

INFLUENCIA DEL CLIMA EN EL CRECIMIENTO DEL VOLUMEN DEL RODAL. APLICACIÓN A MASAS DE *PINUS HALEPENSIS* MILL. EN LA PROVINCIA DE MURCIA

Sonia Condés Ruiz, Marta Fernández Vaquero y Fernando García Robredo

Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: sonia.condes@upm.es

Resumen

En este trabajo se presenta un modelo de crecimiento para *Pinus halepensis* que incluye variables climáticas con el doble objetivo de analizar cuáles son los indicadores que mejor expresan la influencia del clima en el crecimiento de la especie, y de cuantificar dicha influencia ante las alternativas de aumento de temperatura y disminución de precipitación más probables en el ámbito Mediterráneo. En la estimación del crecimiento se emplean como base los datos del Inventario Forestal Nacional. Se observa que los índices que incluyen precipitación, o precipitación y temperatura conjuntamente, son los que mejores resultados ofrecen, destacando entre ellos la precipitación anual, la eficacia pluviométrica, el índice de Emberger o la intensidad bioclimática libre. Se observa también que un modelo sencillo con inclusión de temperatura media y precipitación anual como variables climáticas es suficiente y mucho más fácil de interpretar. Como resultado se obtiene que los cambios en temperatura afectan mucho menos que los cambios de precipitación, así un aumento de 0.5° de temperatura o una disminución de la precipitación en 25 mm se traducen respectivamente en una disminución del crecimiento corriente en 1,4% y 8,5%.

Palabras clave: *Modelo de crecimiento, Cambio climático, Índices bioclimáticos, Inventario Forestal Nacional*

INTRODUCCIÓN

Es innegable la influencia del clima sobre la composición, desarrollo y crecimiento de las masas forestales. Muchos son los estudios que han tratado de cuantificar el efecto de las variables climáticas sobre la productividad y el crecimiento forestal (DANTIN Y REVENGA, 1940; PATERSON, 1956; GANDULLO Y SERRADA, 1977).

La metodología general de estos trabajos consiste en tratar de encontrar una relación empírica entre la productividad forestal y un conjunto de variables e índices climáticos. (CZARNOWSKI,

1964) determinó una fórmula general que relaciona el crecimiento de los árboles con factores edafológicos, biológicos y climáticos.

En el momento actual estos trabajos cobran una especial importancia debido a la necesidad de predecir los efectos que el cambio climático va a tener sobre el desarrollo de los ecosistemas forestales. Esta necesidad ha dado lugar a una amplia variedad de modelos, desde modelos basados en datos tomados sobre anillos de crecimiento que hacen uso de la Dendrocronología (RATHGEBER et al., 2000), a modelos híbridos que se basan en datos dendrométricos y en el

funcionamiento fisiológico de las especies. Estos estudios ratifican la necesidad de incluir variables bioclimáticas en los futuros modelos estadísticos predictivos (FONTES et al., 2010).

Con el fin de analizar los efectos del cambio climático en los bosques, SABATÉ et al. (2004) han desarrollado un modelo a escala europea que, a partir de las condiciones ambientales, la fisiología de la vegetación y la estructura del ecosistema, simula el crecimiento forestal, así como los flujos y los balances de agua y carbono para los distintos tipos de bosque. Este modelo general predice aumentos del crecimiento en los bosques europeos hasta mediados del siglo XXI y la inversión de esta tendencia durante la segunda mitad del siglo. Por regiones, se predice un notable incremento de las tasas de captación de CO₂ en el centro y norte de Europa, pero una disminución de las mismas (e incluso la aparición de zonas de emisión neta) en algunas regiones del sur de Europa.

Una masa en perfecto estado fitosanitario, en tanto no se corte o se queme, es un sumidero de carbono. Por supuesto, los efectos de una corta o de un incendio no son asimilables: un incendio daría lugar a una emisión repentina de CO₂, mientras que una corta generaría una serie de productos que, en función de su vida útil, permitirían mantener el carbono fijado durante más o menos tiempo; pero ambos interrumpen el proceso de fijación de CO₂. El ritmo al que absorbe CO₂ viene marcado por el crecimiento de la masa y está gobernado por las condiciones ecológicas en las que se desarrolla (clima, suelo y competencia). En efecto, allí donde las condiciones hídricas no son limitantes para la producción forestal, el cambio climático tiene un efecto positivo sobre el crecimiento. En cambio, en el sur de Europa, el aumento de las temperaturas y la consiguiente elevación de la evapotranspiración potencial podría dar lugar a una disminución de la reserva de agua en el suelo y al agravamiento de las condiciones de sequía, con el consiguiente efecto negativo sobre el crecimiento en volumen (MORENO et al., 2005).

La literatura sobre la interacción entre el cambio climático y el papel de mitigación que desempeñan los bosques se encuentra en una fase temprana. Es más que probable que los bosques reciban el impacto del cambio climático, lo

que podría reducir su potencial de mitigación (IPPC, 2007). Así, si el efecto de la sequía prevalece, la disminución del crecimiento de las formaciones forestales traerá consigo una reducción de su capacidad para absorber carbono de la atmósfera, retroalimentando así el problema (SABATÉ et al., 2002).

El objetivo del presente trabajo es analizar el efecto del cambio climático sobre el crecimiento de los rodales de *Pinus halepensis* en la provincia de Murcia, determinando por un lado cuales son los indicadores climáticos que mejor expresan dicha influencia, y por otro cuantificando los cambios de crecimiento ante las alternativas de aumento de temperatura y disminución de precipitación más probables en la zona de estudio. En la estimación del crecimiento se emplean como base los datos del Inventario Forestal Nacional (IFN).

