



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1475

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Nueva aproximación del incremento en volumen en el IFN

AGUIRRE, A. (1,2), CAÑELLAS, I. (3), ADAME, P. (3), MORENO-FERNÁNDEZ, D. (3), CONDÉS, S. (1,2), ALBERDI, I. (3),

(1) Departamento de Sistemas y Recursos Naturales. E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

(2) Centro para la Conservación de la Biodiversidad y el Desarrollo Sostenible (CBDS), E.T.S.I. Montes, Forestal y del Medio Natural. Universidad Politécnica de Madrid.

(3) Instituto de Ciencias Forestales (INIA-CSIC).

Resumen

Los Inventarios Forestales Nacionales (IFNs), aunque han ido evolucionando en sus objetivos, siguen considerando como primordial el cálculo de las existencias, así como de los crecimientos de las masas forestales. El principal objetivo de este trabajo es mejorar la estimación del incremento anual de volumen para las especies arbóreas en España. Para ello, se han desarrollado modelos de crecimiento, en diámetro y altura, para calcular el crecimiento en volumen, considerando los datos de los dos últimos ciclos disponibles del IFN español. La validación de los resultados demuestra que la inclusión de variables como el área basimétrica de la parcela, el área basimétrica de los pies de la parcela con diámetro mayor al pie considerado y la vitalidad del árbol, influyen en el crecimiento del mismo. Al validar la metodología, se ha observado una mayor precisión en el cálculo de los volúmenes, en comparación con la metodología utilizada hasta ahora.

Palabras clave

Crecimiento, vitalidad

1. Introducción

Entre los numerosos objetivos que tienen los Inventarios Forestales Nacionales (IFNs) actualmente, uno de los más esenciales es el cálculo de existencias, es decir, la estimación tanto del volumen como de los crecimientos que presentan las masas forestales (ALBERDI et al., 2017). Tanto es así, que ésta es una de las variables a las que se deben dar respuesta de manera periódica, tanto a escala nacional, como internacional (GSCHWANTNER et al., 2024).

Actualmente, en el caso del IFN español (IFNe), se dispone de unas ecuaciones (MILLÁN et al., 1993) que permiten conocer el volumen con corteza de cualquier especie arbórea, en función de la provincia, especie, forma, diámetro y altura del árbol. Estas ecuaciones son ampliamente utilizadas proporcionando resultados satisfactorios (ESTEBAN et al., 2019). Sin embargo, cuando es necesario calcular el crecimiento de aquellos pies extraídos entre dos ciclos del IFNe, o se quiere calcular el volumen o crecimiento en cualquier momento entre ciclos del IFNe, se recurre a las ecuaciones de incremento anual de volumen (*iavc*) publicadas en el



IFNe (MILLÁN et al., 1993). Estas ecuaciones, al igual que las de volumen, dependen de la provincia, especie y forma del árbol, así como del volumen estimado en el ciclo inicial y, en menor medida, del diámetro y altura iniciales del árbol. Sin embargo, estas ecuaciones no consideran variables que afectan al crecimiento, como variables de masa (ZHAO et al., 2024).

Además, el IFNe recoge datos de numerosas variables de gran interés (Alberdi et al., 2017), como la vitalidad del árbol. Esta variable, a pesar de haber sido demostrada su relación con el crecimiento del árbol (DOBBERTIN, 2005; ROHNER et al., 2021) no está incluida en las ecuaciones *iavc*.

Así, teniendo en cuenta las posibles limitaciones de las ecuaciones *iavc* y los buenos resultados de las ecuaciones de volumen disponibles en el IFNe, se propone el desarrollo de unas ecuaciones de crecimiento en diámetro y altura, lo que podría facilitar la estimación del volumen de los árboles en cualquier momento.

2. Objetivos

El principal objetivo de este trabajo es desarrollar una nueva metodología para el cálculo del incremento en volumen de cualquier especie arbórea presente en el IFNe. Como objetivos secundarios, se plantean los siguientes: i) Desarrollo de modelos de crecimiento en diámetro y altura válidos para cualquier especie arbórea forestal presente en el IFNe; ii) Evaluación tanto de los modelos de crecimiento como de la metodología propuesta, comparando los resultados obtenidos con los derivados de la metodología tradicional basada en las ecuaciones de *iavc* del IFNe.

