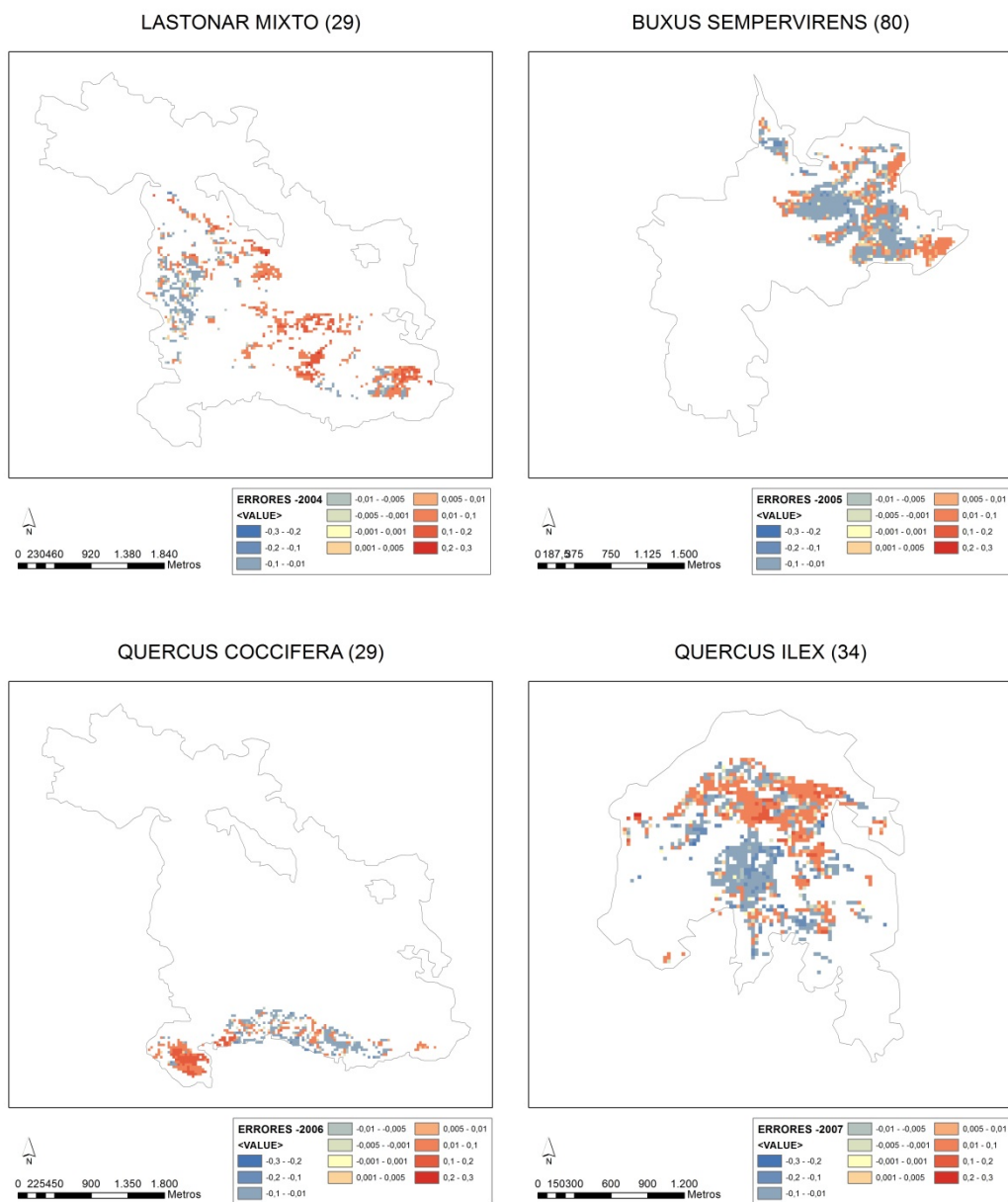


Figura E. Detalle de los patrones espaciales de errores para algunas familias, periodos y localizaciones