

ESTRATEGIAS DE PARAMETRIZACIÓN DEL MODELO ECOFISIOLÓGICO 3-PG. UNA APLICACIÓN A PLANTACIONES DE *EUCALYPTUS NITENS*

César Pérez-Cruzado¹, Fernando Muñoz-Sáez², Fernando Basurco García-Casal³, Guillermo Riesco Muñoz¹, Esperanza Álvarez Rodríguez⁴ y Roque Rodríguez-Soalleiro¹

¹ Unidad de Xestión Forestal Sostible. (UXFS). Departamento de Enxeñaría Agroforestal. E.P.S. Universidad de Santiago de Compostela. Campus Universitario s/n. 27002-LUGO (España).

² Facultad de Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. Vitoria 631, Barrio Universitario. CONCEPCIÓN (Biobio, Chile).

³ CIT Ence. Marisma de Lourizán s/n. Apdo. 157. 36080-PONTEVEDRA (España)

⁴ Dpto Edafología y Química Agrícola. Facultad de Biología. Universidad de Santiago de Compostela. Rúa Lope Gómez de Marzoa s/n. Campus Sur. 15782-SANTIAGO DE COMPOSTELA (España).

Resumen

El modelo basado en procesos fisiológicos 3-PG puede considerarse como el de mayor utilidad actual para la gestión forestal, particularmente en plantaciones, dada su capacidad de predicción de variables de directa relación con la productividad forestal. Se presentan en este trabajo algunas estrategias que podrían considerarse para obtener la información que permita parametrizar, al menos parcialmente, el modelo 3-PG para nuevas especies. Resulta imprescindible contar con información de crecimiento en parcelas permanentes, de las que se disponga de análisis de suelo e información climática. La disponibilidad de datos de desfronde es particularmente recomendable, al ser los resultados de simulaciones muy dependientes de los parámetros relacionados con este proceso. La información sobre superficie foliar específica de hojas juveniles y adultas, así como una estimación de la edad de cambio de hoja (en el caso de eucaliptos) permite una buena determinación del índice de área foliar a partir de la biomasa de hojas. Se indican procedimientos y modelos empleados para el modificador de edad, basados en el empleo de tablas de producción convencionales. Se indican posibles modelos para ajustar los parámetros relacionados con relaciones alométricas y partición de biomasa. Para determinar la variación de la densidad básica de madera sin corteza con la edad es necesario contar con árboles tipo apeados en los que la densidad básica ponderada se haya calculado, cuidando de emplear un modelo que aporte una asíntota horizontal razonable. El recurso a información bibliográfica para asignar valores razonables a otros parámetros del modelo es imprescindible, si se considera que son necesarios un mínimo de 45 parámetros para usar el modelo. La parametrización aplicada para las plantaciones de *Eucalyptus nitens* en el norte de España ha arrojado resultados muy próximos a los derivados de inventarios sucesivos entre los 3 y los 14 años en tres de los sitios de ensayo más antiguos de la especie en Galicia.

Palabras clave: Modelos ecofisiológicos, *Eucalyptus*, Productividad forestal, Fertilidad, Galicia

INTRODUCCIÓN

El modelo 3-PG (LANDSBERG & WARING, 1997) se fundamenta en procesos que explican el crecimiento y se planteó para cubrir el espacio preexistente entre los modelos empíricos de base estadística y los de balance de carbono. El modelo proporciona predicciones dinámicas, dependientes de condiciones climáticas o selvícolas cambiantes, de fracciones de biomasa o variables dendrométricas, todo ello a escala de rodal forestal. Varias especies con presencia importante en la Península Ibérica cuentan con una parametrización del modelo 3-PG, si bien correspondiente a diferentes condiciones geográficas: *Eucalyptus globulus* (SANDS & LANDSBERG, 2002), posteriormente refinada para Portugal por FONTES et al., (2006), *Pinus radiata* (LANDSBERG et al., 2003), *Pseudotsuga menziesii* (WARING & MACDOWELL, 2002) o *Pinus sylvestris* (LANDSBERG et al., 2005). Para información de *Pinus pinaster* en España se ha propuesto también una parametrización (BRAVO-OVIEDO, 2011).