3. Metodología

Datos

El IFNe consta de tres ciclos comparables (IFN2, IFN3 e IFN4) donde, con una periodicidad aproximadamente decenal y con la provincia como unidad de diseño del muestreo, se levantan parcelas circulares permanentes distribuidas sistemáticamente en una malla cuadrada de 1 x 1 km sobre la superficie forestal española. Estas parcelas están compuestas por cuatro subparcelas concéntricas de radio 5, 10, 15 y 25 m, donde en cada una de ellas se miden distintas variables de todos los árboles cuyo diámetro sea mayor de 7,5, 12,5, 22,5 y 42,5 cm, respectivamente. Entre dichas variables se mide el diámetro, la altura, la forma y vitalidad de los árboles (Tabla 1).

Tabla 1: Descripción de los valores que puede tomar el factor de la vitalidad de los árboles

q	Descripción
1	Árbol sano, vigoroso, óptimamente conformado, sin señales de vejez, capaz de proporcionar muchos y valiosos productos, no dominado y con excelentes perspectivas de futuro
2	Árbol sano, vigoroso, no dominado, sin señales de vejez, con algún defecto de conformación y capaz de proporcionar bastantes productos valiosos.
3	Árbol no totalmente sano y vigoroso, o algo viejo o dominado, con bastantes defectos de conformación, pero capaz de proporcionar algunos productos valiosos.
4	Árbol enfermo y débil o viejo, con muchos defectos de conformación, solamente capaz de proporcionar productos de valor secundario.
5	Árbol muy enfermo, débil o viejo, con pésima conformación y aprovechamientos escasos y de poco valor.
6	Árbol muerto, pero sin pudrir aún y capaz todavía de proporcionar algún bien aprovechable.

q, es el código de la vitalidad del árbol

Para el desarrollo de los modelos, y con el fin de considerar la superficie forestal completa de España, se han utilizado parcelas remedidas en los dos últimos ciclos del IFNe disponibles, según la provincia, es decir IFN3 y IFN4 o IFN2 y IFN3. En estas parcelas, se han utilizado los pies supervivientes entre ambos ciclos, siempre y cuando la parcela no presentara una pérdida superior al 5% en área basimétrica (G) con la finalidad de evitar la influencia que puedan tener los tratamientos selvícolas o perturbaciones importantes sobre el crecimiento.

Además, para analizar por separado aquellas especies tradicionalmente más productivas en España, se han considerado de manera independiente las especies *Pinus pinaster* (con 25.229 pies), *Pinus radiata* (6.401 pies) y todas las especies del género *Eucalyptus* (8.420 pies). El resto de las especies se han analizado de manera conjunta, agrupadas como coníferas y frondosas, con 152.959 y 145.136 pies, respectivamente.

Teniendo en cuenta la importancia de hacer una validación, tanto de los modelos desarrollados como de la metodología propuesta, se han utilizado como datos independientes aquellos pies supervivientes entre los ciclos IFN2 e IFN3, siempre y cuando estos ciclos no se hayan utilizado para realizar los modelos. De esta manera, aunque se valida con menos provincias, nos aseguramos de no utilizar los mismos datos para los modelos y para la validación.

Para considerar la espesura de la masa, se ha tenido en cuenta G, y para considerar la competencia de cada pie, se ha calculado el área basimétrica de los árboles de la parcela cuyo diámetro fuera superior al diámetro del pie considerado (BAL). También se ha considerado la hipótesis de que la vitalidad del árbol influye en su crecimiento, por lo que se ha incluido esta variable como factor.

Modelos de crecimiento

Para desarrollar los modelos de crecimiento, tanto de diámetro como de altura, se ha ajustado en primer lugar un modelo básico (Ec.1) siguiendo la estructura de SCHELHAAS et al. (2018).

$$ix_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 x_i \log(x_i) + \varepsilon$$

Donde ix es el crecimiento anual del diámetro, en mm/año, o de la altura, en m/año; por lo que x es el diámetro o la altura, en mm o m, respectivamente. Además, dada la estructura de los datos, donde varios árboles se encuentran en la misma parcela, y varias parcelas se encuentran en la misma provincia, se ha utilizado un modelo lineal mixto utilizando la función “lme” del paquete de R “nlme” (PINHEIRO et al., 2017), con x como efecto aleatorio en la ordenada en el origen, y la parcela y provincia como grupo de estructura en la pendiente.

A este modelo básico, se le han añadido las variables de espesura (G , en m²/ha), competencia (BAL , en m²/ha) y vitalidad del pie (q , según la Tabla 1), resultando el modelo de la Ec.2.

$$ix_i = \alpha_0 + \alpha_1 x_i + \alpha_2 x_i \log(x_i) + \alpha_3 G_k + \alpha_4 BAL_i + \alpha_5 q_i + \varepsilon$$

Donde los subíndices i y k representan a los valores del árbol y parcela, respectivamente. Estas variables añadidas al modelo básico, sólo se incluyen en el modelo si tienen sentido biológico, y si producen una mejora significativa en el modelo, evaluado mediante un análisis ANOVA. Para comparar los modelos también se han considerado el Criterio de Información de Akaike (AIC), y la proporción de la varianza explicada por los factores fijos (R^2 marginal), y por los valores fijos y aleatorios (R^2 condicional) (NAKAGAWA & SCHIELZETH, 2013).