Trabajos como el presente pueden contribuir a clarificar la relación entre clima y crecimiento en masas concretas, proporcionando así una herramienta para analizar las variaciones de crecimiento en distintos escenarios de evolución de las variables climáticas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para la estimación del crecimiento del volumen se cuenta con un total de 884 parcelas del Inventario Forestal Nacional. Estas parcelas corresponden a masas puras de *Pinus halepensis* en la provincia de Murcia remedidas en los inventarios 2º, 3º y 4º. Dichos inventarios se han llevado a cabo respectivamente en los años 1987, 1999 y 2010, es decir con periodos entre inventarios de 12 y 11 años.

Conviene recordar que las parcelas del Inventario Forestal Nacional están distribuidas por toda la superficie española situándose en los vértices una malla cuadrada de 1 km de lado. Son parcelas compuestas por 4 círculos concéntricos de 5, 10, 15 y 25 metros de radio, en las que se miden diámetros y alturas de todos los árboles con diámetro superior a 7,5 cm; 12,5 cm; 22,5 cm y 42,5 cm respectivamente.

Por otro lado, para el cálculo de los índices climáticos se ha contado con los datos proporcionados por la Agencia Estatal de

Meteorología. Esta cuenta con más de 150 estaciones meteorológicas distribuidas por la provincia de Murcia. De ellas solamente 82 tienen prácticamente completas las series de datos de temperaturas medias y precipitaciones mensuales durante el periodo objeto de estudio, es decir entre los años 1987 y 2010.

En la mayoría de los casos ha sido necesario rellenar alguno de los datos de temperatura o precipitación, lo cual se ha hecho de la forma habitual, relacionando el resto de los datos de la serie con los de estaciones cercanas buscando relaciones lineales, que en general se encontraban con coeficientes de determinación superiores al 95% para temperaturas y superiores al 90% para precipitaciones.

En la Figura 1 se presenta un mapa de Murcia en el que se representa la ubicación de las parcelas del Inventario Forestal Nacional junto a las estaciones meteorológicas usadas en este trabajo.

Los valores medios característicos de las parcelas del IFN utilizadas en este trabajo, tanto en lo que se refiere a características de la masa forestal como a los índices climáticos se presentan respectivamente en las Tablas 1 y 2.

Estimación del crecimiento en volumen

Las características especiales de las parcelas del Inventario Forestal Nacional obligan a utilizar una metodología específica para el cálculo de los crecimientos del volumen del rodal. Si

esto no se tiene en cuenta pueden aparecer crecimientos por hectárea negativos consecuencia de que en las parcelas concéntricas se han tomado diámetros mínimos inventariables diferentes para cada radio de muestreo. En este trabajo se ha utilizado una adaptación del método propuesto por HÉBERT *et al.* (2005). La particularidad de este método es que se consideran los diámetros límites de muestreo para expandir a valores por hectárea los crecimientos de árboles individuales de tal manera que un mismo árbol podrá contribuir con diferentes factores de expansión. Así para un árbol hipotético que en el periodo entre inventarios pasase de tener un diámetro inicial de 11 cm (y por lo tanto estar muestreado en el círculo de radio 5 m) a un diámetro de 13 cm (y por lo tanto estar muestreado en el círculo de radio 10 m) se calcularía el crecimiento como:

$$\Delta V = (v_{12.5} - v_{11}) \frac{10000}{\pi 5^2} + (v_{13} - v_{12.5}) \frac{10000}{\pi 10^2}$$

Donde v_i representa el volumen correspondiente a un diámetro i , y ΔV el crecimiento en valores por hectárea correspondiente al árbol en cuestión.

En esta metodología es necesario calcular los volúmenes a partir de tarifas de cubicación. No es posible la utilización de ecuaciones de dos entradas calculando las alturas con ecuaciones generalizadas ya que se requiere el conocimiento del volumen del árbol en el momento de paso entre un círculo de muestreo y el otro, momento en el

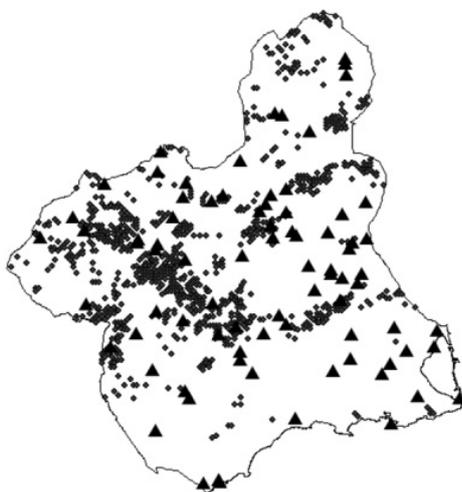


Figura 1. Localización de las parcelas del IFN y las estaciones meteorológicas usadas en el trabajo (señaladas con un triángulo)

		Media	Desv. típica	Mínimo	Máximo
IFN2	N [pies·ha ⁻¹]	272,61	290,48	5,09	2242,32
	G [m ² ·ha ⁻¹]	5,03	4,58	0,39	31,54
	H _{dom} [m]	6,77	2,19	2,00	17,21
	SDI [pies·ha ⁻¹]	120,83	109,38	10,53	822,38
	IHart [%]	167,69	119,65	21,99	952,31
IFN2-IFN3	IV [m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹]	0,74	0,66	0,01	4,26
IFN3	N [pies·ha ⁻¹]	332,10	312,93	5,09	2.298,90
	G [m ² ·ha ⁻¹]	7,41	5,65	0,46	37,65
	H _{dom} [m]	7,97	2,25	2,50	18,44
	SDI [pies·ha ⁻¹]	172,44	132,48	11,91	952,59
	IHart [%]	123,07	95,55	19,00	761,85
IFN3-IFN4	IV [m ³ ·ha ⁻¹ ·año ⁻¹]	0,80	0,62	0,00	3,48
Ambos	Altitud [m]	775,12	269,51	73,90	1.552,20
	Pendiente [°]	16,88	10,81	0,78	61,34
	Orientacion [°]	186,91	111,84	0,09	359,70