Los motivos para elegir 3-PG como el modelo de referencia para parametrizar son variados, aunque parecen destacables la posibilidad de obtener variables de salida de directa relación con la productividad forestal, el consumo de agua de las masas forestales o la distribución de biomasa aérea y radical. Estas ventajas han hecho que el modelo se emplee de forma muy amplia en distintas partes del mundo, habiendo mostrado gran flexibilidad, siendo destacable su empleo por grandes empresas forestales para gestión de sus plantaciones (ALMEIDA et al., 2004).

El objetivo de este trabajo es aportar información sobre necesidades de datos, estrategias de parametrización y opciones de mejora del modelo, orientado a la situación general española y derivada de las actividades de parametrización para plantaciones de *Eucalyptus nitens* realizada para el norte de España.

MATERIAL Y MÉTODOS

Información necesaria

Alrededor de 45 parámetros deben determinarse para poder aplicar el modelo 3-PG. Prácticamente la totalidad debería adaptarse a la

especie considerada, y algunos de ellos podrían hacerse dependientes de la estación. La información necesaria para esta tarea proviene necesariamente de parcelas permanentes en las que se haya recopilado información de detalle de la evolución de la masa forestal, así como de la gestión aplicada e información edáfica completa (LANDSBERG et al., 2003). En principio, un punto de partida en que se cuente con redes de parcelas para ajuste de modelos empíricos resulta adecuado para acometer el proceso, intensificando el muestreo sobre variables normalmente no consideradas en ese caso: fracciones de biomasa aérea, desfronde o índice de área foliar. Mediciones específicas de procesos ecofisiológicos, tales como conductancia estomática o interceptación de precipitación, aportan información importante y pueden restringirse a periodos concretos (ALMEIDA et al., 2004).

Una buena opción es la posibilidad de combinar grupos de datos referidos a aspectos no directamente relacionados con el crecimiento de la masa: densidad básica de la madera, coeficientes alométricos determinados por apeo de pies o información de superficie foliar específica. Toda la información recopilable sobre la especie objetivo mejora el proceso y asegura resultados racionales en las simulaciones.

La información climática ha de ser de detalle, con datos mensuales, y lo más representativa posible de las parcelas a que se aplicará el modelo: radiación solar, precipitación, temperatura media, número de días de helada o déficit de presión de vapor (calculable a partir de temperaturas máximas y mínimas mensuales, LANDSBERG Y SANDS, 2011). El balance de agua que realiza 3-PG requiere como dato la capacidad de retención de agua disponible, habiéndose obtenido buenos resultados con el método de estimación propuesto por DOMINGO SANTOS et al. (2006).

Parámetros relacionados con biomasa foliar

El índice de área foliar (LAI) es una variable básica para aplicar la ecuación de predicción de producción primaria neta (P_N) en 3-PG, obteniéndose del producto de superficie foliar específica (σ) y la biomasa foliar (W_f). σ ($m^2 \cdot kg^{-1}$) es variable con la edad, pudiendo modelizarse dicha variación con una función exponencial inversa que asegure un valor adecuado de σ a

edades avanzadas (σ_1), con tendencia asintótica horizontal.

$$\sigma = \frac{\sigma_1 \sigma_0}{\sigma_1 + (\sigma_0 - \sigma_1) e^{-kt}} \quad (1)$$

siendo t la edad, σ_0 el valor inicial correspondiente a brinzales y k una constante a ajustar.

Se obtiene de esta ecuación como parámetro adicional $t\sigma$ (edad a la que la superficie foliar específica resultar ser la mediana). Resulta necesaria la información sobre pesos secos y superficies foliares de muestras de hojas para distintas edades, habiéndose comprobado para *Eucalyptus nitens* una importante variabilidad de σ_0 (Figura 1). Conviene en el caso de los eucaliptos que los valores obtenidos sean congruentes con las edades observadas de cambio de hoja juvenil a adulta, si bien la variación con la edad de σ resultan una fuente de incertidumbre en este modelo.

La biomasa foliar es una variable necesaria para parametrizar y validar el modelo 3-PG y obtener la superficie foliar a través de σ . Es conocido que la biomasa foliar se relaciona de forma directa con la superficie de albura (LANDSBERG & SANDS, 2011), habiéndose obtenido para *Eucalyptus nitens* relaciones de este tipo (MEDHURST et al., 1999). Sin embargo, la estructura del modelo y la dificultad de contar con valores de superficie de albura que permitan hacer dichas estimaciones, obliga a obtener relaciones alométricas basadas en diámetros.

