



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Factores que afectan a la mortalidad de *Pinus nigra* en la Sierra de Cazorla: implicaciones en la silvicultura de la especie

LÓPEZ ALCALÁ, C.M.¹, TÍSCAR OLIVER, P.A.² y ABELLANAS OAR, B.¹

¹ Universidad de Córdoba. E.T.S.I.A.M. Departamento de Ingeniería Forestal.

² Centro de Capacitación y Experimentación Forestal. Cazorla. Jaén.

Resumen

La biodiversidad forestal depende, en parte, del hábitat que proporciona la madera muerta. Por ello, las propuestas para la gestión forestal sostenible recomiendan mantener cierta cantidad de madera muerta en el monte. Este trabajo aborda el análisis de la variación espaciotemporal de madera muerta en un pinar mediterráneo del Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y las Villas. Se estudia la densidad y dendrometría de los árboles muertos y vivos a partir del último inventario forestal del monte, así como su relación con variables dasométricas, ambientales y de gestión mediante el uso de SIG y MDT y el ajuste de un modelo de regresión GLM.

Los resultados muestran que hay una media de 7 árboles muertos/ha y que existen diferencias significativas de tamaño entre árboles vivos y muertos, existiendo más mortalidad en árboles de menor diámetro. El modelo GLM muestra que el área basimétrica es la variable explicativa más relevante.

Se constata que se cumple el criterio 9.3.4 del sistema de certificación forestal FSC respecto a la densidad de árboles muertos, pero no en cuanto a su tamaño, por lo que sería necesario incluir procedimientos para generar madera muerta más gruesa en el monte.

Palabras clave

Madera muerta, pinares mediterráneos, biodiversidad.

1. Introducción

La presencia de madera muerta en el monte podría incrementar el riesgo de incendio y el desarrollo de plagas forestales, pero se considera un factor clave para la provisión de diferentes servicios ecosistémicos, tales como la conservación de la biodiversidad, el mantenimiento de los ciclos de nutrientes o, el secuestro de carbono. Hace años los gestores y la sociedad veían la presencia de madera muerta como algo perjudicial y por tanto se procedía a su eliminación. Actualmente, la presencia de árboles muertos se puede interpretar como indicador de una buena gestión (SORIANOTICIAS, 2019). La madera muerta es un recurso clave para el mantenimiento de la biodiversidad. Además, participa en funciones ecológicas muy importantes. (BRUNIALTI 2014). Proporciona el hábitat de especies saproxílicas que dependen de ella, bajo la corteza en descomposición, muchos anfibios y reptiles encuentran su refugio. Es uno de los elementos imprescindibles para muchas especies de hongos y líquenes. Gracias a la madera muerta, se reduce la erosión tanto hídrica como eólica y se ayuda a la formación del suelo. Por otro lado, es el constituyente de una de las reservas más importantes de materia orgánica y de carbono e interviene en el ciclo de los nutrientes y del agua (efecto tampón). (DÍAZ ZIRPOLO, 2018).

Existen diferentes programas promovidos por instituciones públicas y privadas que proponen mantener en el monte una determinada cantidad de madera muerta. Junto con la Estrategia para la Biodiversidad de la Unión Europea EC11, caben destacar las propuestas de los sistemas de certificación forestal FSC y PEFC. El monte Navahondona está certificado por el sistema FSC (Forest Stewardship Council) desde el año 2007. FSC es una organización existente desde 1993 cuyo

objetivo es promover una gestión forestal ambientalmente responsable, socialmente beneficiosa y económicamente viable para los bosques. Este sistema desarrolla 10 Principios y 56 Criterios cuyo cumplimiento es garantía de buena gestión forestal. En 1999 se puso en marcha en España para elaborar los Estándares Españoles de Gestión Forestal para la Certificación de FSC. Se creó un Grupo de Apoyo para asegurar su correcto funcionamiento (Grupo de Trabajo FSC). El Estándar Español de Gestión Forestal para la Certificación FSC se aplica para cualquier tipo de monte ya sea de origen natural, seminatural o artificial. Este estándar engloba la certificación de la gestión forestal y de todas las producciones del monte, productos maderables, no maderables y servicios ecosistémicos.

La madera muerta se está convirtiendo en una referencia general para los bosques naturales en Europa debido a que es un buen indicador de la naturalidad de los montes. El volumen de madera muerta depende del tipo de bosque y los sistemas de gestión, así en bosques de frondosas no gestionados la madera muerta puede suponer el 30% de la madera total con unos volúmenes de 200 m³ /ha. Los bosques sometidos a formas de gestión más intensivas como algunas plantaciones de eucalipto o abeto suelen presentar menores volúmenes de madera muerta. Adicionalmente, si la madera muerta falta en el monte o aparece en cuantía insuficiente, se proponen procedimientos para generarla artificialmente. Concretamente, el aclarado del arbolado para favorecer el crecimiento de los árboles futuros y de la biodiversidad, dejando en el suelo parte de los árboles cortados o algunos tocones altos de unos 50 cm repartidos por el rodal para que las especies saproxílicas u hongos los descompongan. Otro de los procedimientos es el anillado de los árboles, consistente en extraer una banda de corteza y madera externa de unos 10 cm, esto hace que el árbol se debilite y muera en pocos años. (BELTRÁN et al., 2018).

OKLAND et al. (1996) descubrieron que a grandes escalas (4 km²), la madera muerta es un factor muy importante para la riqueza y composición de especies, en cambio a pequeña escala (0,16 ha) las relaciones son débiles. Esto podría influir en las prácticas de gestión que promueven la madera muerta, ya que se debería organizar a grandes escalas para mejorar la conservación de las especies saproxílicas. Por otro lado, BRUNET & ISACSSON (2009) destacaron la importancia que tiene la continuidad de la madera muerta y los árboles viejos para la conservación de especies y BUSE (2012) mostró que las especies saproxílicas asociadas a estructuras forestales primarias están correlacionadas con la continuidad de la cubierta vegetal, por lo tanto, la continuidad de la cubierta forestal y la disponibilidad de madera muerta juega un importante papel en la protección de la biodiversidad saproxílica. La cantidad de madera muerta presente en el monte de forma natural y su distribución espacial en un momento dado dependen de los factores que favorecen la mortalidad de los árboles. Destacan las perturbaciones, los procesos de competencia intra- e interespecifica, las condiciones ambientales poco favorables (clima y/o suelos inadecuados). (GÓMEZ et al., 2009; KEREN & DIACI, 2018).

2. Objetivos

Los objetivos de este estudio son la definición de unas cifras base sobre el volumen de árboles muertos que deberían encontrarse en las masas naturales de *Pinus nigra* de la Sierra de Cazorla para conseguir el criterio de sostenibilidad relacionado con el mantenimiento de la biodiversidad forestal y además, establecer cómo varían los factores que determinan la mortalidad de los árboles de esa especie a lo largo del espacio (gradiente altitudinal) y del tiempo.

3. Metodología

El estudio se realizó en el monte público “Navahondona”, localizado en el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas. El Parque Natural está dividido en zonas con diferente grado de protección, realizándose el estudio en la zona del monte Navahondona incluida dentro del “Área de Reserva Navahondona-Guadahornillos”, que es una Zona Grado A, donde el grado de protección es mayor, aunque se permiten los aprovechamientos madereros. La vegetación predominante es de

pinares de *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* y *Pinus halepensis*. La zona de estudio está situada en el extremo oriental del Macizo subbético andaluz. Posee un perfil con gran cantidad de afloramientos rocosos y grandes pendientes. La cota máxima es de 2.108,53 metros sobre el nivel del mar, alcanzada en el Alto de la Empanada y la cota más baja es de 780,49 m y se encuentra en el punto límite del monte y del río Guadalquivir. La división inventarial del monte Navahondona comprende 9 secciones, 28 cuarteles y 239 cantones, pero la zona de estudio se limitó a un total de 130 cantones, repartidos por cuarteles (Figura 1). En la sección 2ª el cuartel B, en la sección 3ª los cuarteles A y B, en la sección 4ª los cuarteles A, B, y D, en la sección 5ª los cuarteles A y B y en la sección 7ª el cuartel A. Estos 130 cantones ocupan una superficie de 7.075,10 ha y se utilizaron 1392 parcelas del inventario realizado en el año 2011 para la séptima revisión de la ordenación del monte Las zonas que se encuentran delimitadas bajo la categoría de Zona de Reserva A se corresponden con áreas de un gran valor ecológico donde se concentran especies de flora endémica y en estado de amenaza.