Tabla 1. Valores medios de descriptoras de las 884 parcelas del IFN2 e IFN3

		Media	Desv. típica	Mínimo	Máximo
IFN2 – IFN3 (1987-1999)	T media	15,83	1,58	11,97	19,28
	P Anual	374,73	60,51	229,35	587,94
	Aridez UNEP	0,46	0,10	0,23	0,77
	Emberger	65,01	14,80	36,21	106,37
	Eficacia Pluviométrica	26,65	6,08	13,69	46,93
	Eficiencia Térmica	854,83	85,36	646,61	1.041,29
	Índice global de humedad	-54,08	10,21	-76,96	-23,18
	Aridez de Martonne	14,70	3,02	7,93	24,26
	Termicidad	331,20	29,73	258,94	399,29
	ETP	69,50	5,85	57,16	90,70
	IBL	4,19	0,95	1,48	6,66
IFN3 – IFN4 (1999-2010)	T media	15,94	1,49	11,91	20,34
	P Anual	354,71	55,50	227,14	526,47
	Aridez UNEP	0,43	0,09	0,21	0,72
	Emberger	59,81	13,33	35,04	101,71
	Eficacia Pluviométrica	25,26	5,74	13,88	43,21
	Eficiencia Térmica	860,55	80,34	643,14	1.098,48
	Índice global de humedad	-57,30	9,38	-78,63	-27,57
	Aridez de Martonne	13,83	2,79	7,94	22,80
	Termicidad	330,25	27,86	255,83	408,98
	ETP	70,72	5,57	57,63	97,43
	IBL	3,80	1,02	1,09	6,07

Tabla 2. Valores medios de los índices climáticos en cada uno de los dos periodos entre inventarios

que se desconocen los valores de las variables características de la masa que suelen intervenir en dichas ecuaciones, p. ej. la altura dominante.

Así pues se han construido, para las diferentes formas en las que se clasifican los árboles en el IFN, tarifas de cubicación de una entrada a partir de las ecuaciones de dos entradas publicadas en los libros del inventario (MIMAM, 2002). El modelo analítico empleado es el propuesto por MANOSALVA (1995), por ser el que mejores ajustes proporcionaba, así como el único que no presentaba tendencia alguna en los residuos.

Además, en el caso de los árboles cortados o muertos entre inventarios, y dada la falta de datos sobre el momento de su corta o el diámetro en dicho instante, se ha considerado que los árboles se cortaban a la mitad del periodo entre inventarios, calculando el diámetro en ese momento a partir del diámetro inicial y del crecimiento estimado. Este crecimiento diametral se obtiene ajustando la ecuación de crecimiento propuesta por HOSSFELD (1822). Se construyen dos ecuaciones diferentes en función del periodo considerado. Si bien los coeficientes de determinación resultan bajos, es importante considerar que en la mayoría de los casos se utilizan valores medios de crecimiento por clase diamétrica, con resultados similares salvo en el caso de las clases diamétricas superiores en las que generalmente hay muy pocos datos y los valores medios por clases diamétricas no resultan en absoluto representativos.

Teniendo en cuenta todo lo anterior se ha calculado el crecimiento corriente bruto del volumen para cada parcela y en cada uno de los periodos entre inventarios:

$$Iv = \frac{\Delta V_s + \Delta V_m + \Delta V_c + \Delta V_i}{t_2 - t_1}$$

Donde Iv es el crecimiento corriente del volumen expresado en $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$, y ΔV_s , ΔV_m , ΔV_c y ΔV_i son respectivamente los incrementos de volumen correspondientes a árboles supervivientes, muertos, cortados e incorporados en el periodo entre inventarios; t_1 y t_2 representan los años en los que se realizan el inventario inicial y final.

Junto a estos datos, y para el posterior ajuste de modelos, se han estimado al principio de cada periodo de crecimiento las variables dasométricas clásicas, es decir número de pies y área basimétrica por hectárea, altura dominante (ASSMANN, 1961), índice de espesura de Reineke (REINEKE, 1933), etc.

Cálculo de los índices climáticos

Partiendo de las series de temperatura media y precipitación mensual se han calculado en cada una de las 82 estaciones empleadas en el trabajo, los índices bioclimáticos que se describen en la Tabla 5. Los valores de estos índices se obtienen año a año en el periodo comprendido entre el 2º Inventario Forestal Nacional y el 4º, calculándose a continuación los valores medios

Forma de cubicación	Ecuación del IFN	Tarifa	R ² ajustada
1 y 2	$v = 41.04 + 0.0002608d^2h$	$\log(v) = -40.24 + 5.07 \log(d) + \frac{96.76}{\log(d)}$	94.77 %
3	$v = 6.23 + 0.0002965d^2h$	$\log(v) = -5.86 + 1.87 \log(d) + \frac{1.84}{\log(d)}$	87.16 %
5	$v = 40.91 + 0.0001892d^2h$	$\log(v) = -36.17 + 4.52 \log(d) + \frac{88.49}{\log(d)}$	95.29%

Tabla 3. Ecuaciones de cubicación para *Pinus halepensis* en Murcia, con v en dm^3 , d en mm y h en m

INF 2 - 3	IFN 3 - 4
$id = \frac{12.22 d}{(6.11 + 0.0152d)^3}$ R ² = 3%	$id = \frac{16.04 d}{(8.02 + 0.0124d)^3}$ R ² = 5%

Tabla 4. Ecuaciones de crecimiento en diámetro para *Pinus halepensis* en Murcia, con d en mm e id en $mm \cdot año^{-1}$

de los índices en los dos periodos entre inventarios, es decir entre el 1987 y el 1999, y entre el 1999 y el 2010.