Validación

Para el proceso de validación se utilizaron los ciclos del IFNe previos a los utilizados para el desarrollo de los modelos, es decir, IFN2 e IFN3 siempre que dichos ciclos no hubieran sido usados en el modelado. Si bien esta decisión limita las provincias disponibles para la validación, garantiza la independencia de los datos y permite aprovechar una mayor proporción de los factores aleatorios incluidos en los modelos mixtos desarrollados, asegurando una mejor aplicabilidad en el futuro.

Se llevaron a cabo dos tipos de validación. En primer lugar, se realiza la validación de los modelos desarrollados, donde se calculan los errores cometidos al estimar el diámetro y la altura (d_{est} y h_{est}), y compararlos con los valores observados (d_{obs} y h_{obs}) al final del ciclo.



En segundo lugar, una vez validados los modelos, es necesario comprobar si la metodología propuesta mejora la estimación del volumen comparándola con la utilizada hasta ahora. Es decir, se calcula el volumen observado que depende del diámetro y altura observados al final del ciclo (

$$v_{obs} = f(d_{obs}, h_{obs})$$

). Este valor se compara con el estimado al aplicar las ecuaciones

iavc

(

$$v_{est_iavc}$$

), que dependen de los valores del árbol en el ciclo inicial del IFNe, y con el valor estimado al utilizar los modelos propuestos en este trabajo (

$$v_{est} = f(d_{est}, h_{est})$$

), es decir, aplicando las ecuaciones de volumen, pero utilizando los valores estimados de diámetro y altura.

Para todo este proceso de validación, se han calculado los siguientes errores:

Error porcentual medio	$MPE = \sum e_{ij} / n$	(Ec.3)
Error porcentual absoluto medio	$MAPE = \sum e_{ij} / n$	(Ec.4)
Porcentaje de la raíz cuadrada del error cuadrático medio	$RMSP = \sqrt{\sum e_{ij}^2 / n}$	(Ec.5)

Donde ; y_{obs} es la variable observada (d_{obs} , h_{obs} o v_{obs} , en mm, m o dm^3 respectivamente) al final del ciclo para cada pie j ; y' es la variable estimada (d_{est} , h_{est} , v_{est_iavc} o v_{est} , en mm, m o dm^3 , respectivamente) para cada pie j .

4. Resultados

Modelos de crecimiento

Los resultados de los modelos de incremento en diámetro y altura se muestran en las Tablas 2 y 3, respectivamente, donde se observa una estructura adecuada tanto en el crecimiento en diámetro como en altura. En general, en términos de R^2 , se observa un peor ajuste en el grupo de las frondosas, mostrando un R^2 condicional de 0,48 para *id* y de 0,51 para *ih*, frente a 0,71 y 0,64 respectivamente para el grupo de las coníferas, en concreto, *P. pinaster* es la especie que presenta un mejor ajuste del R^2 condicional, con valores de 0,83 y 0,75 para *id* e *ih*, respectivamente.

La espesura de la masa, representada por *G* (Tabla 2), sólo se ha incorporado en el modelo de *id* para el grupo de coníferas, *P. pinaster* y *P. radiata*, mostrando un



efecto negativo. Sin embargo, el *BAL* es una variable esencial tanto para coníferas como para frondosas, tanto para *id* como para *ih* (Tabla 2 y 3). En todos los casos, los resultados revelan un efecto negativo del *BAL*, es decir, los pies muestran un menor crecimiento cuanto mayor es la competencia que sufren (Figura 1).

De especial interés es la vitalidad del pie, mostrando para todas las especies, y grupos de especies, un efecto significativo en el crecimiento, de manera que cuanto peor es la vitalidad del árbol, menor es su crecimiento. Sin embargo, se observa que la vitalidad clasificada como 1 no siempre tiene un efecto significativo en el crecimiento. Este efecto de la vitalidad del árbol se observa en la Figura 1, donde para todas las especies y grupos de especies, una vitalidad del árbol peor (líneas discontinuas) presentan un menor crecimiento, tanto en diámetro como en altura, que los pies con mejor vitalidad (líneas continuas).

Tabla 2: Resultados de los modelos de incremento en diámetro (*id*) según el modelo básico (Ec.1) y el modelo final (Ec.2).



