

PINEA2: UN MODELO INTEGRADO PARA LA GESTIÓN DE LAS MASAS REGULARES DE *PINUS PINEA* L. EN LA MESETA NORTE

Rafael Calama Sainz ^{1*}, Enrique Garriga García ¹, Ángel Bachiller Bachiller ¹, Javier Gordo Alonso ², Luis Finat Gómez ² y Gregorio Montero González ¹

¹ Dpto. Sistemas y Recursos Forestales. CIFOR-INIA. Ctra. Coruña km 7,5. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: *rcalama@inia.es

² Delegación Territorial de Medio Ambiente. c/ Duque de la Victoria s/n. 47005-VALLADOLID (España)

Resumen

Se presenta PINEA2, un modelo de árbol individual que permite simular el crecimiento y predecir la producción de madera, piña y biomasa en masas regulares de *Pinus pinea* L. bajo diferentes supuestos de gestión, definidos a través de programas de claras y del turno de renovación de la masa. En el presente trabajo se muestra la estructura y los componentes del modelo así como una aplicación del mismo a un rodal situado en la Meseta Norte.

Palabras clave: *Producto forestal no maderable, Gestión multifuncional, Modelo integrado, Pinus pinea*

INTRODUCCIÓN

Las masas de *Pinus pinea* L. pueden considerarse ejemplos paradigmáticos de bosques mediterráneos gestionados bajo un criterio multifuncional. En la Meseta Norte la especie ocupa más de 60.000 ha, localizadas principalmente en la provincia de Valladolid. Desde finales del siglo XIX una parte importante de las masas de pino piñonero localizadas en la Meseta Norte han sido ordenadas bajo un criterio multi-objetivo, buscando optimizar de forma conjunta la producción de madera y piñón, a la vez que se garantiza la obtención de otros objetivos de interés social como la protección de los suelos frente a la erosión, contención de dunas móviles, paisaje, conservación de la biodiversidad o uso recreativo. PINEA2 es un modelo de árbol individual, con validez interregional y formulación estocástica, que permite simular el crecimiento, desarrollo y producción de madera y piña en un rodal regular de *Pinus pinea* bajo diferentes

supuestos de gestión, definidos a través de un programa de claras y de la elección de un turno para la renovación del rodal. La elección de un modelo de árbol individual para predecir la evolución de este tipo de masas viene justificada por la necesidad de (1) considerar la heterogeneidad espacial intra-rodal (2) definir adecuadamente la distribución de la producción de piña y madera entre los distintos pies del rodal y (3) facilitar la posterior adaptación del modelo para su uso en rodales con estructura compleja. Las simulaciones se desarrollan en intervalos de 5 años, y en cada instante de simulación PINEA2 permite definir el estado de cada uno de los árboles del rodal.

ESTRUCTURA Y COMPONENTES DEL MODELO

PINEA2 es un sistema compuesto por tres módulos básicos: calidad de estación, estado y

crecimiento y un módulo auxiliar (Figura 1). Cada uno de los módulos queda caracterizado por una serie de variables de entrada y salida, así como por el conjunto de funciones matemáticas que permiten relacionar estas variables entre sí. En el presente trabajo se muestran las funciones componentes de PINEA2, en su formulación como modelos de efectos fijos, no incluyendo los parámetros aleatorios de árbol, parcela o periodo (ver CALAMA et al., 2007, para detalles sobre la formulación estocástica completa).

Las variables básicas de entrada requeridas para el funcionamiento del modelo son la edad del rodal (años), la altura dominante de la masa (metros, definida como al altura media del 20% de los pies más gruesos del rodal), la densidad (pies.ha⁻¹) y el diámetro normal (cm) de cada uno de los individuos. La tabla 1 muestra las distintas variables y unidades empleadas en PINEA2.

Módulo de calidad de estación

El módulo de calidad de estación se compone de una ecuación en diferencias algebraicas que permite determinar el índice de sitio, indicador de la calidad de estación del rodal, y que queda definido como la altura dominante del mismo a la edad de 100 años. PINEA2 incluye como módulo de calidad de estación la función dinámica de crecimiento en altura dominante desarrollada por CALAMA et al. (2003):

$$SI = \exp \left[4,1437 + (\ln(H_0) - 4,1437) \left(\frac{100}{T} \right)^{-0,3935} \right] \quad [1]$$

Este módulo únicamente funciona en la simulación inicial, suponiendo que el índice de sitio estimado se mantiene constante a lo largo de todo el ciclo de simulación, pasando a funcionar como una nueva variable de entrada para el resto de instantes de simulación.