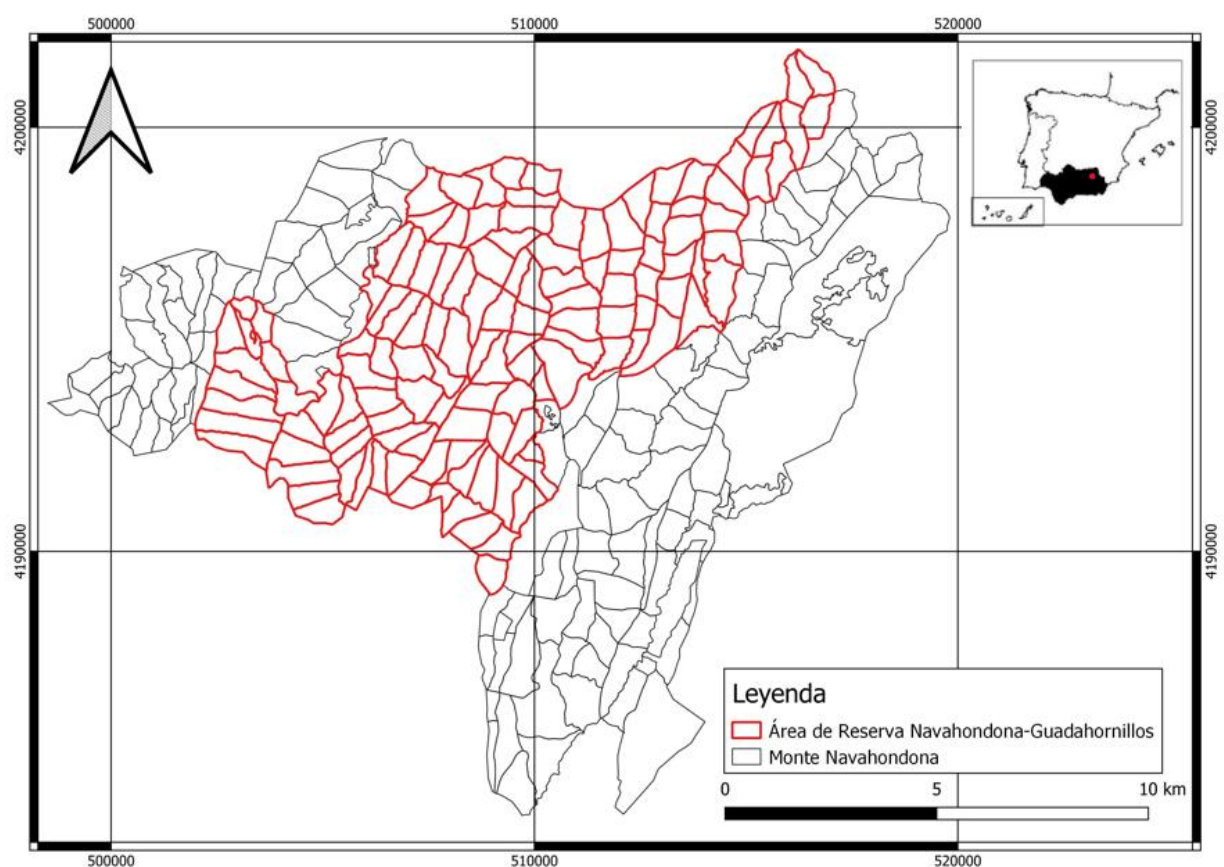


Figura 1. Localización del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos dentro del monte Navahondona. Fuente: Elaboración propia.

El inventario se realizó mediante muestreo sistemático de malla cuadrada (200 m) con parcelas circulares de 15 metros de radio. Dentro de cada parcela se contabilizó el número de árboles muertos por parcela, distinguiendo entre pies mayores o menores muertos, y según el estado se distinguía con el código 1: árboles muertos en pie y con el código 2: árboles muertos caídos. También se anotan otras variables como la densidad de pies por hectárea, área basimétrica, volumen con corteza y sin corteza, la orientación, pendiente, altitud, erosión, afloramientos rocosos, hidromorfismo, pedregosidad, daños, fracción de cabida cubierta arbórea y arbustiva, modelos de combustible y tratamientos selvícolas.

Para estudiar cómo varía la mortalidad de los árboles a lo largo del tiempo, se utilizaron dos fuentes de información: las tablas de producción de selvicultura media para las masas de *Pinus nigra* de las sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (BAUTISTA et al., 2001) y los datos contabilizados de cortas extraordinarias a lo largo de las sucesivas revisiones del proyecto de ordenación del monte Navahondona desde 1895 hasta 2011. Las tablas de selvicultura media reflejan la selvicultura realmente aplicada. Si tenemos en cuenta que las claras en el monte Navahondona se han realizado tradicionalmente por lo bajo, es decir, sobre árboles del estrato dominado próximos a quedar sumergidos por el dosel forestal, las tablas de selvicultura media ofrecerían una primera aproximación sobre el ritmo de incorporación de madera muerta en el interior de los rodales regulares. Las tablas 1 y 2 muestran el ritmo de disminución de la densidad del arbolado en dos calidades de estación diferentes y el volumen del árbol medio, a partir del cual se podría aproximar el volumen medio de madera muerta potencialmente incorporada por períodos de 10 años.

Tabla 1. Tabla de producción de selvicultura media para *Pinus nigra* en las sierras de Cazorla, Segura y Las Villas. Calidad de estación 19.

Edad	Ho (m)	N (Pies/ha)	V (m3/ha)	Volumen árbol medio (dm3)
20	7,1	3496	69	19,7
30	9,9	2651	138	52,1
40	12,1	2227	213	95,8
50	13,9	1977	287	145
60	15,4	1814	356	196
70	16,6	1702	417	245
80	17,6	1622	471	290
90	18,4	1562	516	331
100	19	1518	555	366
110	19,5	1484	587	396
120	19,9	1458	614	421
130	20,3	1437	636	442
140	20,5	1421	654	460
150	20,7	1408	669	475

Tabla 2. Tabla de producción de selvicultura media para *Pinus nigra* en las sierras de Cazorla, Segura y Las Villas. Calidad de estación 22.

Edad	Ho (m)	N (Pies/ha)	V (m3/ha)	Volumen árbol medio (dm3)
20	8,3	3086	94	31
30	11,4	2340	189	81
40	14	1966	291	148
50	16,1	1745	392	225
60	17,8	1601	486	303
70	19,2	1502	569	379
80	20,4	1431	642	449
90	21,3	1379	704	511
100	22	1340	757	565
110	22,6	1310	801	611
120	23,1	1287	837	650
130	23,5	1269	867	683
140	23,8	1254	891	711
150	24	1243	912	733

De toda la información disponible en el inventario forestal de Navahondona, se han seleccionado las variables que podrían influir más probablemente en la mortalidad natural de los árboles. Concretamente, se seleccionaron las variables que describían la estructura del monte, la presencia o no de gestión, y las condiciones ambientales. La variable de tratamientos selvícolas fue transformada en una dicotómica del tipo presencia-ausencia de tratamientos selvícolas. Concretamente, se consideraron tratamientos selvícolas los clareos y las claras, asignándoles el valor 1 de la variable, y todos los demás casos recogidos por el inventario forestal recibieron el valor 0 de la variable (ausencia de tratamientos selvícolas).