Además de los índices descritos en la tabla, se ha calculado la intensidad bioclimática libre o IBL (MONTERO DE BURGOS Y GONZÁLEZ-REBOLLAR, 1974), que cuantifica la capacidad de un clima para producir biomasa vegetal, y que en consecuencia puede ser considerada como una medida de la productividad potencial. En su cálculo se emplea la evapotranspiración potencial que aparece en la Tabla 5 y, en ausencia de

datos concretos procedentes de análisis de suelos, la escorrentía y capacidad de retención se han estimado en función de la pendiente del terreno y la textura del suelo respectivamente (Tablas 6 y 7) (GARCÍA-ROBREDO Y CONDÉS, 2005). Del mismo modo que para el resto de los índices, se ha calculado la intensidad bioclimática libre año a año, obteniendo finalmente los valores promedios en los dos periodos de crecimiento considerados.

Los valores de los índices climáticos obtenidos se han interpolado espacialmente, con ayuda

Índice	Formula	Valores
T media	$\sum_{12} T_i / 12$	-
P Anual	$\sum_{12} P_i$	< 200 árido > 1.600 hiperhúmedo
Aridez UNEP (MIDDLETON & THOMAS, 1992)	P/ETP	< 0,05 hiperárido > 0,65 húmedo
Emberger (EMBERGER, 1932)	$100 \cdot P / ((M+m)(M-m))$	0-30 árido > 90 húmedo
Eficacia pluviométrica (THORNTHWAITE, 1931)	$10 \sum_{12} 11,5 [P_{P_i} / (T_{F_i} - 10)]^{10,9}$ Si $11,5 [P_{P_i} / (T_{F_i} - 10)]^{10,9} > 40$ se hace $11,5 [P_{P_i} / (T_{F_i} - 10)]^{10,9} = 40$	< 16 árido > 128 húmedo
Eficiencia térmica (THORNTHWAITE, 1948)	$10 \sum_{12} [(T_{F_i} - 32) / 4]$ Si $T_{F_i} < 32$ se hace $T_{F_i} = 32$	< 142 Gélido > 1.440 Megatérmico
Índice global de humedad	$(P - ETP / ETP) \cdot 100$	< -60 hiperárido > 100 hiperhúmedo
Aridez de Martonne (MARTONNE, 1926)	$P / (T + 10)$	0-5 árido desértico > 60 per-húmedo
Termicidad de Rivas-Martínez (RIVAS-MARTÍNEZ, 1983)	$10(T + m + M)$	< -30 Crioromediterráneo > 350 Termomediterráneo
ETP (THORNTHWAITE, 1948)	$1/12 \sum_{12} (L_i \cdot 16 (10T_i/I)^a)$ Con $I = \sum (T_i/5)^{1,514}$ y $a = 675 (I \cdot 10^{-3})^3 - 77,1(I \cdot 10^{-3})^2 + 1792(I \cdot 10^{-5}) + 0,49329$	< 11.875 Glacial > 95 Megatérmico

Tabla 5. Índices climáticos empleados en el trabajo. Con P = precipitación anual en mm, T = temperatura media anual en mm, M =temperatura media del mes más cálido, m =temperatura media del mes más frío, P_{P_i} = precipitación mensual en pulgadas, T_{F_i} = temperatura media mensual en grados Fahrenheit, P_i = precipitación mensual en mm, T_i = temperatura media mensual en °C, L_i = factor de corrección para la ETP en función del mes y la latitud, ETP = evapotranspiración potencial media anual en mm

Clase de pendiente	Pendiente (°)	Escorrentía (%)
1	0 a 3	0
2	3 a 12	5
3	12 a 20	10
4	20 a 35	15
5	>35	20

Tabla 6. Valores del % de escorrentía

Clase suelo IFN	Tipo de suelo	Capacidad de retención (mm)
1	Arenoso	75
2	Intermedio	100
3	Arcilloso	125
4	Roca	50

Tabla 7. Valores de la capacidad de retención de agua

de un sistema de información geográfica, obteniendo mapas de iso-valores para toda la provincia de Murcia. A partir de dichos mapas se extraen los valores correspondientes a las parcelas del Inventario Forestal Nacional, teniendo en cuenta sus coordenadas UTM y sus características de textura del suelo y pendiente en el caso de la IBL.

Ajuste de los modelos de crecimiento

Es importante tener en cuenta que el objetivo de este estudio no es la creación de un modelo de utilidad para la gestión, sino de uno que sirva de ayuda para determinar en qué medida está influyendo el cambio climático en el crecimiento de los rodales de *Pinus halepensis* y cuáles son los indicadores climáticos que mejor explican dicha influencia.