Módulo de estado

El módulo de estado permite caracterizar en cada instante de simulación el valor de las variables de estado de cada uno de los árboles del rodal, y por agregación el valor de las variables de estado a nivel de rodal, a partir de las variables de entrada originales y del índice de calidad de estación. El módulo de estado incluye los siguientes submodelos y ecuaciones:

Ecuación generalizada para la relación diámetro-altura

La altura total de cada árbol del rodal en cada instante de simulación puede estimarse aplicando la siguiente función generalizada (CALAMA & MONTERO, 2004):

$$h = 1,3 + \left[\left(5,5862 - 0,4563 \log(N) \right) \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D_0} \right) + \left(\frac{1}{H_0 - 1,3} \right)^{1/2} \right]^{-2} \quad [2]$$

Submodelo de dimensión de copa

PINEA2 incorpora las dos funciones de dimensión de copa desarrolladas por CAÑADAS et al. (2001) que permiten estimar el diámetro de copa (cw) y la altura hasta la base de la copa (hbc):

$$hbc = h \exp \left(-12,54 \frac{d}{h} - 11,07 \frac{1}{T_n} - 295,04 \frac{d}{h} \frac{1}{T_n} \right) \quad [3a]$$

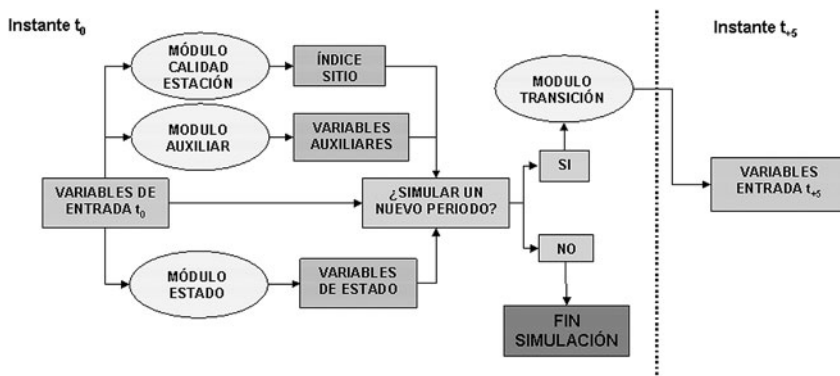


Figura 1. Diagrama de flujo de PINEA2 para un periodo de simulación de 5 años

Nivel de rodal				Nivel de árbol			
Variable	Abr.	Unidad	Tipo	Variable	Abb.	Units	Tipo
Densidad	<i>N</i>	Pies/ha	Ent	Diámetro normal	<i>d</i>	cm ⁺	Ent
Edad	<i>T</i>	Años	Ent	Altura total	<i>h</i>	m ⁺⁺	Est
Edad normal	<i>Tn</i>	Años	Ent	Sección normal	<i>g</i>	m ²	Aux
Altura dominante	<i>Ho</i>	m	Ent Est	Diámetro de copa	<i>cw</i>	m	Est
Diámetro dominante	<i>Do</i>	cm	Aux	Altura hasta la base de la copa	<i>hbc</i>	m	Est
Área basimétrica	<i>AB</i>	m ² /ha	Aux	Diámetro de sección	<i>ds</i>	mm	Est
Diámetro medio cuadrático	<i>dg</i>	cm	Aux	Altura de sección	<i>hs</i>	dm	Aux
Índice de calidad de estación	<i>SI</i>	m	Est	Producción de piña anual	<i>wc</i>	kg	Est
Unidad Natural	<i>UN</i>	Categórica	Ent	Volumen de sierra	<i>vs</i>	m ³	Est
Índice de Reineke	<i>SDI</i>	Adim	Aux	Volumen maderable	<i>vm</i>	m ³	Est
Índice de Hart	<i>Hart</i>	Adim	Aux	Crecimiento diametral para 5 años	<i>ids</i>	cm	Est
Fracción Cabida Cubierta	<i>FCC</i>	%	Aux	Biomasa (fuste, raíces, acículas, ramas...)	<i>bx</i>	kg	Est
Volumen (total, acumulado, en pie, de sierra...)	<i>Vx</i>	m ³ /ha	Ag	Índices competencia	<i>d/dg</i> <i>g/AB</i> <i>BAL</i>	Adim Adim m ² /ha	Aux
Nivel de pudrición	<i>NP</i>	Ordinal (1-4)	Est				
Producción de piña (anual, acumulada...)	<i>M</i>	kg/ha	Ag				
Biomasa (total, acumulada, por fracciones...)	<i>Bx</i>	kg/ha	Ag				