El análisis estadístico consistió, en primer lugar, en la elaboración de una tabla de correlaciones de Spearman para analizar el nivel de correlación entre las variables incluidas en el estudio. En segundo lugar, se llevó a cabo un análisis de regresión entre las distintas variables. Lo que se quiere ver es cómo las variables elegidas influyen en la mortalidad de los árboles. En este caso la variable de respuesta es el número de árboles muertos, y tenemos varias variables explicativas (área basimétrica, orientación, etc.), por lo que es necesario un análisis de regresión múltiple. Un problema del análisis de regresión múltiple es que las variables explicativas no pueden estar correlacionadas entre sí, ya que si lo estuvieran inducirían a información redundante y las matemáticas de regresión fallarían. En la tabla de correlaciones de Spearman (tabla 16), se ve que el crecimiento está fuertemente correlacionado con la densidad, el área basimétrica y el volumen. La solución para ello sería no utilizar esta variable, o bien, eliminar las otras tres variables. Finalmente, se seleccionó el área basimétrica, porque esta variable es muy utilizada en la gestión forestal. En definitiva, vamos a hacer una regresión múltiple que responderá a la siguiente expresión:

Densidad de árboles muertos = Función (área basimétrica, número de especies, orientación pendiente, cota, pedregosidad, tratamientos selvícolas)

El problema es que los análisis de regresión tradicionales (paramétricos) necesitan que los datos de la variable de respuesta se distribuyan normalmente, pero esto no ocurre en nuestro caso. La distribución del número de árboles muertos es una distribución de Poisson (Figura 2). La solución

actual para analizar variables de respuesta con una distribución de Poisson es utilizar un análisis de regresión especial que se llama de Modelos Lineales Generalizados (GLM).

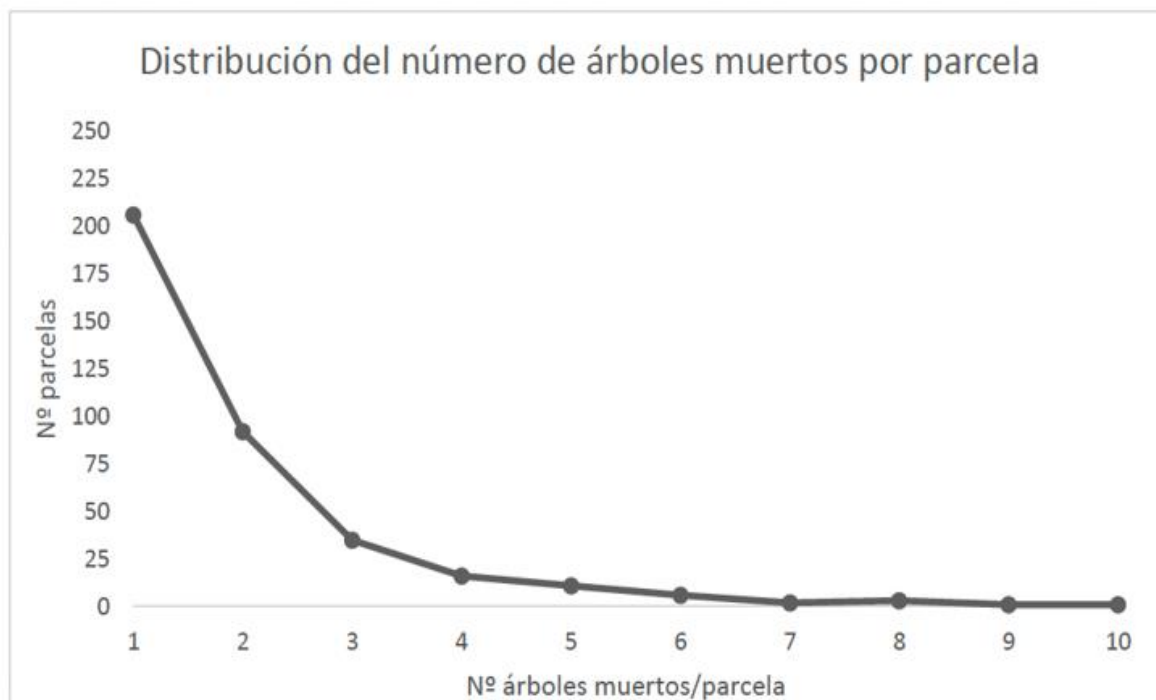


Figura 2. Relación entre el número de parcelas que contienen árboles muertos y el número de árboles muertos que hay en cada parcela del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos (Zona de protección grado A) del monte Navahondona.

Los datos de las tablas de producción de silvicultura media se utilizaron para tener una primera aproximación al ritmo de mortalidad de los árboles, y por tanto de incorporación de madera muerta, en los rodales regulares sometidos a procesos de mortalidad dependientes de la densidad. Adicionalmente, se analizó si la mortalidad de árboles en los rodales regulares se produce conforme a la ley de autoaclareo o ley de Yoda. En zonas donde existe menos densidad de árboles, el volumen individual de los árboles suele ser mayor que en zonas con mayor densidad, esta afirmación es válida sólo si existe competencia entre los individuos. Se trataría, por tanto, de una mortalidad dependiente de la densidad y ha de ser más frecuente en los puntos más densos. (CHAUCHARD et al. 1999; ÁLVAREZ 2001; SANTIAGO-GARCÍA et al. 2013).

El autoaclareo se debe producir según unas pautas espaciales y temporales. La mortalidad dependiente de la densidad ha de ser más frecuente en zonas más densas, donde se espera que los árboles mueran de manera agrupada, dando lugar a una distribución espacial homogénea o regular de los árboles supervivientes (TÍSCAR, 2004).

Esta mortalidad dependiente de la densidad seguiría una pauta temporal enunciada por (YODA et al., 1963), que proponen una línea de autoaclareo para la cantidad de biomasa en pie que pueden alcanzar los árboles en rodales monoespecíficos de estructura regular. Esta línea de autoaclareo se puede definir, según las expresiones:

$$\text{Log } p = \alpha - 1,5 \log N \quad [1]$$

$$\text{Log } b = \alpha - 0,5 \log N \quad [2]$$

N: densidad de plantas supervivientes.

p: volumen del árbol medio

b: volumen del rodal por unidad de superficie

α : constante que varía con la especie

Las pendientes de las expresiones anteriores se mantienen fijas a lo largo del tiempo. Para comprobar si la ley de autoaclareo o de Yoda se cumple en los rodales regulares de *Pinus nigra* del

monte Navahondona, se utilizaron los datos de las tablas de producción (Tablas 8 y 9) para ajustar regresiones lineales utilizando el volumen del árbol medio y el volumen por hectárea del rodal como variables respuesta, y la densidad de árboles como variable explicativa. Los coeficientes se computaron con intervalos de confianza del 95% para comprobar si los valores -1,5 y -0,5 están incluidos en ellos para confirmar que la ley de autoclareo se cumple.

4. Resultados y Discusión

En primer lugar, se realizó un análisis de los árboles de todas las especies que hay en el área de estudio. Las parcelas de inventario correspondientes al Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona, cuentan con un total de 31629 árboles de todas las especies, pero para el análisis, las especies elegidas han sido *Pinus halepensis*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster*, *Pinus pinaster* resinado, *Quercus faginea*, *Quercus ilex* y *Acer*. El número de árboles para esas especies se reduce a 31404 de los cuales 1482 son árboles muertos, con un diámetro medio de 24,74 cm y un rango de 12 a 111, y 29922 son árboles vivos, con un diámetro medio de 27,18 y un rango de 3 a 222.