Modelo		χ^2	d	d:log(d)	G	BAL	q1	q3	q4	q5	R ² m	R ² c	AIC
Coníferas	Básico	1,318	0,038	-0,005							0,013	0,712	556551
		0,00	0,00	0,00									
	Final	2,951	0,026	-0,004	-0,034	-0,037	0,270	-0,513	-1,069	-1,404	0,106	0,714	551366
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00				
<i>P. pinaster</i>	Básico	2,604	0,050	-0,007							0,005	0,821	107412
		0,00	0,00	0,00									
	Final	6,071	0,032	-0,005	-0,105	-0,056	0,511	-0,794	-1,457	-3,459	0,174	0,825	106245
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,17	0,00	0,00	0,00				
<i>P. radiata</i>	Básico	-2,194	0,164	-0,022							0,088	0,823	33054
		0,01	0,00	0,00									
	Final	7,258	0,112	-0,016	-0,146	-0,102	0,460	-1,051	-2,532	-3,490	0,293	0,729	32621
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	0,00	0,00	0,00				
<i>Eucalyptus sp.</i>	Básico	-0,268	0,112	-0,014							0,162	0,803	43429
		0,49	0,00	0,00									
	Final	4,948	0,054	-0,007		-0,183	0,297	-0,735	-0,677	-1,789	0,199	0,774	43033
	0,00	0,00	0,00		0,00	0,46	0,00	0,03	0,00				
Fronosas	Básico	0,503	0,033	-0,004							0,035	0,475	614268
		0,00	0,00	0,00									
	Final	1,084	0,029	-0,004		-0,017	0,281	-0,446	-0,752	-1,239	0,043	0,479	612334
	0,00	0,00	0,00		0,04	0,00	0,00	0,00	0,00				


 α_0

, es la ordenada en el origen del modelo (Ec.1 o Ec.2);

 d

, es la altura inicial del pie;

 BAL

, es el área basimétrica de los pies con mayor diámetro al estudiado;

 $q1-q5$

, son las calidades de los pies; R

 2
 m y R
 2
 c , son el R
 2

marginal y condicional, respectivamente; y AIC es el Criterio de Información de Akaike.

Tabla 3: Resultados de los modelos de incremento en altura (ih) según el modelo básico (Ec.1) y el modelo final (Ec.2).



Modelo		λ	h	h·log(h)	BAL	q1	q3	q4	q5	R ² m	R ² c	AIC
Coníferas	Básico	0,053	0,036	-0,012						0,066	0,619	-264746
		0,00	0,00	0,00								
	Final	0,095	0,032	-0,012	-0,001	0,017	-0,032	-0,065	-0,089	0,110	0,647	-267482
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,00				
<i>P. pinaster</i>	Básico	0,268	-0,007							0,029	0,738	-34834
		0,00	0,00									
	Final	0,315	-0,010		-0,002	0,012	-0,038	-0,079	-0,162	0,062	0,749	-35301
	0,00	0,00		0,00	0,60	0,00	0,00	0,00				
<i>P. radiata</i>	Básico	0,243	0,107	-0,031						0,067	0,484	6661
		0,02	0,00	0,00								
	Final	0,397	0,115	-0,034	-0,008	-0,062	-0,080	-0,154	-0,230	0,156	0,526	6434
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	0,04				
<i>Eucalyptus sp.</i>	Básico	0,294	0,050	-0,013						0,004	0,568	6640
		0,00	0,00	0,00								
	Final	0,736	0,049	-0,017	-0,025	-0,087	-0,155	-0,216	-0,128	0,291	0,750	5205
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,04	0,00	0,03	0,03				
Frondosas	Básico	-0,047	0,050	-0,016						0,050	0,470	-129728
		0,00	0,00	0,00								
	Final	-0,025	0,053	-0,017	-0,001	0,012	-0,027	-0,051	-0,065	0,083	0,512	-131026
	0,00	0,00	0,00	0,00	0,26	0,00	0,00	0,00				



α_0

, es la ordenada en el origen del modelo (Ec.1 o Ec.2);

h

, es la altura inicial del pie;

BAL

, es el área basimétrica de los pies con mayor diámetro al estudiado;

$q1-q5$

, son las calidades de los pies; R

²

m y R

²

c , son el R

²

marginal y condicional, respectivamente; y AIC es el Criterio de Información de Akaike.