Debido a que la proporción de hojas para plantaciones jóvenes, de diámetros reducidos, es mucho mayor que para diámetros elevados, la intensidad de muestreo de biomasa foliar en pies pequeños debe ser elevada. Para *Eucalyptus nitens* se ha aplicado una relación hiperbólica

que permite estimaciones bastante precisas de biomasa foliar, necesarias a su vez para la estimación de tasas relativas de desfronde (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011). Las tasas de desfronde son asimismo dependientes de la edad de la plantación, para lo que será necesario un ajuste adicional, que asegure una tasa de equilibrio de desfronde a edades adultas (δ_{FX}).

Otros parámetros esenciales son los que determinan la partición de biomasa entre hojas y tallo (considerado como el resto de fracciones aéreas diferentes de las hojas en 3-PG). El modelo considera dos parámetros para caracterizar la partición de biomasa aérea (Ec. 2): p_2 (ratio follaje: tallo para diámetro $B = 2$ cm) y p_{20} ($B = 20$ cm). Una opción indirecta para asignar valores a estos parámetros es el empleo de la Ec. (3), con relaciones adicionales del tipo $W_s = W_s(B)$, $W_f = W_f(B)$ y $B = (t)$, que deben derivarse respecto de t para obtener p_2 y p_{20} . Los valores obtenidos son muy sensibles a las relaciones iniciales.

$$p_{FS} = \frac{\eta_F}{\eta_S} = a_p B^{n_p} \quad (2)$$

$$p_{FS} = \frac{\Delta W_f - \gamma_f W_f}{\Delta W_s} \quad (3)$$

Alometría, corteza y ramas, densidad madera y mortalidad

La relación alométrica del tallo con respecto a B determina dos nuevos parámetros (a_S y n_S), mostrándose el modelo particularmente sensible a los valores asignados a la potencia (n_S), lo que se ha indicado en bibliografía y comprobado en la parametrización para *Eucalyptus nitens* (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011). Esto indica la necesidad

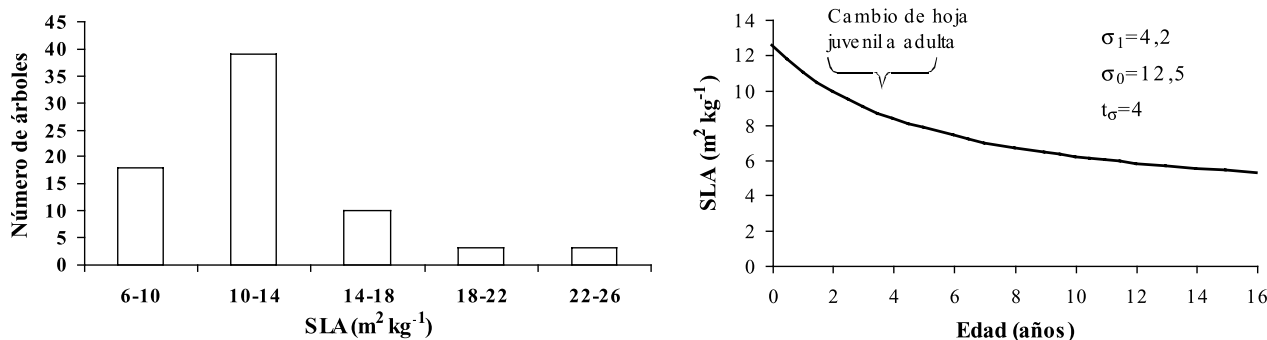


Figura 1. Distribución de valores observados de superficie foliar específica (SLA) en planta de 1,5 años (izquierda) y evolución modelizada de SLA con la edad (derecha)

de precisar los cambios de alometría derivados de la edad de la plantación o diferentes densidades (FONTES et al., 2006), materiales genéticos (ALMEIDA et al., 2004) o área geográficas.

Dos parámetros adicionales sirven para caracterizar la variación con la edad de la fracción de corteza y ramas en el tallo. Esta fracción representa un 71% del tallo para *Eucalyptus nitens* joven, con tendencia en el tiempo a estabilizarse en el entorno del 20%.

La densidad básica de la madera (σ) debe asimismo modelizarse respecto de la edad, necesitando como datos de ajuste valores medios ponderados, lo que dificulta el logro de una buena representación de todo el rango de edades. La tendencia de ρ es creciente con la edad, debiéndose prestar atención a que los valores asintóticos predichos no superen los máximos observados para cada especie.