En consecuencia en una primera fase se ha construido un modelo sencillo que relaciona el crecimiento corriente del volumen con variables de masa y otras variables características de la estación pero que no varían sustancialmente con el paso del tiempo. Entre las primeras se han barajado variables de densidad como el número de pies por hectárea y el área basimétrica, de estructura como la altura dominante y la desviación típica de los diámetros, y de espesura como el índice de Hart-Becking (HART, 1928; BECKING, 1954) y el *Stand Density Index* (REINEKE, 1933). Entre las variables de estación se consideran altitud, pendiente y orientación, o combinaciones suyas (STAGE, 1973). No se utilizan los índices de calidad de estación clásicos debido a que en el Inventario Forestal Nacional no se dispone de datos de edad.

Se lleva a cabo un análisis de componentes principales para determinar la correlación entre los diferentes índices climáticos. Esto permite agruparlos de tal manera que la introducción en los modelos de crecimiento de dos índices del mismo grupo no se considera, ya que subiría de

forma considerable los valores de inflación de la varianza.

Así al primer modelo de crecimiento modelo se le han ido añadiendo índices climáticos, de uno en uno para evitar las fuertes correlaciones que existen entre ellos. La mejora del modelo se ha medido en términos del aumento en el coeficiente de determinación y de la disminución en el error medio cuadrático. De esta manera se seleccionan los índices que, en compañía con el resto de las variables, explican mejor el crecimiento del rodal, creando con ellos el modelo definitivo.

Finalmente, para cuantificar la influencia del cambio climático en el crecimiento del volumen de *Pinus halepensis* se proponen escenarios compatibles con lo que se ha observado en el periodo entre 1987 y 2010. Por simplicidad, y para evitar la creación de escenarios complejos (incluyendo temperaturas y precipitaciones mes a mes) que serían necesarios para alguno de los índices climáticos, se ha optado por construir un nuevo modelo que incluya como variables climáticas simplemente la temperatura media y la precipitación anual. Sobre dicho modelo se evalúa la variación en el crecimiento ante diferentes alternativas de cambio de temperatura y/o precipitación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En general se puede observar que las parcelas están situadas en masas bastante claras, con un número de pies por hectárea pequeño y áreas basimétricas bajas. Aun así se ha decidido utilizar todas las parcelas en los modelos de crecimiento incluyendo índices de espesura como variables independientes para mitigar los problemas causados por las características de estas parcelas. Se observa también que los crecimientos, como corresponde a esta especie y a masas con tan pocos pies por hectárea, son muy pequeños.

Si se comparan los valores de las variables al inicio del periodo de crecimiento se ve que del 2º al 3º inventario ha aumentado la altura dominante, el área basimétrica y el número de pies por hectárea. Sin embargo este aumento no se ve claramente reflejado en los crecimientos del volumen.

Los valores de los índices climáticos reflejan que las parcelas en su mayoría se encuentran en un ambiente más o menos Mediterráneo, aunque algunas de ellas se ubican en áreas de clima subhúmedo, o más raramente en clima árido. A simple vista se puede apreciar que entre los dos periodos de tiempo estudiados no ha habido grandes cambios en las temperaturas, y sin embargo ha habido una disminución de la precipitación de alrededor de un 5% que puede ser superior al 10% en algunos casos, lo cual se traduciría en una reducción de la reserva hídrica del suelo de hasta el 25% (GRACIA et al., 2002) con las consiguientes consecuencias en el crecimiento.

Un análisis de componentes principales, como el que se presenta en la Figura 2 señala que existen fuertes correlaciones entre distintos índices. Así pues se agrupan los índices en 4 clases: los basados en temperatura (termicidad, temperatura media, ETP y eficiencia térmica), los basados en precipitación (precipitación anual), los que combinan precipitación y temperatura (eficiencia pluviométrica, índice de Emberger, índice de Martone, índice global de

humedad e índice de aridez UNEP) y aquellos en los que intervienen además otras variables de estación como pendiente o tipo de suelo (IBL).

Como consecuencia de lo anterior hay que señalar que no es posible combinar dentro de un mismo modelo de crecimiento dos índices climáticos pertenecientes al mismo grupo.

Modelos de crecimiento

El primer modelo crecimiento planteado para el crecimiento en volumen de *Pinus halepensis* es un modelo lineal logarítmico en el que no se incluyen índices climáticos. En dicho modelo todos los coeficientes son significativos al 95% de probabilidad y el coeficiente de determinación múltiple ajustado es de 52,54%.

$$\ln(IV) = -6.7 + 0.6 \cdot \ln(N) + 1.5 \cdot \ln(H_{dom}) - 0.0015 \cdot SDI + 3 \cdot 10^{-7} Alt^2 + 0.0037 \cdot S \cdot \cos(W)$$

donde *IV* es el incremento de volumen en m³.(ha·año), *N* es el número de pies por hectárea, *H_{dom}* la altura dominante en m, *SDI* el índice de Reineke, *Alt* la altitud en metros cuadrados y *S* y *W* respectivamente la pendiente y la orientación en grados.

A este modelo sencillo se le han ido añadiendo uno a uno los diferentes índices climáticos. Analizando la mejora del modelo en términos de R² ajustado, error estándar del estimador y error medio absoluto. En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos.