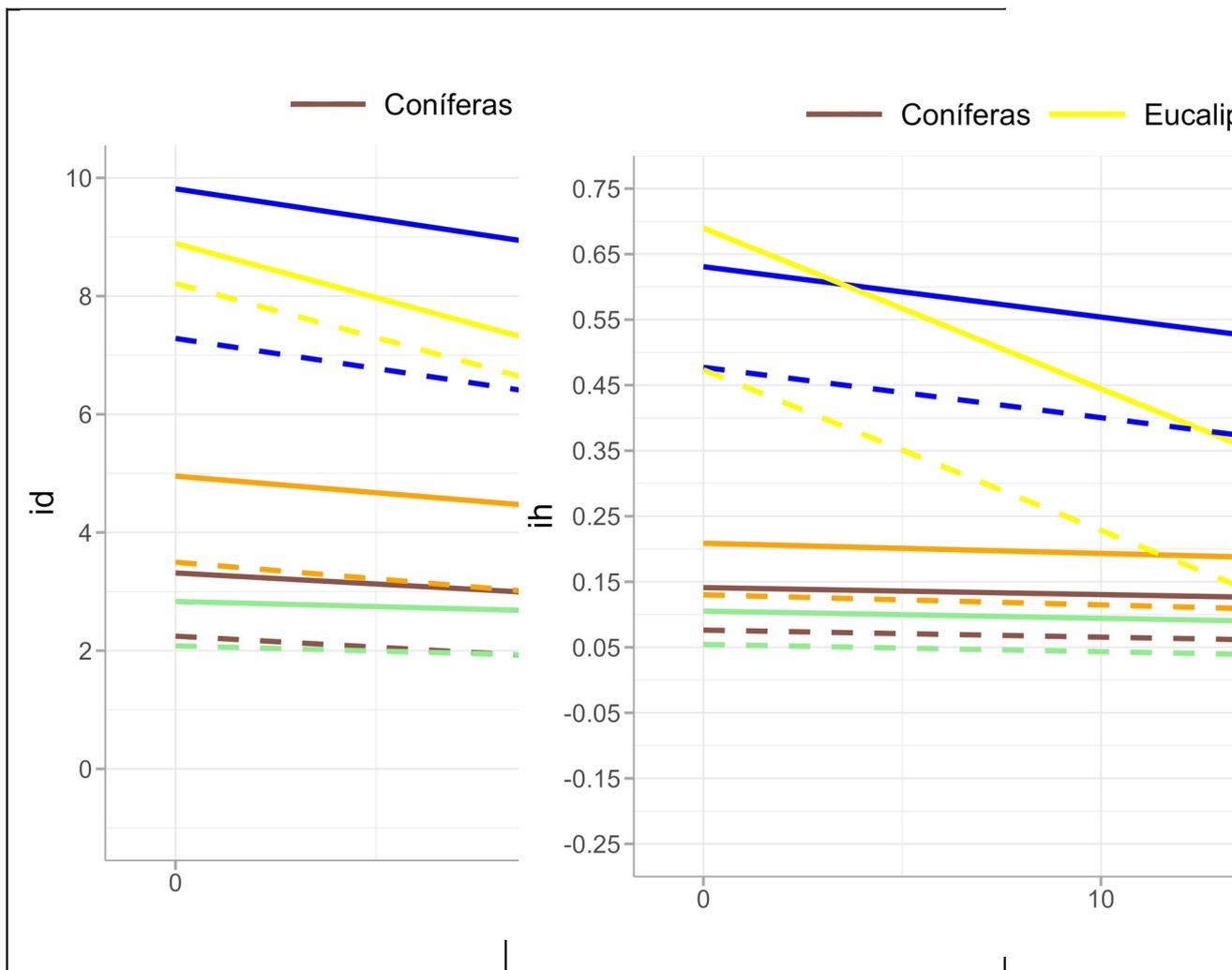


Figura 1: Crecimiento en diámetro, id , en mm/año (arriba) y altura, ih , en m/año (abajo) para las distintas especies y grupos de especies modelizadas según el valor

del BAL (área basimétrica de los pies de la parcela cuyo diámetro sea superior al diámetro considerado, en m^2/ha). Las líneas continuas indican una vitalidad 2 del árbol, mientras que las discontinuas indican una vitalidad clasificada como 4.

Validación

En la Tabla 4 se muestra la validación de los modelos, es decir, los errores cometidos al comparar los valores de diámetro y altura observados con los estimados con los modelos desarrollados. Estos resultados muestran errores menores para los modelos que estiman el diámetro.

Tabla 4: Errores en %, según las Ecs.3-5 obtenidos por los modelos finales (Ec.2), tanto para coníferas como para frondosas, y para el incremento de diámetro (id) como para el incremento de altura (ih).