Como se puede observar en la tabla 3, la mayoría de árboles vivos pertenecen a la especie *Pinus nigra*, 21982 pies, seguida de *Quercus ilex* con 4255 pies y por último de *Pinus pinaster* con 2647 pies. Si analizamos el rango, se observa que los árboles más gruesos son los de *Pinus pinaster*, llegando alguno de ellos hasta un máximo de 222 cm, sin embargo, los pies de *Pinus nigra* no son muy gruesos.

Tabla 3. Diámetros medios (cm) de árboles vivos en el Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona. El número de pies se refiere al total de árboles vivos encontrados de cada especie en las parcelas de inventario del área de estudio. Dmed: media aritmética; Dg: media cuadrática.

	Nºpies	Dmed(cm)	Dg (cm)	Mínimo	Máximo
<i>P.halepensis</i>	30	23,63	25,20	13	48
<i>P.nigra</i>	21982	27,38	30,55	5	143
<i>P.pinaster</i>	2647	26,91	29,96	3	222
<i>Q.faginea</i>	818	26,74	29,71	13	76
<i>Q.ilex</i>	4255	26,33	29,50	13	192
<i>Acer</i>	15	19,6	22,19	14	58
<i>P.pinaster resinado</i>	175	30,59	34,93	13	98

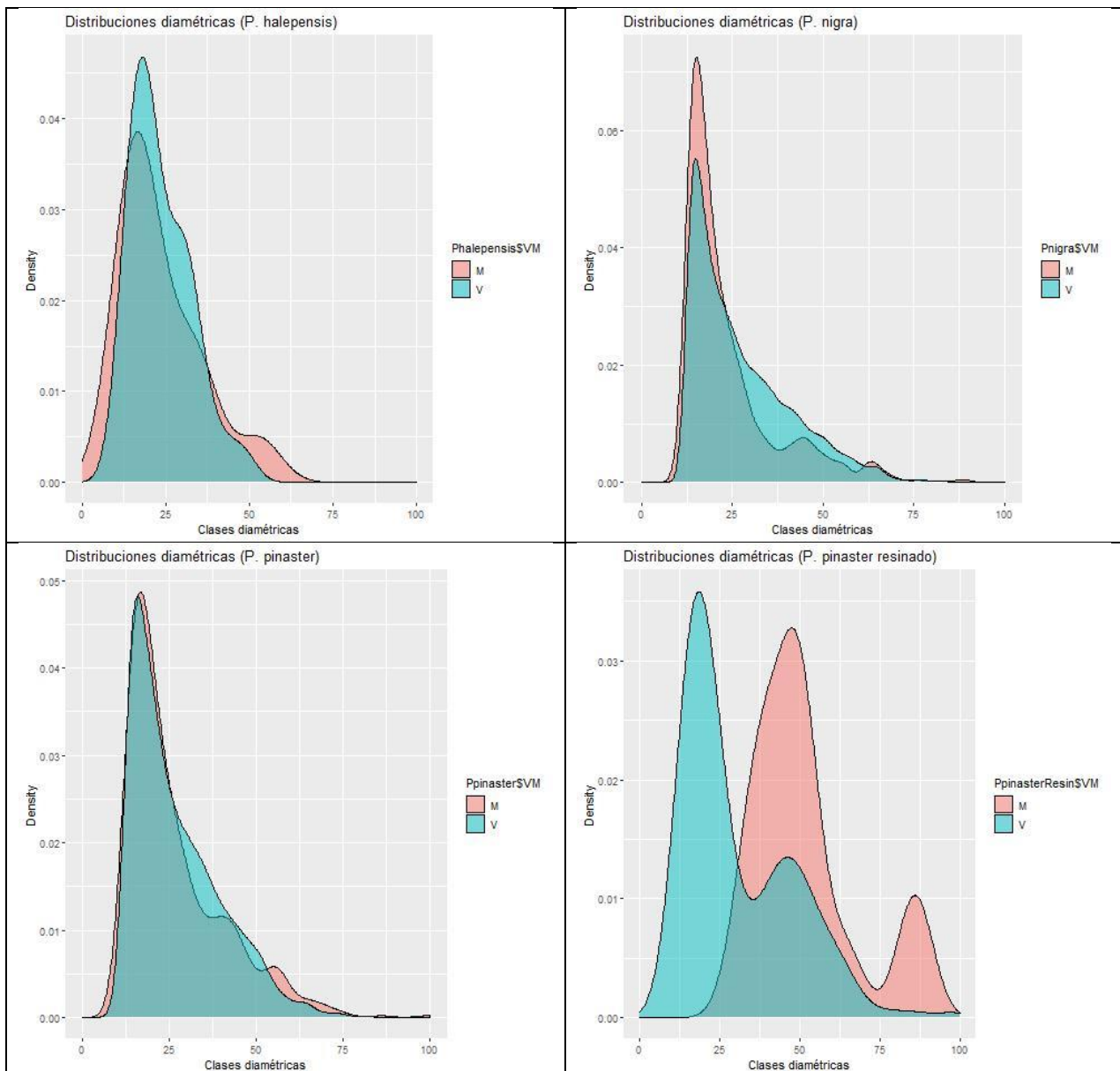
En la tabla 4, de diámetros medios de árboles muertos, se observa un dato curioso: la cantidad de árboles muertos de la especie *Pinus pinaster* (535) en relación al número de árboles vivos (2647), es bastante alta en comparación al *Pinus nigra* del cual tenemos 21982 pies vivos y 792 pies muertos.

Tabla 4. Diámetros medios (cm) de árboles muertos en el Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona. El número de pies se refiere al total de árboles muertos encontrados en las parcelas de inventario de cada especie en el área de estudio. Dmed: media aritmética; Dg: media cuadrática.

	Nº pies	Dmed(cm)	Dg(cm)	Mínimo	Máximo
<i>P.halepensis</i>	13	23,54	26,20	13	53
<i>P.nigra</i>	792	23,94	27,49	12	111
<i>P.pinaster</i>	535	26,71	30,17	13	99
<i>Q.faginea</i>	15	25,8	30,16	13	64
<i>Q.ilex</i>	113	17,67	18,6	13	40

<i>P. pinaster resinado</i>	14	51,71	54,20	32	86
-----------------------------	----	-------	-------	----	----

Además, se realizó una comparación de distribuciones diamétricas de los árboles vivos y muertos de cada especie por separado. En la figura 3 se presentan las funciones de densidad de los diámetros de árboles vivos y muertos.