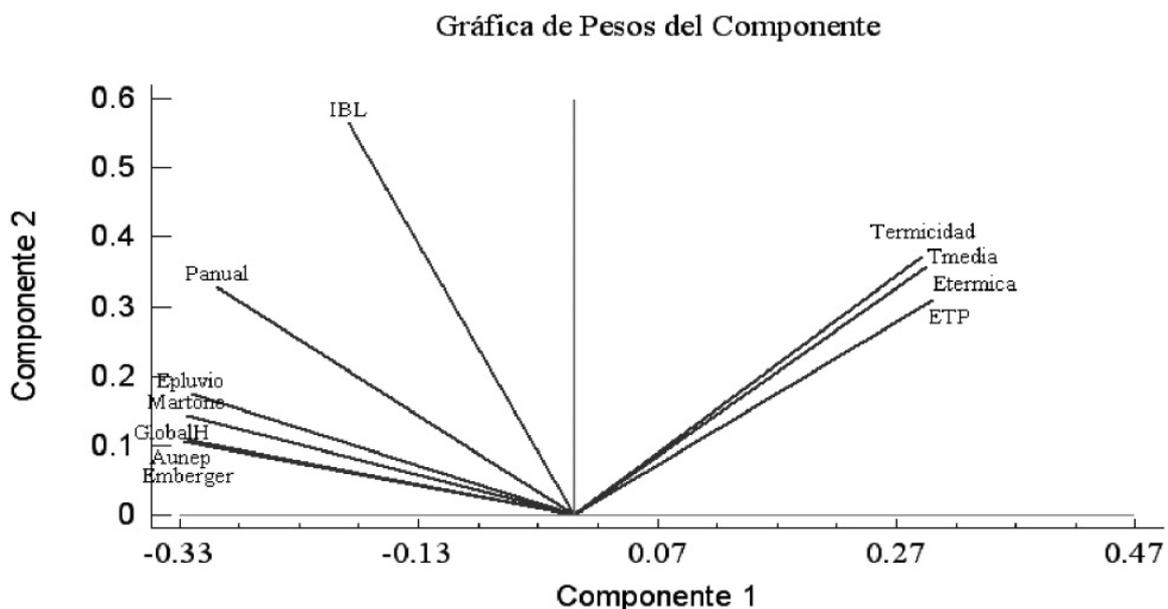


Figura 2. Análisis de componentes principales entre los índices climáticos utilizados

Grupo	Modelo	R ²	%Δ _{R2}	SE	%Δ _{SE}	MAE	%Δ _{MAE}
Sin índices	Sin índices	52,5370		0,7393		0,5561	
Temperatura	T media	53,7463	2,30	0,7307	-1,16	0,5500	-1,10
	Termicidad de Rivas-Martínez	53,5990	2,02	0,7318	-1,01	0,5508	-0,95
	Eficiencia térmica	53,7463	2,30	0,7307	-1,16	0,5500	-1,10
	ETP	54,5070	3,75	0,7247	-1,97	0,5453	-1,94
Precipitación	P anual	56,0774	6,74	0,712	-3,69	0,5354	-3,72
Temperatura y Precipitación	Eficacia pluviométrica	56,2769	7,12	0,7104	-3,91	0,5336	-4,05
	Aridez de Martonne	55,7798	6,17	0,7144	-3,37	0,5377	-3,31
	Índice global de humedad	55,9395	6,48	0,7132	-3,53	0,5368	-3,47
	Aridez UNEP	55,9395	6,48	0,7132	-3,53	0,5368	-3,47
	Emberger	56,2903	7,14	0,7103	-3,92	0,5347	-3,85
Otras	IBL	55,9732	6,54	0,7129	-3,57	0,5338	-4,01

Tabla 8. Comparación de modelos de crecimiento con inclusión de índices climáticos. R² – coeficiente de determinación ajustado, SE error estándar del estimador y MAE – error medio absoluto

Además se debe tener en cuenta que en todos los casos, excepto para la intensidad bioclimática libre, la inclusión de cualquier variable climática conlleva que en el modelo la altitud deje de ser significativa, mientras que la variable climática en sí lo es al 95% de probabilidad.

Se puede observar además que el crecimiento se explica mejor con la inclusión de cualquier variable climática. En general son los índices relacionados con la temperatura los que peores resultados ofrecen. Los índices que incluyen precipitación, o precipitación y temperatura conjuntamente, son los que hacen menores los residuos. Entre estos índices se pueden destacar la precipitación anual, la eficacia pluviométrica, el índice de Emberger o la intensidad bioclimática libre como los que mejor explican el crecimiento de la masa.

Parece por lo tanto interesante destacar la precipitación como el factor climático que más afecta al crecimiento, lo cual está en consonancia con otros autores que señalan la falta de humedad como factor negativo fundamental en el crecimiento de las masas de *Pinus halepensis* (CREUS NOVAU Y SAZ SÁNCHEZ, 2004; VICENTE-SERRANO et al., 2010). Esto no significa que la temperatura no afecte al crecimiento, sino que en el ámbito en el que se está trabajando la temperatura se mueve dentro de un rango tal que no constituye un factor limitante.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores se ha construido un modelo de crecimiento final.

En dicho modelo se combinan varios índices climáticos, buscando que la correlación entre variables no fuera excesiva. El mejor modelo obtenido es en el que intervienen el índice de Emberger y la intensidad bioclimática libre (IBL). Todos los coeficientes son significativos al 95% de probabilidad, el coeficiente de determinación ajustado es del 56,64% y el error absoluto medio MAE es 0,5314.

$$\ln(IV) = -7.45 + 0.59 \cdot \ln(N) + 1.45 \cdot \ln(H_{dom}) - 0.0013 \cdot SDI + 0.0048 \cdot S \cdot \cos(W) + 0.0136 \cdot Emberger + 0.083 \cdot IBL$$

Este modelo resulta sin embargo difícil de utilizar cuando el objetivo es plantear alternativas simples de cambio climático, ya que el cálculo de la intensidad bioclimática requiere temperaturas y precipitaciones mensuales.