Tabla 1. Variables, abreviaturas y unidades empleadas en PINEA2. +mm en función (4) ++dm en función (4) Est: variable estimada; Ent: variable de entrada, Ag: variable obtenida por agregación, Aux: variable auxiliar

$$cw = 0,813 - 0,202 hbc + 0,169 d \quad [3b]$$

Ecuación de perfil con clasificación final de productos maderables

El volumen de árbol individual se calcula en PINEA2 aplicando la ecuación de perfil de fuste desarrollada por CALAMA & MONTERO (2006). Esta ecuación de perfil permite predecir el diámetro de sección d_s a cualquier altura del fuste h_s y estimar, por integración numérica de dicha función, el volumen de madera del fuste clasificado según destinos comerciales (aserrío, trituración, etc.).

$$d_s = d \left(\frac{h - h_s}{h_s - 13} \right) + [1,1924] \left(\frac{(h^{1,5} - h_s^{1,5})(h_s - 13)}{h^{1,5}} \right) - [2,4463] \left(\frac{(h - h_s)^4 (h_s - 13)}{h^4} \right) \quad [4]$$

Función discriminante para definir el nivel de afección por *Phellinus pini*

Phellinus pini es un hongo basidiomiceto causante de severas pudriciones en la madera de coníferas, provocando una depreciación en el valor de la misma. GARCÍA-GÜEMES Y MONTERO (1998) desarrollaron un modelo discriminante que permite predecir el nivel más probable de pudrición por *Phellinus pini*.

Submodelo de producción anual de piña

PINEA2 incorpora un modelo empírico de base ecológica que permite predecir la producción media anual de piñas sanas (en peso) que produce un individuo (CALAMA et al., 2008). El modelo incluye una variable categórica (*Unidad Natural* = UN) indicadora de una estratificación ecológica del territorio propuesta a partir de atributos de suelo, clima y orografía (tabla 2). La expresión final del modelo para producción de piña es:

$$\log(wc + 1) = 1,4796 + 4,2383 \text{ g} + 0,5539 \text{ d/dg} - 0,2320 \log(N) + UN \quad [5]$$

Ecuaciones para las distintas fracciones de biomasa del árbol

PINEA2 incorpora las ecuaciones de biomasa total y biomasa según fracciones del árbol desarrolladas para la especie por MONTERO et al. (2005). A partir del diámetro normal del árbol es posible determinar, para cada instante de simulación, la biomasa seca total contenida, así como el CO₂ fijado.

Módulo de Transición o Crecimiento

El módulo de transición incluye las funciones matemáticas que permiten estimar el valor de las variables de entrada (densidad, edad, altura dominante y diámetro individual) al final de cada periodo de simulación de 5 años:

Función de incremento en diámetro para un periodo de 5 años

La función de crecimiento individual de PINEA2 es una reparametrización de la función empírica de crecimiento en diámetro para un periodo de 5 años (*id*₅) desarrollada por CALAMA & MONTERO (2005):

$$\log(id_5 + 1) = 2,2383 - 0,3372 \cdot \log(d) - 0,02664 \cdot Ho - 0,1516 \cdot \log(N) + 0,0412 \cdot SI + 0,3376 \text{ d/dg} \quad [6]$$

Función de crecimiento en altura dominante

El crecimiento en altura dominante de un rodal se simula aplicando la ecuación (1). El carácter dinámico y recíproco del modelo permite estimar la altura dominante *Ho*₊₅ en el instante *T*₊₅ utilizando como variable de entrada *H*₀

el valor del índice de sitio, *T*₀ 100 años y reemplazando 100 por valor de edad en *T*₊₅

Evolución de la densidad de masa

A lo largo de cada intervalo de simulación de 5 años puede existir variación en el número de pies por hectárea:

- Aumento debido a la incorporación de pies: función de regeneración (en desarrollo)
- Disminución debido a la mortalidad natural (en desarrollo)
- Disminución debido a la aplicación de claras (decisión del gestor)

Módulo auxiliar

El módulo auxiliar permite obtener de forma directa variables de interés a nivel de árbol o rodal, tales como índices de densidad (área basimétrica, diámetro medio cuadrático, índice de Reineke, índice de Hart), índices de diversidad estructural (diferenciación vertical y horizontal), índices de competencia independientes de la distancia, etc.