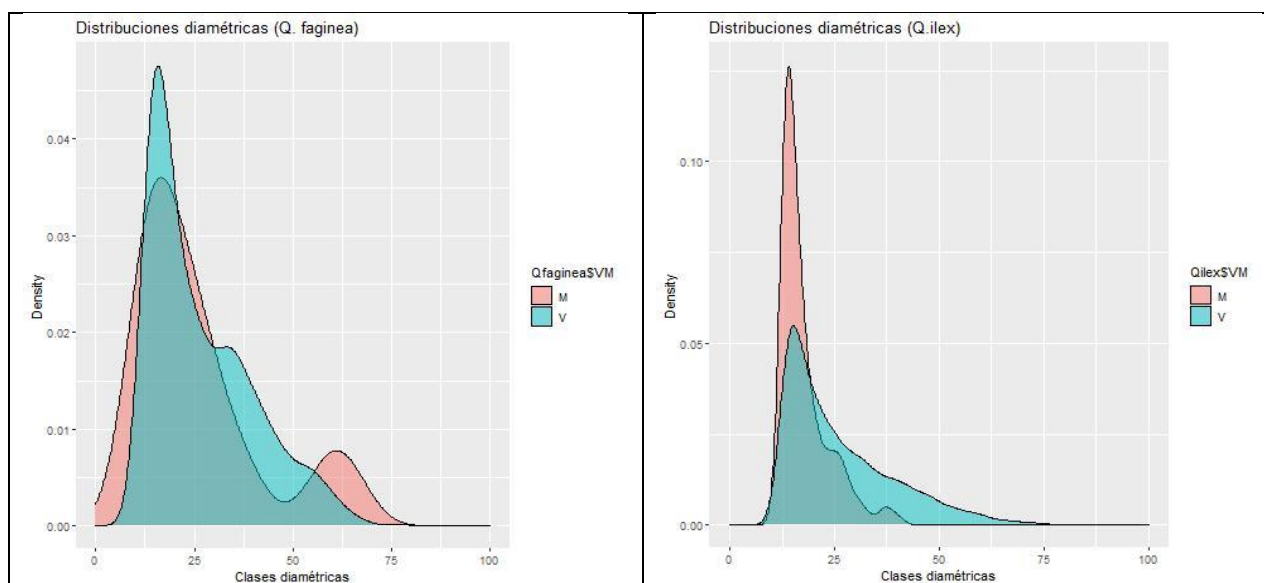


Figura 3. Comparación de las distribuciones diamétricas de los árboles vivos (en azul) y muertos (en rosa) dentro del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona.

En la distribución diamétrica de *Pinus nigra* se puede observar que hay una mayor proporción de árboles muertos pequeños, aunque en los vivos, la proporción de pequeños también es alta, sin embargo, en las clases mayores hay menor proporción de muertos que de vivos. Para el *Pinus halepensis*, el comportamiento es un poco distinto, por un lado, hay árboles muertos muy pequeños, pero en las clases diamétricas mayores hay un porcentaje alto de árboles muertos. En el caso del *Pinus pinaster* se observa que hay mortalidad de algunos pies en las clases diamétricas superiores y en el caso del *Pinus pinaster* resinado se observa que hay más árboles muertos en las clases diamétricas mayores que en las pequeñas, lo cual tiene mucho sentido ya que los pinos más gruesos podrían llevar más tiempo resinándose (suponiendo que sean de mayor edad) y por tanto, tendrían más daños provocados por la resinación lo que derivaría una mayor mortalidad de pies. Respecto a la distribución diamétrica del *Quercus faginea* se observan dos picos en los árboles muertos, un pico en las clases diamétricas menores y un pico en las clases diamétricas mayores y por último en *Quercus ilex*, domina la muerte de árboles pequeños.

Con esto, se puede comprobar que la mortalidad se comporta de manera diferente para las distintas especies analizadas.

La Tabla 5 recoge la distribución del número de árboles muertos por parcela.

Tabla 5. Distribución de los árboles muertos en el total de las parcelas de estudio dentro del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos (Zona de Protección Grado A) del monte Navahondona.

Total de parcelas	Árboles muertos por parcelas
1013	0
93	2
35	3
16	4
15	5
6	6
209	7
3	8
1	9
1	10

En la zona de estudio existen cantones en los que la madera muerta se encuentra más concentrada, aun así, en la figura 4 se puede ver que la madera muerta se encuentra repartida de forma más o menos homogénea en el total del monte. Existe la posibilidad de que los cantones donde hay una mayor concentración de parcelas con árboles muertos, se deba a que no se hayan realizado tratamientos selvícolas en los últimos veinte años, ya que como sabemos, los tratamientos selvícolas, ya sean de mejora o de regeneración, van avanzando a lo largo del tiempo por los cantones. En el total del Área de Reserva encontramos madera muerta repartida lo cual resulta beneficioso para las especies saproxílicas con una capacidad de dispersión limitada ya que podrían colonizar nuevos hábitats y sobrevivir. En cambio, si la madera muerta se encontrara concentrada sólo en algunas zonas del área de estudio, es muy probable que la capacidad de supervivencia para estos insectos se viera limitada y por tanto que se extinguieran porque no podrían colonizar nuevos hábitats.

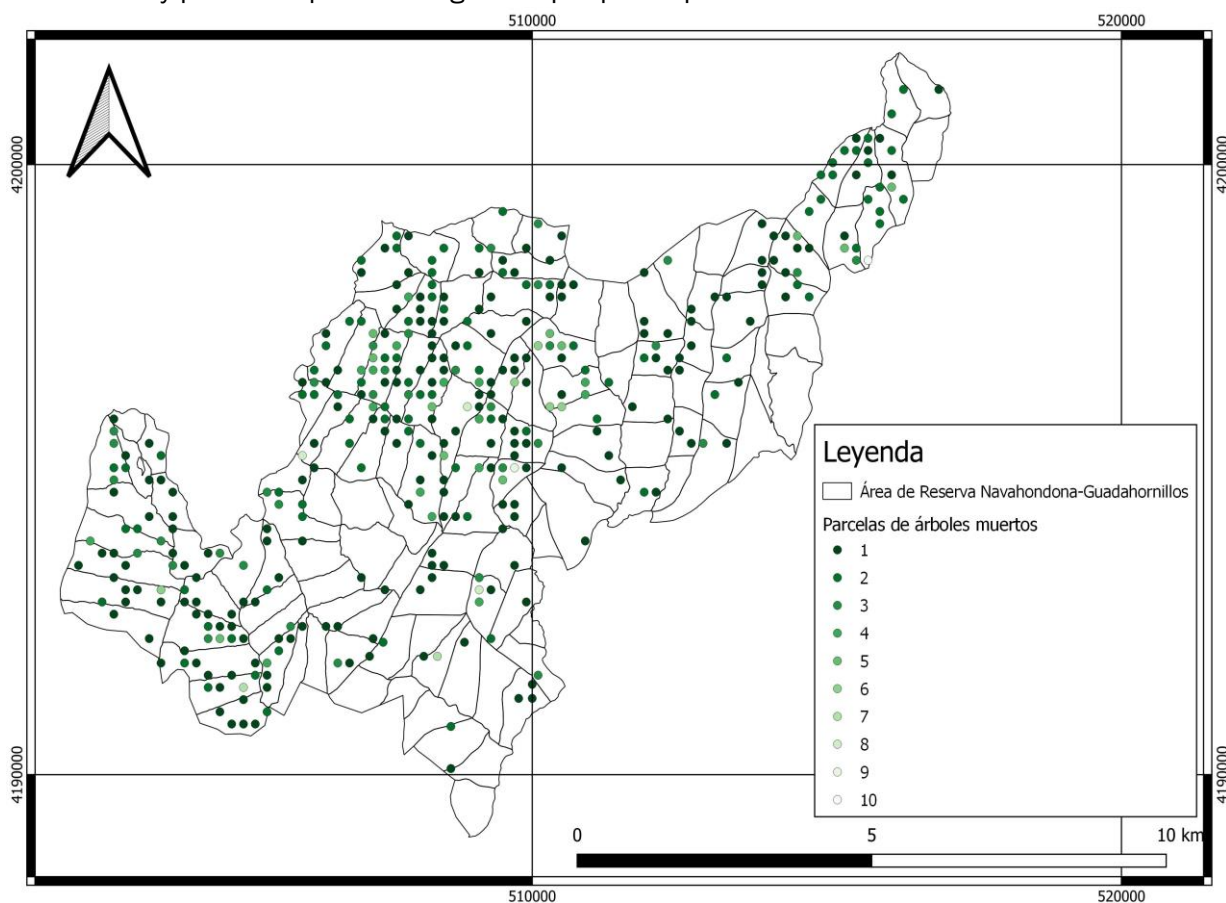


Figura 4. Número de árboles muertos de pies de *Pinus nigra* por parcela dentro del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos (Grado de protección A) dentro del monte Navahondona.