Se opta en consecuencia por construir un modelo sencillo que incluya precipitación y temperatura media anual. El nuevo modelo tiene un coeficiente R² de 56,10%, como se puede ver bastante próximo al anterior y los residuos tienen un MAE de 0,5354:

$$\ln(IV) = -7.13 + 0.59 \cdot \ln(N) + 1.45 \cdot \ln(H_{dom}) - 0.0013 \cdot SDI + 0.0043 \cdot S \cdot \cos(W) + 0.0036 \cdot P_{Anual} - 0.028 \cdot T_{Media}$$

Es importante hacer notar que si bien todos los coeficientes son significativos al 95% el P-valor correspondiente a la temperatura es de 0,048, es decir próximo a la falta de significación. Se puede observar que este nuevo modelo se ha conseguido sin haber perdido apenas calidad en los ajustes. Puede resultar curioso observar como un aumento de la temperatura se

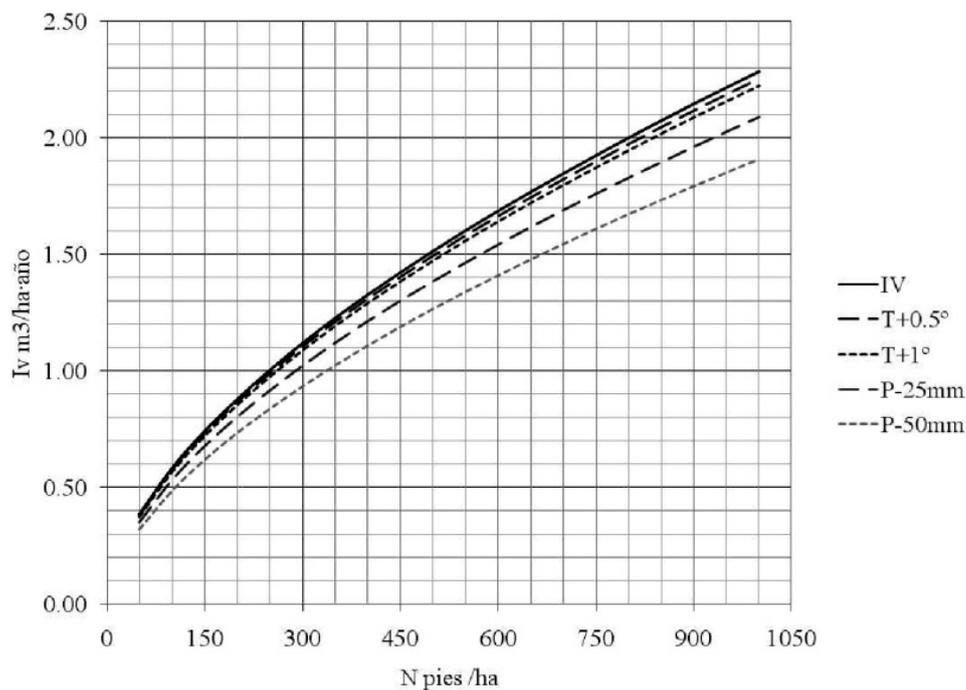


Figura 3. Crecimiento corriente del volumen frente al número de pies por hectárea para diferentes alternativas de precipitación y temperatura ($H_{dom}=10$ m, $SDI=200$ pies·ha⁻¹, Pendiente=15°, Orientación=180°, P anual=360mm y T media=15°)

traduce en un decremento del crecimiento. Sin embargo, tal y como se comentó en la introducción, las altas temperaturas son causa de una elevación de la evapotranspiración potencial con la consiguiente disminución de la reserva hídrica y el efecto negativo sobre el crecimiento (MORENO et al., 2005).

Sobre este último modelo se han planteado alternativas de aumento de temperatura de 0,5 ó 1° y disminución de la precipitación en 25 y 50 mm. Estos escenarios son bastante conservadores, si se tienen en cuenta que algunos autores prevén para la región mediterránea disminuciones en la precipitación de hasta un 25% y aumentos de temperatura de hasta 3° (GIORGI & LIONELLO, 2008). En la Figura 3 se presentan el incremento de volumen frente al número de pies por hectárea con las condiciones medias de las variables independientes que intervienen en el modelo, y con los escenarios descritos.

Se observa que los cambios en temperatura afectan mucho menos que los cambios de precipitación, así un aumento de medio grado supone una disminución del crecimiento corriente en 1,4%, mientras que una disminución de 25 mm hace que dicho crecimiento descienda un 8,5%,

y hasta un 16,4% cuando la precipitación disminuye 50 mm. Estos resultados contrastan en gran medida con estudios similares realizados en el norte de Europa, donde se predicen aumentos de crecimiento en similar proporción (BRICENO-ELIZONDO et al., 2006).

BIBLIOGRAFÍA

- ASSMANN, E.; 1961. *Waldetragskunde*. BLV.
- BECKING, J.; 1954. Einige Gesichtspunkte für die Durchführung von vergleichenden Durchfostungsversuchen in gleichaltrigen Beständen. *In: IUFRO Congress*: 580-582. Rome.
- BRICENO-ELIZONDO, E.; GARCIA-GONZALO, J.; PELTOLA, H.; MATALA, J. & KELLOMAKI, S.; 2006. Sensitivity of growth of Scots pine, Norway spruce and silver birch to climate change and forest management in boreal conditions. *Forest Ecol. Manage.* 232: 152-167.
- CREUS NOVAU, J. Y SAZ SÁNCHEZ, M.A.; 2004. La sequía como principal factor limitante del desarrollo de *Pinus halepensis* Mill. en el sector central del valle del Ebro. *In: U.d. Cantabria*