Sp	Modelo	MPE	MAPE	RMSPE
Coníferas	id	2,14	5,60	7,87
	ih	2,53	9,72	13,40
<i>P. pinaster</i>	id	1,32	6,02	8,34
	ih	3,39	10,33	14,16
<i>P. radiata</i>	id	2,26	6,58	9,44
	ih	-0,50	11,20	15,71
Eucaliptos	id	6,20	12,64	16,54
	ih	-5,70	16,20	22,24
Frondosas	id	2,03	5,56	8,22
	ih	2,27	12,33	19,39

MPE, error porcentual medio; MAPE, error porcentual absoluto medio; y RMSPE, raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Una vez analizados los modelos de incremento de diámetro y altura, se comparan los errores cometidos al estimar el incremento en volumen con la metodología propuesta (v_{est}) con los cometidos con el uso de las ecuaciones utilizadas hasta ahora (v_{est_iavc}).

Los errores obtenidos con ambas metodologías se presentan en la Tabla 5, donde se observan errores menores al utilizar la metodología propuesta en comparación con las ecuaciones que se utilizan ahora, exceptuando el MPE para el *P. pinaster*, donde es ligeramente superior.

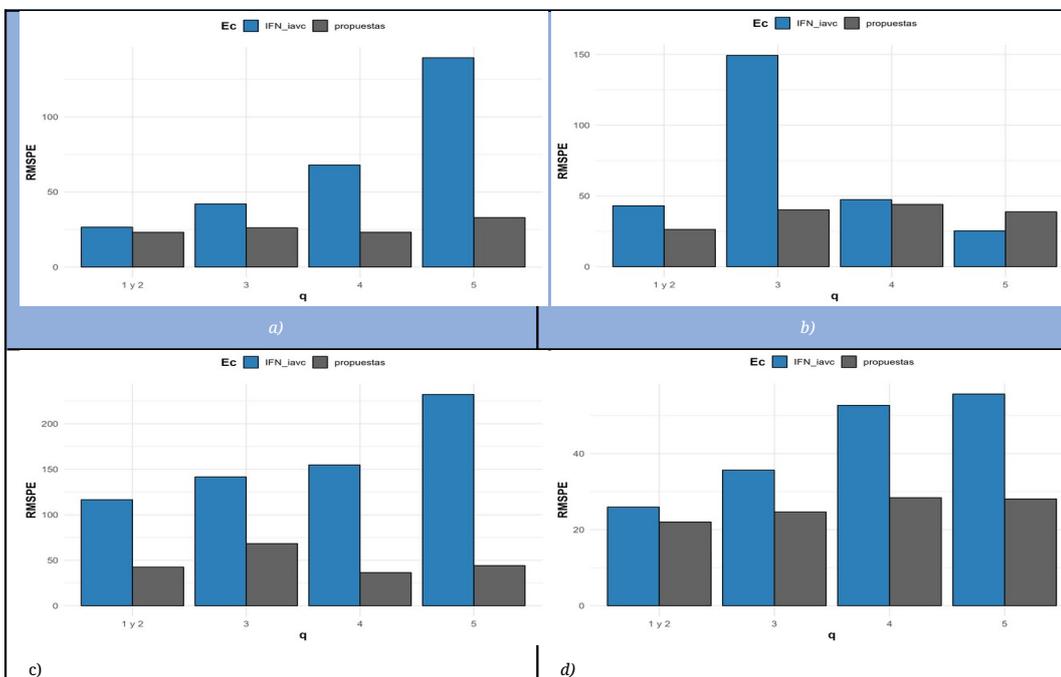
Tabla 5: Errores en %, según las Ecs.3-5 obtenidos al estimar el incremento en volumen con la metodología propuesta (v_{est}) y por la metodología utilizada hasta ahora (v_{est_iavc}).



Sp	Modelo	MPE	MAPE	RMSPE
Coníferas	V _{est}	6,78	16,14	22,69
	V _{est_iavc}	-5,26	19,85	28,88
P. pinaster	V _{est}	6,02	17,27	23,56
	V _{est_iavc}	-4,43	20,93	30,45
P. radiata	V _{est}	2,26	18,48	27,05
	V _{est_iavc}	-6,74	25,13	50,61
Eucaliptos	V _{est}	5,79	31,31	46,01
	V _{est_iavc}	-38,19	58,40	120,48
Frondosas	V _{est}	2,69	16,79	41,27
	V _{est_iavc}	-7,67	19,60	44,89

MPE, error porcentual medio; MAPE, error porcentual absoluto medio; y RMSPE, porcentaje de la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

En la Figura 2, se observa que la mejoría de la metodología propuesta, en términos de RMSPE, es mayor según la vitalidad del pie es peor. En esta figura se han juntado las vitalidades uno y dos, ya que es frecuente que no existan diferencias significativas entre estos dos factores (Tabla 2 y 3). Especialmente notable es la reducción de los errores cometidos en las especies *P. radiata*, *P. pinaster* y *Eucaliptus* sp., donde para algunas de las vitalidades la metodología actual supone un RMSPE superior al 100%.