En la tabla 6, se muestran las correlaciones entre las variables objeto de estudio, es necesario fijarse en los valores en rojo ya que son los significativamente diferentes de 0 (nivel de significación del 95%), donde 0 significa que hay ausencia de relación. Dentro de estos valores, aquellos que son superiores a 0,7, ya sea positivo o negativo, indican una fuerte correlación.

Tabla 6. Correlaciones de las variables elegidas para el análisis estadístico del Área de Reserva Navahondona-Guadahornillos del monte Navahondona. En rojo los valores significativamente distintos de cero (95%).

	Nº pies/ha	G (ha)	VCC (ha)	Iv (ha)	Nº especies	Orientación	Pendiente	Cota	Pedregosidad	Tratamiento
Muertos/ha	0,270	0,255	0,215	0,252	0,111	-0,005	0,022	-0,093	-0,106	0,086
Nº pies/ha		0,689	0,519	0,716	0,170	0,065	-0,047	-0,066	-0,193	0,118
G (ha)			0,959	0,933	0,008	0,114	-0,072	-0,021	-0,260	0,255
VCC (ha)				0,892	-0,055	0,139	-0,062	-0,011	-0,255	0,281
Iv (ha)					-0,098	0,173	-0,055	0,071	-0,253	0,242
Nº especies						-0,131	-0,031	-0,475	0,008	0,031
Orientación							0,100	-0,027	-0,056	0,052
Pendiente								-0,031	0,163	0,018
Cota									0,114	-0,126
Pedregosidad										0,003
Tratamiento										

Muertos/ha: árboles muertos por hectárea; **G:** Área basimétrica; **VCC:** Volumen con corteza; **Iv:** Crecimiento corriente.

En las tablas 7 y 8, se presentan las variables explicativas que el modelo ha seleccionado como influyentes en la mortalidad de los árboles. En la tabla 7, donde se presentan los resultados del modelo ajustado, las variables que explican la mortalidad de los árboles de todas las especies son el área basimétrica, que es una medida de la espesura, el número de especies presentes, la pendiente y la cota. Pero para *Pinus nigra* (tabla 8) además de esas tres variables, aparecen otras como la exposición y la pedregosidad.

Si en las tablas nos fijamos en la columna de la probabilidad de que este suceso ocurra al azar (Pr), vemos que es una probabilidad muy baja, lo que significa que las variables influyen de forma significativa en la mortalidad. Dentro de todas estas variables, elegidas por el modelo, hay algunas que influyen más que otras. Tanto en la tabla 7, referida al número de árboles muertos independientemente de la especie, como en la tabla 8, referida al número de árboles muertos de la especie *Pinus nigra*, la variable que más influye en la mortalidad de los árboles es la espesura, G (ha), pues a esta variable corresponde la devianza más alta.

Por otro lado, tenemos los coeficientes en la columna "Estimate". Si analizamos en primer lugar la tabla 7, vemos que tenemos varios coeficientes positivos y uno negativo. Si el coeficiente es positivo, significa que un mayor valor de esa variable causa más mortalidad de los árboles. En el caso del área basimétrica, el coeficiente es positivo lo que significa que a mayor área basimétrica mayor mortalidad de árboles, lo que se puede explicar por la mayor competencia entre los árboles por recursos como agua o nutrientes.

En el caso de la pendiente, es obvio que a mayor pendiente exista una mayor mortalidad ya que, entre otras cosas, es más difícil que se retenga el agua para que sea absorbida. La cota presenta coeficiente negativo. Una posible explicación podría ser que, en las partes bajas, más cálidas, los escarabajos perforadores sean más activos que en cotas más altas, pero al no tener información sobre la causa por la que finalmente mueren los árboles no podemos afirmarlo de manera definitiva.

Los resultados mostrados en la tabla 8 se refieren a la mortalidad de *Pinus nigra* solamente. En el caso del área basimétrica, el número de especies y la pendiente se piensa que ocurre lo citado en el caso anterior. Si ahora hablamos de la exposición, se puede pensar que, si existe una mayor exposición a solana, los árboles morirán antes por sequía (evapotranspiración). Por otro lado, en el caso de la pedregosidad, ésta está correlacionada negativamente con la densidad (N/ha) y con la

espesura (G). Esto puede explicar que la mortalidad sea menor en las zonas pedregosas ya que hay menos competencia, por tanto, la supervivencia del *Pinus nigra* es mayor. Por último, el valor de los tratamientos selvícolas es positivo, por tanto, se interpreta que en los lugares donde se practican tratamientos selvícolas existe una mayor mortalidad de pies. No se prejuzgan relaciones de causa-efecto.

Tabla 7. Resultado del análisis del Modelo Lineal Generalizado realizado con el número de árboles muertos por parcela (todas las especies) como variable de respuesta del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona.

	Estimate	SE	Z value	Pr (> Z)	
INTERCEPT	-1,571	0,609	-2,579638752	0,0099	
G(ha)	0,054	0,005	10,8	0	
Nº especies	0,183	0,059	3,101694915	0,0019	
Pendiente	0,017	0,006	2,833333333	0,0029	
Cota	-0,001	0	-2,568	0,0102	
	Df	Deviance	Residual Df	Residual Dev	Pr(>chi)
NULL			1391	1154,67	
G(ha)	1	153,122	1390	1001,54	0
Nº especies	1	21,246	1389	980,3	0
Pendiente	1	9,291	1388	971,01	0,0023

Tabla 8. Resultado del análisis del Modelo Lineal Generalizado realizado con el número de árboles muertos por parcela (sólo *Pinus nigra*) como variable de respuesta del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos del monte Navahondona.

	Estimate	SE	Z value	Pr (> Z)	
INTERCEPT	-3,562	0,375	-9,496	0	
G(ha)	0,06	0,006	10,803	0	
Nº especies	0,227	0,069	3,3	0,001	
Exposición	0,168	0,096	1,748	0,0805	
Pendiente	0,021	0,007	3,063	0,0022	
Pedregosidad	-0,178	0,084	-2,13	0,0332	
Tratamiento	0,238	0,129	1,84	0,0658	
	Df	Deviance	Residual Df	Residual Dev	Pr(>chi)
NULL			1124	942,68	
G(ha)	1	179,007	1123	763,67	0
Nº especies	1	8,379	1122	755,29	0,0038
Exposición	1	5,762	1121	749,53	0,0164
Pendiente	1	8,506	1120	741,03	0,0035
Pedregosidad	1	4,495	1119	736,53	0,034
Tratamientos	1	3,429	1118	733,1	0,0641

Una de las preguntas que han surgido en relación con el estudio de la mortalidad de pies de *Pinus nigra* es si estos árboles mueren de forma concentrada en los cantones o si, por el contrario,

mueren de manera dispersa en toda la superficie de estudio. En la figura 5 se puede observar de forma cualitativa la distribución de las parcelas con árboles muertos dentro del área de estudio.