- (ed.), *El clima, entre el mar y la montaña: IV Congreso de la Asociación Española de Climatología*: 607-618. Santander.
- CZARNOWSKI, M.; 1964. *Productive capacity of locality as a function of soil and climate with particular reference to forest land*. Louisiana State University Press. Baton Rouge, La.
- DANTIN, J. Y REVENGA, A.; 1940. Una nueva relación climatológica: el índice termopluriométrico. In: *Avance del estudio de la aridez en España*. Asociación Española para el Progreso de las Ciencias. Zaragoza.
- EMBERGER, L.; 1932. Sur une formule climatique et ses applications en botanique. *La Météorologie* 92: 1-10.
- FONTES, L.; BONTEMPS, J.D.; BUGMANN, H.; VAN OIJEN, M.; GRACIA, C.; KRAMER, K.; LINDNER, M.; RÖTZER, T. & SKOVSGAARD, J.P.; 2010. Models for supporting forest management in a changing environment. *For. Systems*. 19: 8-29.
- GANDULLO, J. Y SERRADA, R.; 1977. *Mapa de productividad potencial forestal de la España peninsular*. Monografías INIA, Madrid.
- GARCÍA-ROBREDO, F. Y CONDÉS, S.; 2005. Aproximación al estudio del crecimiento de *Pinus halepensis* en la provincia de Murcia a partir de los datos de los Inventarios Forestales Nacionales y el cálculo de intensidades bioclimáticas. En: S.E.C.F.-Gobierno de Aragón (eds.), *Actas IV Congreso Forestal Español*. CD-Rom. Imprenta Repes S.C. Zaragoza.
- GIORGI, F. & LIONELLO, P.; 2008. Climate change projections for the Mediterranean region. *Global Planet Change* 63: 90-104.
- GRACIA, C.A.; SABATÉ, S. Y SÁNCHEZ, A.; 2002. El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas* 2:
- HART, H.; 1928. *Stamtal en dunning: Een oriënteerend onderzoek naar de beste plantwijdte en dunningswijze voor den djati*. In. Wageningen: Veenman.
- HÉBERT, J.; BOURLAND, N. & RONDEUX, J.; 2005. Estimation de l'accroissement et de la production forestière à l'aide de placettes permanentes concentriques. *Ann. For. Sci.* 62: 229-236.
- HOSSFELD, J.; 1822. *Mathematik für Forstmänner, Ökonomen und Cameralisten*. Gotha 4: 310.
- IPPC; 2007. *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007*. Cambridge University Press. Cambridge.
- MANOSALVA, L.; 1995. *Antecedentes dendrométricos básicos de un rodal de Lenga (Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl.) Krasser), en el sector Cerro La Virgen, XI Región*. Tesis Ingeniero Forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- MARTONNE, E.; 1926. Une Nouvelle Fonction Climatologique: L'Indice d'Aridité (A New Climatological Function: The Aridity Index). *La Météorologie* 2: 449-458.
- MIDDLETON, N.J. & THOMAS, D.S.G.; 1992. *World Atlas of Desertification: United Nations Environment Programme*. Edward Arnold. London.
- MIMAM; 2002. *Tercer Inventario Forestal Nacional 1997 - 2006. Región de Murcia*. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MONTERO DE BURGOS, J. Y GONZÁLEZ-REBOLLAR, J.; 1974. *Diagramas bioclimáticos*. ICONA. Madrid.
- MORENO, J.M.; MARTÍNEZ, C.; MORA, J.; PICATOSTE, J.; FERNÁNDEZ, F. Y CRUZ, A.; 2005. *Principales conclusiones de la evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático*. Madrid.
- PATERSON, S.S.; 1956. *The forest area of the world and its potential productivity*. Göteborg University. Göteborg.
- RATHGEBER, C.; NICAULT, A.; GUIOT, J.; KELLER, T.; GUIBAL, F. & ROCHE, P.; 2000. Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO₂ increase using a statistical model. *Global Planet Change* 26: 405-421.
- REINEKE, L.; 1933. Perfecting a stand-density index for even-aged forests. *J. Agric. Res.* 46: 627-638.
- RIVAS-MARTÍNEZ, S.; 1983. Nuevo índice de termicidad para la región mediterránea. *Avances sobre la investigación en bioclimatología*: 377-380. Madrid.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C.A.; PLA, E.; SÁNCHEZ, A. Y VAYREDA, J.; 2004. Aplicación del modelo GOTILWA+ para el análisis de los efectos

- del Cambio Climático y la Gestión Forestal en el balance de carbono y agua en los bosques. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*: 18: 13-20.
- SABATÉ, S.; GRACIA, C.A. & SÁNCHEZ, A.; 2002. Likely effects of climate change on growth of *Quercus ilex*, *Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris* and *Fagus sylvatica* forests in the Mediterranean region. *Forest Ecol. Manage.* 162: 23-37.
- STAGE, A.R.; 1973. *Prognosis model for stand development*. Intermountain Forest & Range Experiment Station. Forest Service. US Dept. of Agriculture.
- THORNTHWAITE, C.W.; 1931. The climates of North America: according to a new classification. *Geographical review* 21: 633-655.
- THORNTHWAITE, C.W.; 1948. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review* 38: 55-94.
- VICENTE-SERRANO, S.M.; LASANTA, T. Y GRACIA, C.; 2010. Aridification determines changes in forest growth in *Pinus halepensis* forests under semiarid Mediterranean climate conditions. *Agric. Forest Meteorol.* 150: 614-628.