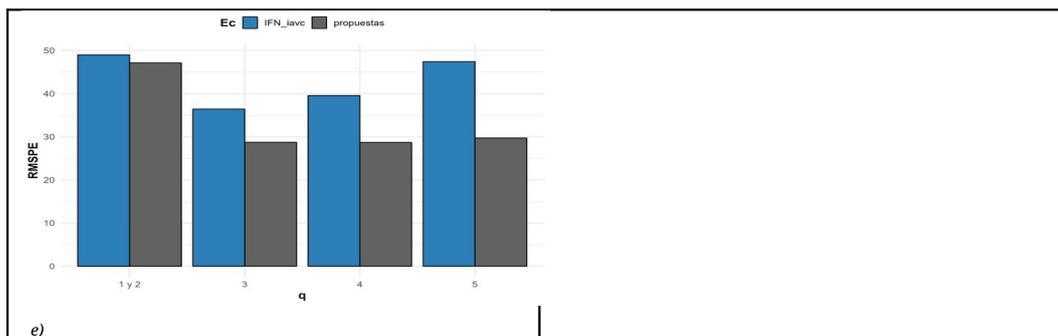


Figura 2: Comparación del error cuadrático medio (RMSPE), en %, para cada especie y grupo de especies analizados según la vitalidad del pie (q_1 - q_5). En azul, los errores obtenidos al utilizar las ecuaciones iavc del IFNe, en gris, los errores obtenidos al utilizar la metodología propuesta en este trabajo. a) para el *P. pinaster*; b) *P. radiata*, c) *Eucaliptus sp.*, d) grupo de coníferas, y e) grupo de frondosas.

5. Discusión

En este estudio se propone una metodología alternativa para estimar el incremento anual del volumen utilizando los datos del IFNe. Los resultados obtenidos confirman que la consideración de la competencia modifica el crecimiento de los pies (FORD et al., 2017). Además, la inclusión de la vitalidad del árbol, ofrece una mejora evidente tanto en los modelos de incremento en diámetro y altura, como en la reducción de los errores al calcular el incremento anual de volumen.

La validación de los modelos de crecimiento ofrece unos resultados satisfactorios, con unos valores de RMSPE entre 7,9 y 14,5 % para los modelos *id*, y entre 13,4 y 22,2% para *ih*. Aunque con una metodología diferente, TRASOBARES et al. (2022) obtienen un RMSPE entre 45 y 85% para *id*, y entre 55 y 100% para *ih*, también a escala nacional.

En cuanto a los errores obtenidos al estimar el incremento en volumen comparando ambas metodologías, se hace notable la reducción de los mismos según la vitalidad del árbol. En este sentido, parece que no hay diferencias significativas entre las vitalidades uno y dos, lo que posiblemente sea debido a que la diferenciación entre estos dos factores no es sencilla de realizar en campo.

Aunque la metodología propuesta mejora las estimaciones de incremento de volumen, esta sigue sin considerar variables referentes a la localización de la parcela. Esto está considerado de alguna manera, ya que los modelos realizados son modelos mixtos con la provincia y parcela como efecto aleatorio. Sin embargo, la inclusión de variables que reflejen características físicas de la parcela, como la calidad de estación, podría influir también de manera notable en el crecimiento de los pies. No obstante, se hace complicado considerar estas variables cuando se agrupan especies, puesto que la calidad de estación es diferente según la especie considerada (AGUIRRE et al., 2022).



6. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas de este trabajo son, en primer lugar, la importancia de la consideración de variables auxiliares para la estimación del crecimiento del árbol, tales como la espesura de la masa (G), la competencia del pie (BAL), así como la vitalidad del mismo (q).

Además, se ha demostrado que la metodología propuesta mejora la estimación de los crecimientos, a nivel de árbol individual, en comparación con la metodología utilizada hasta ahora, es decir, con el uso de las ecuaciones de incremento anual de volumen con corteza ($iavc$) del IFNe.

Por otro lado, además de la reducción en los errores cometidos a la hora de estimar los crecimientos, los modelos propuestos permiten la estimación del diámetro y la altura de cualquier especie forestal, en cualquier momento entre ciclos del IFNe. Esto tiene una aplicación directa para el cálculo de la biomasa, para lo que suelen ser necesarios los valores de diámetro y altura. Lo que permite, de manera directa, el cálculo de las estimaciones de carbono en cualquier momento en el que se necesite, independientemente de si se dispone de información de campo o no.