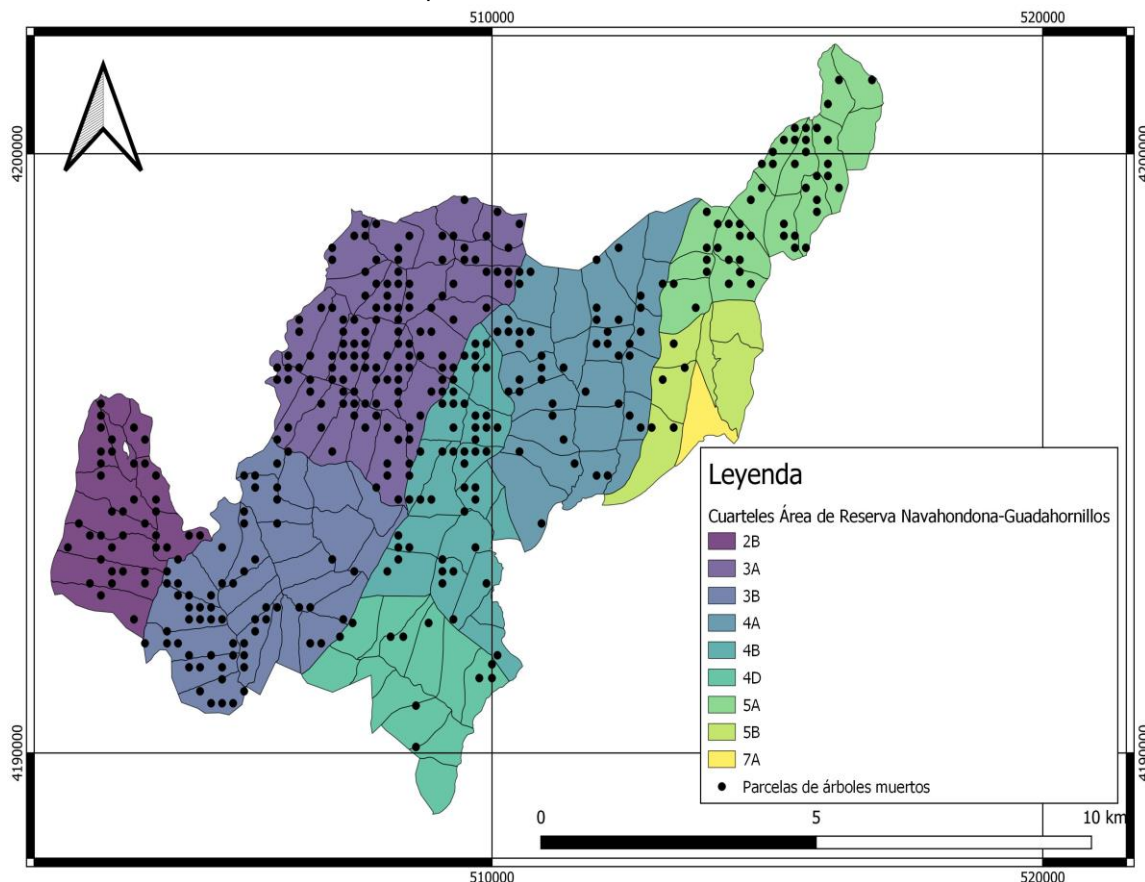


Figura 5. Representación de las parcelas que contienen árboles muertos distribuidas por cantones dentro del Área de Reserva Navahondona-Guahornillos dentro del monte Navahondona.

En las tablas 1 y 2, tablas de producción de las calidades de estación 19 y 22 respectivamente, se puede observar cómo disminuye el número de árboles con la edad, al aumentar el volumen unitario. La selvicultura observada se corresponde con los árboles que se han ido aclarando, pero si estos árboles se han cortado en una clara probablemente sea porque estos árboles se encuentren dañados o “señalados” a morir en un futuro, por tanto, si no existiera gestión forestal toda esta madera muerta se quedaría en el monte y se descompondría in situ.

Otra medida usada para evaluar la densidad es el índice de Yoda (IDY) basado en la ley de autoaclareo (relación máxima densidad-tamaño) o ley de los $-3/2$. En dasonomía se utiliza el volumen promedio de los árboles y el número de árboles por unidad de superficie para evaluar la densidad de un rodal. (DREW & FLEWELLING, 1979).

Tabla 9. Intercepción con el eje y parámetro de las regresiones que relaciona la densidad y el volumen que reflejan las Tablas de Producción para *Pinus nigra* en las sierras de Cazorla, segura y las Villas. α : constante que varía con la especie. β : pendiente de la recta.

Variable	Calidad	α	[IC 95%]	β	[IC 95%]
Vol. Árbol medio (dm ³)	19	13,69	[13,68 ; 13,70]	-3,50	[-3,50 ; -3,49]
	22	13,64	[13,63 ; 13,65]	-3,48	[-3,49 ; -3,48]
Volumen total (m ³ /ha)	19	10,69	[10,68 ; 10,70]	-2,50	[-2,49 ; -2,49]

	22	10,68	[10,67 ; 10,70]	-2,50	[-2,49 ; -2,49]
--	----	-------	-----------------	-------	-----------------

Una vez que se ha ajustado la tasa de extinción que marcan las tablas de producción y se aceptan las hipótesis planteadas con anterioridad sobre que esa es la dinámica de la masa, se comprueba que las pendientes de esa recta (β) son mayores que las que plantea la ley de Yoda de los $-3/2$, dependiendo de si es el volumen total o el volumen del árbol medio, en general son valores mayores en valor absoluto, eso podemos interpretarlo como que la tasa de extinción, es decir el ritmo de mortalidad de las tablas de producción, es mayor que el que establece la ley de Yoda, es decir, el número de pies disminuye más rápidamente al aumentar el tamaño de lo que propondría la ley de Yoda. Los resultados obtenidos, en el caso de las calidades de estación 19 y 22 para la variable "Volumen de árbol medio" la pendiente es de $-3,5$ en lugar de ser de $-1,5$, como propone Yoda y en el caso de la variable "Volumen total" la pendiente obtenida es de $-2,5$ en lugar de $-0,5$ como propone Yoda.

La principal perturbación que puede afectar en gran medida al monte Navahondona y, por tanto, generar madera muerta de forma natural en el mismo, es el fuego, ya que los daños debidos a vientos y nieves pueden generar daños, pero no suelen ser demasiado cuantiosos tal y como se verá más adelante.

Existe un riesgo de incendios como resultado de causas naturales (rayos). Como sabemos estos incendios son extinguidos mediante la intervención de los bomberos forestales del Plan Infoca, la pregunta que surge ahora es, si este cuerpo no existiera y por tanto su labor no se diera, ¿ardería todo el monte o se apagaría de forma natural? La respuesta a esto puede estar en que si el fuego alcanza zonas donde la densidad de combustible es menor probablemente se extinguiera de manera natural, en cualquier caso, lo que sí es probable es que el *Pinus nigra* no sobreviviera ya que según SERRADA et al. (1994) es una especie que presenta problemas para regenerarse tras un incendio. Según VALLADARES (2004) la capacidad de regeneración de las comunidades vegetales depende de la respuesta de las especies, existen especies vegetales que mantienen sus órganos y yemas protegidas de las altas temperaturas tienen semillas resistentes a altas temperaturas y que, tras pasar el incendio, germinan aprovechando el incremento de espacio y recursos que se producen como consecuencia del incendio como el aporte de cenizas de los árboles padre que suponen una gran fuente de abono. Estudios realizados por RICHARDSON (2000) considera que el mayor éxito de regeneración tras un incendio lo tienen especies de *Pinus* como *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, ya que son especies resilientes al fuego y disponen de pequeñas semillas aladas y piñas con un grado serotino alto. Como he dicho anteriormente, esto no ocurre con la especie de estudio, el *Pinus nigra* y por tanto la supervivencia generalmente sería muy baja.

En el monte Navahondona los daños que son ocasionados por heladas, el calor o el granizo son despreciables. Pero si las masas se encuentran debilitadas por algún otro factor, los vientos y las nieves pueden ocasionar daños importantes, añadiendo madera muerta de forma natural al monte. En la figura 7 se pueden observar las cortas por vientos y nieves desde el año 1895 hasta el año 2010, relacionando los $m^3/año$ con los $m^3/ha \cdot año$, podemos ver el ritmo al que se añade madera muerta de forma natural al monte. Resulta interesante aclarar que durante el año 1959 cuando se realizó la tercera revisión ordinaria del Proyecto de Ordenación del Monte Navahondona, se realizaron cortas debido a un huracán que dañó 18.397 pinos que cubicaron 14.614 m^3 aproximadamente. Sabiendo esto, se puede explicar la variabilidad drástica entre volúmenes y superficies.