La asignación de valores razonables a los parámetros de mortalidad supone contar con parcelas en condiciones extremas de densidad, que permitan el cálculo de la biomasa máxima para densidad de 1.000 p·ha⁻¹ (W_{sx1000}) correspondiente a la ley de autoclareo, y de los propios inventarios permanentes, con la consiguiente disponibilidad de pautas de reducción de densidad. El proceso de mortalidad requiere la determinación de 6 parámetros, unos relacionados con el proceso de autoclareo (W_{sx1000}) otros con la mortalidad regular, que se hacen depender de la edad (tasas de mortalidad a edad inicial, final y edad a la que la tasa toma el valor de la mediana). Parece recomendable en este último caso emplear parámetros específicos para cada índice de sitio, al ser la tasa más alta en las mejores estaciones. La existencia de mortalidad supone una reducción de biomasa, para lo que debe establecerse la fracción de la biomasa media por árbol que se pierde, correspondiente a los distintos componentes considerados (tallo, hojas y raíces, m_S , m_F , m_R , respectivamente).

Modificadores

El modelo 3-PG considera varios modificadores de crecimiento, derivados de la edad de la parcela, fertilidad, temperatura, heladas, déficit de presión de vapor o agua en el suelo, de los que se comentarán los dos primeros. El modificador de edad (f_{age}) puede obtenerse a través de

tablas de producción, considerando que fage pasará a tomar valores inferiores a 1 solo a partir de la culminación del crecimiento corriente anual (CAI). La ratio, derivada de tablas de producción, entre el CAI observado y el máximo podría considerarse representativa de la pérdida de capacidad de crecimiento de masa derivada exclusivamente de la edad.

El modificador de fertilidad (f_N) depende directamente del ratio de fertilidad (FR), que resulta ser uno de los aspectos del 3-PG que ha suscitado mayores críticas, al haberse considerado una aproximación simplista. Recientes trabajos (ALMEIDA et al., 2010) sugieren una sistematización de su cálculo en base a la Ec. (4). $FR = 0.4 FL + 0.2 WL + 0.1 OL + 0.2 ML + 0.1 TL$ (4) siendo FL la limitación por fertilidad, WL la limitación (de la nutrición) por agua, OL la derivada de la aireación, ML de la gestión y TL de la topografía. FL podría estimarse a partir de análisis de suelo, pudiendo proponerse una media geométrica de los ratios de varios parámetros relevantes del suelo respecto a los niveles óptimos considerables para la especie.

Entre estos parámetros y aplicado para suelos ácidos del norte de España puede sugerirse el pH en H₂O, el porcentaje de MO del suelo, los niveles de Ca, Mg y K presentes en el complejo de cambio y la saturación de Al del mismo, los niveles disponibles de P y la capacidad de intercambio catiónico. Sería necesario partir de datos concretos de crecimiento para distintas especies para afinar la asignación de valores.

En cualquier caso, la parametrización de f_N debe ser lo más independiente posible de los datos de índice de sitio de la parcela en estudio. Por otra parte, parece improbable que FR pueda permanecer constante, particularmente a lo largo de varios turnos, pero incluso durante el mismo turno (FONTES et al., 2006). Reducciones derivadas de la inmovilización de nutrientes en la biomasa o incrementos debido a fertilización podrían establecerse para mejorar las predicciones.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Validación y simulaciones

Una vez realizada la calibración, el modelo debe validarse con datos de parcelas permanen-

tes y distintas variables: volumen de masa, biomasa foliar, índice de área foliar (*LAI*), diámetro medio o biomasa de fracciones como las raíces. Es lógico que algunas no estén disponibles, pero es necesario considerar varias si se tiene en cuenta que los mismos resultados de variables observadas y predichas podrían obtenerse con varias combinaciones de parámetros.