Por último, cuando se estiman los crecimientos y las existencias siguiendo el criterio armonizado, es necesario incluir el crecimiento y volumen que aportan las leñas. Hasta ahora, utilizando las ecuaciones $iavc$, esto no es posible, ya que únicamente reflejan el crecimiento del volumen maderable. Sin embargo, y dado que las ecuaciones del volumen de leñas dependen del diámetro y la altura, es posible su estimación tanto en cualquier momento entre ciclos del IFNe, como de aquellos pies extraídos entre ciclos, de los que no se conocen su diámetro y altura en el ciclo final.

Por tanto, se considera que el uso de esta metodología propuesta mejora tanto la estimación de los crecimientos como de las existencias, aumentando la precisión de las estimaciones.

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto MITECO2023-AF: “Fundamentos Científicos de la Información Forestal Basados en el Inventario Forestal Nacional”.

8. Bibliografía

AGUIRRE, A., MORENO-FERNÁNDEZ, D., ALBERDI, I., HERNÁNDEZ, L., ADAME, P.,



CAÑELLAS, I., & MONTES, F. 2022. Mapping forest site quality at national level. *For. Ecol. Manag.*, 508.

ALBERDI, I., CAÑELLAS, I., & BOMBÍN, R. V. 2017. The Spanish National Forest Inventory: history, development, challenges and perspectives. *PFB*. 91. 361-368.

DOBBERTIN, M. 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *Eur. J. For. Res.*, 124, 319–333.

ESTEBAN, J., MCROBERTS, R. E., FERNÁNDEZ-LANDA, A., TOMÉ, J. L., & NÆSSET, E. 2019. Estimating forest volume and biomass and their changes using random forests and remotely sensed data. *Remote Sens.*, 11, 1944.

FORD, K. R., BRECKHEIMER, I. K., FRANKLIN, J. F., FREUND, J. A., KROISS, S. J., LARSON, A. J., THEOBALD, E. J., & HILLERISLAMBERS, J. 2017. Competition alters tree growth responses to climate at individual and stand scales. *Can. J. For. Res.*, 47. 53–62.

GSCHWANTNER, T., RIEDEL, T., HENNING, L., ADAME, P., ADOLT, R., AGUIRRE, A., ALBERDI, I., AVITABILE, V., CAÑELLAS, I., & DI COSMO, L. 2024. Improved large-area forest increment information in Europe through harmonisation of National Forest Inventories. *For. Ecol. Manag.*, 562.

MILLÁN, J., LAZARO, P., & IG DONCEL. 1993. Ecuaciones alométricas de tres variables: estimación del volumen, crecimiento y porcentaje de corteza de las principales especies maderables españolas. *For. Syst.* 2. 211-228.

NAKAGAWA, S., & SCHIELZETH, H. 2013. A general and simple method for obtaining R² from generalized linear mixed-effects models. *MEE*, 4, 133–142.

PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D., HEISTERKAMP, S., Van WILLIGEN, B., & MAINTAINER, R. 2017. Package ‘nlme.’ Linear and Nonlinear Mixed Effects Models, Version, 3(1), 274.

ROHNER, B., KUMAR, S., LIECHTI, K., GESSLER, A., & FERRETTI, M. 2021. Tree vitality indicators revealed a rapid response of beech forests to the 2018 drought. *Ecol. Indic.*, 120, 106903.

SCHELHAAS, M. J., HENGEVELD, G. M., HEIDEMA, N., THÜRIG, E., ROHNER, B., VACCHIANO, G., VAYREDA, J., REDMOND, J., SOCHA, J., FRIDMAN, J., TOMTER, S., POLLEY, H., BARREIRO, S., & NABUURS, G. J. 2018. Species-specific, pan-European diameter increment models based on data of 2.3 million trees. *For. Syst.* 5, 1–19.



TRASOBARES, A., MOLA-YUDEGO, B., AQUILUÉ, N., GONZÁLEZ-OLABARRIA, J. R., GARCIA-GONZALO, J., GARCÍA-VALDÉS, R., & DE CÁCERES, M. 2022. Nationwide climate-sensitive models for stand dynamics and forest scenario simulation. *For. Ecol. Manag.*, 505.

ZHAO, Y., O'NEILL, G. A., COOPS, N. C., & WANG, T. 2024. Predicting the site productivity of forest tree species using climate niche models. *For. Ecol. Manag.*, 562.