Figura 6. Evolución de las cortas debidas a vientos y nieves en el periodo comprendido entre 1895-2010 en el monte Navahondona.

Por último, alguna de las recomendaciones selvícolas aplicadas respecto a los resultados obtenidos, sería dejar árboles gruesos de los que se vayan a cortar en los aprovechamientos en al menos 2 árboles por hectárea como establece el sistema de certificación forestal FSC. Como se ha visto, en nuestra área de estudio disponemos de una media de 7 árboles muertos por hectárea, más de lo que establece FSC en su recomendación. Pero otra de las recomendaciones de FSC es que deben de ser los árboles más gruesos y en nuestros resultados de análisis descriptivos hay mayor mortalidad en las clases diamétricas más pequeñas, es decir, mueren más árboles delgados que gruesos. Para cumplir lo que propone el sistema de certificación FSC, la recomendación selvícola sería dejar árboles gruesos de los que se vayan a cortar en los aprovechamientos, en esa cantidad de 2 árboles por hectárea que podrían ser de los que se cortan y no se extraen, es decir, no se procede su desembosque, quedando tumbados en el suelo como un ejemplo de madera tumbada y algunos de los árboles señalados para ser cortados se podrían anillar para que mueran en pie como ejemplo de madera muerta en pie y lógicamente estos árboles no se cortarían ni tampoco se extraerían.

5. Conclusiones

Uno de los resultados más importantes obtenido en los análisis de estadística descriptiva y, que da respuesta al objetivo 2, es el número de medio de árboles muertos por hectárea para la zona de estudio. Dicho resultado es 7 árboles muertos por hectárea y resulta muy importante ya que con él se establece una cifra de referencia de árboles muertos para las masas naturales de *Pinus nigra* en la Sierra de Cazorla, con el fin de conseguir un criterio de sostenibilidad relacionado con el mantenimiento de la diversidad forestal. Otro de los resultados importantes es la relación entre el área basimétrica (una medida de la espesura) con la mortalidad de *Pinus nigra*, esta variable es muy significativa, considerándola la variable explicativa más relevante en este estudio, en zonas donde existe una mayor densidad de pies también existe más mortalidad, por tanto, la mortalidad de *Pinus nigra* estaría ligada a la competencia. Por otro lado, se ha encontrado que existe una relación negativa entre la mortalidad de *Pinus nigra* y las variables altitud y pendiente, es decir, hay menos mortalidad a mayor altitud y mayor pendiente, pero, posiblemente esto se explique porque en estas

condiciones, la espesura de la masa es menor y puesto que la mortalidad observada es fundamentalmente por competencia, en zonas donde exista menos densidad de pies, y por tanto una menor competencia, también existirá menos mortalidad. Las tablas de producción como modelo de dinámica han mostrado una tasa de extinción superior a la propuesta por Yoda para masas no intervenidas. Con respecto a la diferencia de diámetro de los árboles vivos y los árboles muertos se ha visto que existen diferencias estadísticamente significativas, es decir, tanto para el total de especies como para la especie *Pinus nigra* los árboles muertos tienen un tamaño medio significativamente menor que los árboles vivos. En base al número de pies muertos por hectárea que propone el sistema de certificación forestal FSC, según este estudio se cumple la condición propuesta por FSC en base al número de árboles muertos por hectárea, pero no en cuanto al tamaño de los árboles, por tanto, sería necesario introducir algún procedimiento para incorporar mortalidad de árboles más grandes a la zona de estudio cumpliendo así las dos condiciones propuestas por FSC.

6. Bibliografía

ÁLVAREZ, J. (2001). Descomposición y ciclo de nutrientes en Ecosistemas terrestres de México.

BAUTISTA, R., ALONSO, A., GRAU, J. M., & GÓMEZ, J. A. (2001). Tablas de producción de silvicultura media para las masas de *Pinus nigra* Arn. De la Sierra de Cazorla, Segura y Las Villas. Congreso Forestal Español.

BELTRÁN, M., PIQUÉ, M., CERVERA, T., PALERO, N., & CAMPODRON, J. (2018). Manual de buenas prácticas de gestión para la conservación de los bosques de pino laricio. Compatibilización de la producción forestal y la conservación del hábitat.

BRUNET, J., & ISACSSON, G. (2009). Restoration of beech forest for saproxylic beetles – effects of habitat fragmentation and substrate density on species diversity and distribution. *Biodiversity and Conservation*.

BRUNIALTI, G. (2014). Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity. *International Journal of Environmental Studies*, 71(2), 226-227. <https://doi.org/10.1080/00207233.2014.889472>

BUSE, J. (2012). Ghosts of the past": Flightless saproxylic weevils (Coleoptera: Curculionidae) are relict species in ancient woodlands. *Journal of Insect Conservation*.

CHAUCHARD, L., SBRANCIA, R., GONZALEZ, M., MARESCA, L., & Rabino, A. (1999). Aplicación de leyes fundamentales de la densidad a bosques de *Nothofagus*: I. Regla de los $-3/2$ o ley del autorraleo. *Bosque*, 20(2), 79-94. <https://doi.org/10.4206/bosque.1999.v20n2-08>

DIAZ ZIRPOLO, J. (2018). Madera muerta como factor para la gestión de los recursos forestales en bosques del Chaco Semiárido, Argentina (Resumen Tesis Doctoral). 25, 125-126.

DREW, T. J., & FLEWELLING, J. W. (1979). Stand Density Management: An Alternative Approach and Its Application to Douglas-fir Plantations. *Forest Science*, 25(3), 518-532. <https://doi.org/10.1093/forestscience/25.3.518>

GÓMEZ, N., HERRERO, C., & BRAVO, F. (2009). Cuantificación de la madera muerta en los hayedos del Monte Aralar (Navarra).

KEREN, S., & DIACI, J. (2018). Comparing the Quantity and Structure of Deadwood in Selection Managed and Old-Growth Forests in South-East Europe. *Forests*, 9(2), 76. <https://doi.org/10.3390/f9020076>

RICHARDSON, D. M. (2000). *Ecology and Biogeography of Pinus*. Cambridge University Press.

SANTIAGO-GARCÍA, W., DE LOS SANTOS-POSADAS, H. M., ÁNGELES-PÉREZ, G., VALDEZ-LAZADE, J. R., DEL VALLE-PANIAGUA, D. H., & CORRAL-RIVAS, J. J. (2013). Auto-aclareo y guías de densidad para *Pinus patula* mediante el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia*, 47(1), 75-89.

SERRADA, R., DOMÍNGUEZ, S., SÁNCHEZ, M., & RUIZ, J. (1994). El problema de la regeneración natural de *Pinus nigra* Arn.

SORIANOTICIAS. (2019). Ecólogos forestales afirman que retirar la madera muerta debilita a los bosques. <https://sorianoticias.com/noticia/2019-10-17-ecologos-forestales-afirman-que-retirar-madera-muerta-debilita-bosques-62122>.

TÍSCAR, P. A. (2004). Estructura, regeneración y crecimiento de *pinus nigra* en el área de reserva Navahondona-Guahornillos [Http://purl.org/dc/dcmitype/Text, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=185193>

VALLADARES, F. (Ed.). (2004). *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Organismo Autónomo Parques Nacionales.

YODA, K., KIRA, T., OGAWA, H., & HOZUMI, K. (1963). Self-thinning in overcrowded pure stands under cultivated and natural conditions (Intraspecific competition among higher plants XI).