EJEMPLO DE APLICACIÓN PRÁCTICA: COMPARACIÓN DE TRES ESQUEMAS SELVÍCOLAS

Como ejemplo práctico de aplicación presentamos la simulación para un rodal regular de 20 años de edad, una hectárea de superficie, localizado en la Unidad Natural 6 (unidad natural Viana de Cega) de la Meseta Norte. El índice de sitio del rodal es 15 metros, la densidad inicial es 500 pies.ha⁻¹, el diámetro medio cuadrático es 10,3 cm,

Unidad	Nombre	Valor UN
1	Torozos	0,4457
2	Páramo O	0
3	Páramo E	-0,4620
4	Valladolid	-0,6850
5	Nava del Rey	-0,6287
6	Viana de Cega	-0,5579
7	Iscar	-0,3241
8	Medina	-0,6903
9	Tudela de Duero	-0,5907
10	Terrazas fluviales	-0,0283

Tabla 2. Unidades Naturales definidas en la Meseta Norte y valor de UN

y los diámetros individuales de los pies se han estimado a partir del modelo de distribución diamétrica de GARCÍA-GÜEMES *et al.* (2002). Se plantea comparar tres esquemas de gestión diferentes:

1. Gestión orientada a la producción de madera: turno 80 años, clara sistemática a los 35 años y dos claras bajas a los 50 y 60 años, reduciendo la densidad a 350, 250 y 200 pies.ha⁻¹.
2. Gestión orientada a la producción de piña: turno 120 años; tres claras bajas a los 30, 40 y 50 años, reduciendo la densidad a 250, 150 y 100 pies.ha⁻¹.
3. Gestión orientada a la producción mixta: turno 100 años; clara sistemática a los 30 años y dos claras bajas a los 45 y 60 años, reduciendo la densidad a 350, 250 y 150 pies.ha⁻¹.

Se llevan a cabo simulaciones estocásticas, asignando de forma aleatoria a cada uno de los árboles al principio de la simulación una realización de la distribución de los parámetros aleatorios de árbol para el incremento en diámetro (normal de media cero y $\sigma_k^2 = 0,0088$). La figura 2 muestra la evolución de distintas variables del rodal bajo los tres supuestos de gestión.

CONCLUSIONES

PINEA2 puede considerarse una herramienta de interés para la gestión multifuncional de masas regulares de *Pinus pinea*, que permite simular el crecimiento y la producción de un

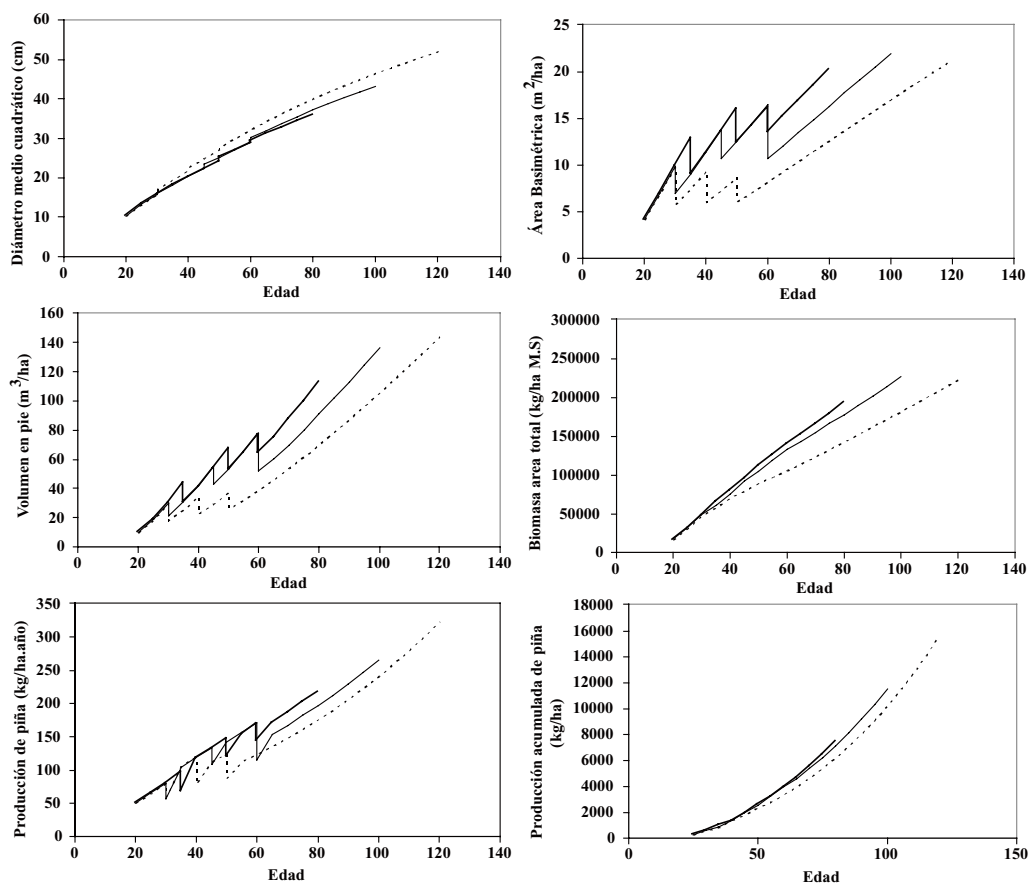


Figura 2. Comparación entre los esquemas 1) (Madera; línea sólida gruesa); 2) (Piña, línea discontinua); 3) (Mixta; línea sólida fina)

rodal de bajo diferentes supuestos de gestión y diferentes escenarios ambientales. El modelo puede resultar útil tanto para la gestión local a corto plazo (ordenaciones y revisiones a nivel de monte) como para la gestión regional a medio y largo plazo (definición de esquemas de selvicultura). La utilización conjunta de PINEA2 con rutinas de optimización permitirá definir los esquemas de selvicultura más adecuados para alcanzar los objetivos propuestos en la ordenación de las masas. Está prevista la incorporación de PINEA2 en la plataforma de acceso libre SiManFor, sistema de integración de modelos forestales. Así mismo, actualmente se está trabajando en la incorporación de nuevas funciones y módulos en PINEA2, que estarán disponibles en futuras versiones:

- Funciones de regeneración y mortalidad
- Modelo de probabilidad de daño por *Doryctria* y *Pissodes*
- Modelo de producción de piñón con cáscara y piñón blanco
- Modelo de combustible para rodales de *Pinus pinea*
- Extensión del modelo a masas con estructura compleja (irregular, mixtas)
- Extensión del modelo a repoblaciones
- Inclusión de factores climáticos y edáficos

Agradecimientos

El presente trabajo se ha desarrollado en el marco financiero y funcional del proyecto INIA CPE-03-001-C5.2

BIBLIOGRAFÍA

- CALAMA, R.; CAÑADAS, N. & MONTERO, G.; 2003. Inter-regional variability in site index models for even-aged stands of stone pine (*Pinus pinea* L.) in Spain. *Ann. For. Sci.* 60: 259-269.
- CALAMA, R. & MONTERO, G.; 2004. Interregional non-linear height-diameter model with random coefficients for Stone Pine in Spain. *Can. J. For. Res.* 34: 150-163.
- CALAMA, R. & MONTERO, G.; 2005. Multilevel linear mixed model for tree diameter increment in Stone pine (*Pinus pinea* L.): a calibrating approach. *Silva Fennica* 39(1): 37-54.
- CALAMA, R. & MONTERO, G.; 2006. Stand and tree level variability on stem form and tree volume in *Pinus pinea* L: a multilevel random components approach. *Inv. Agrar.; Sist. Rec. For.* 15(1): 24-41.
- CALAMA, R.; GORDO, J.; MUTKE, S. & MONTERO, G.; 2008. An empirical ecological-type model for predicting stone pine (*Pinus pinea* L.) cone production in the Northern Plateau (Spain). *Forest Ecol. Manage.* 255: 660-673.
- CALAMA, R.; SÁNCHEZ-GONZÁLEZ, M. & MONTERO, G.; 2007. Integrated management models for Mediterranean Multifunctional Forests: the case of stone pine (*Pinus pinea* L.). *EFI Proceedings*. 56: 57-70.
- CAÑADAS, M.N.; GARCÍA-GÜEMES, C.; GARRIGA, E. Y MONTERO, G.; 2001. Estimación de la dimensión de copas de los árboles de *Pinus pinea* L. En: S.E.C.F.-Junta de Andalucía (eds.), *III Congreso Forestal Español. Montes para la sociedad del nuevo milenio* III: 807-813. Gráficas Coria. Sevilla.
- GARCÍA-GÜEMES, C. Y MONTERO G.; 1998. Influencia de ciertas variables selvícolas en la pudrición provocada por *Phellinus pini* sobre *Pinus pinea* L. *Inv. Agrar.; Sist. Rec. For.* 7: 203-218.
- GARCÍA-GÜEMES, C.; CAÑADAS, N. Y MONTERO, G.; 2002. Modelización de la distribución diamétrica de las masas de *Pinus pinea* L. de Valladolid mediante la función Weibull. *Inv. Agrar.; Sist. Rec. For.* 11: 262-282.
- MONTERO, G.; RUIZ-PEINADO, R. Y MUÑOZ, M.; 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. *Monografía INIA. Serie Forestal* 13: 1-270.