Una de las salidas de 3-PG es el valor de diámetro medio (*B*), que resulta de la ecuación (5), donde *N* es el número de pies por ha. El valor así calculado es realmente un diámetro medio próximo al cuadrático, pero en concreto *n_s*-ésimo, por lo que la comparación con los valores observados en las parcelas debe tener en cuenta estas circunstancias. Por otro lado, parece claro que el cálculo del área basimétrica *G* que realiza 3-PG basada directamente en *B* (Ec. 6) tiene un sesgo derivado precisamente de la forma de cálculo indicada.

$$\frac{W_s}{N} = a_s B^{n_s} \quad (5)$$

$$G = \frac{\pi}{4} N B^2 \quad (6)$$

La parametrización correcta del modelo permite no solo su aplicación a valores climáticos observados, sino también simular tratamientos selvícolas que resultan alternativos a las prácticas actuales. Para *Eucalyptus nitens*, se ha simulado una selvicultura orientada a la producción integrada de madera maciza, madera para pasta o tablero y biomasa, con aplicación de 3 podas de ramas verdes y dos claras, que dejan una densidad definitiva de 350 pies por ha a los 6-8 años (PÉREZ-CRUZADO et al., 2011).

La aplicación de un análisis económico a esta alternativa permitió el cálculo del VAN, asignando una renta a la tierra dependiente de la calidad de estación. La comparación del VAN de las alternativas exclusivas de madera para pasta (de 2.315 €/ha para SI=11 m a 5.250 €/ha para SI=17m) y de la selvicultura integrada permitió calcular el valor umbral de precio de la madera para sierra que iguala el resultado económico de ambas alternativas. Ese umbral fue de 45 €/m³ en pie para SI=17 y 57 €/m³ para SI=11 m, lo que demuestra el interés de la producción de madera maciza en las estaciones de mejor productividad.

La experiencia con parcelas aclaradas de *Eucalyptus nitens* en Chile (MUÑOZ et al., 2005) indica una extraordinaria capacidad para la recuperación de área foliar y crecimiento tras clara, por lo que las pérdidas de crecimiento simuladas con 3-PG podrían ser excesivas, y derivarse de cambios tras clara en parámetros como SLA, eficiencia fotosintética o atenuación de luz en la copa. Todo ello indica posibles mejoras del modelo.

CONCLUSIONES

La modelización empírica con base estadística es un buen punto de partida en cuanto a información disponible para abordar la parametrización de modelos ecofisiológicos. De estos, 3-PG es el que ofrece mejores perspectivas, al menos en el ámbito de la selvicultura de plantación. Una vez parametrizado, 3-PG permite la simulación de alternativas selvícolas y la obtención de variables difícilmente derivables de los modelos empíricos.

BIBLIOGRAFÍA

- ALMEIDA, A.C.; LANDSBERG, J.J. & SANDS, P.J.; 2004. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecol. Manage.* 193: 179-195.
- ALMEIDA, A.C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S. & LOOS, R.; 2010. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on *Eucalyptus* plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *Forest. Ecol. Manage.* 259: 1730-1740.
- BRAVO OVIEDO, A.; 2011. *Calibración del modelo 3-PG para repoblaciones de pino negral sometidas a diferente tratamiento de claras (inéd.)*.
- DOMINGO SANTOS, J.M.; FERNÁNDEZ DE VILLARÁN, R.; CORRAL PAZOS, E. Y RAPP ARRARÁS, I.; 2006. Estimación de la capacidad de retención de agua en el suelo: revisión del parámetro CRA. *Inv. Agraria.; Sist. Rec. For.* 15(1): 14-23.

- FONTES, L.; LANDSBERG, J.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M.; PACHECO, C.A.; SOARES, P. & ARAUJO, C.; 2006. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Can. J. For. Res.* 36(12): 3209-3221.
- LANDSBERG, J.J. & WARING, R.H.; 1997. A generalized model of forest productivity using concepts of radiation use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecol. Manage.* 95: 209-228.
- LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. & COOPS, N.C.; 2003. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecol. Manage.* 172: 199-214.
- LANDSBERG, J.; MÄKELÄ, A.; SIEVÄNEN, R. & KUKKOLA, M.; 2005. Analysis of biomass accumulation and stem size distributions over long periods in managed stands of *Pinus sylvestris* in Finland using the 3-PG model. *Tree Physiol.* 25: 781-792.
- LANDSBERG, J. & SANDS, P.J.; 2011. *Physiological ecology of forest production. Principles, processes and models.* Academic Press. London.
- MEDHURST, J.L.; BATTAGLIA, M.; CHERRY, M.L.; HUNT, M.A.; WHITE, D.A. & BEADLE, C.L.; 1999. Allometric relationships for *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden plantations. *Trees* 14: 91-101
- MUÑOZ SÁEZ, F.; ESPINOSA, M.; HERRERA, M.A. Y CANCINO, J.; 2005. Características del crecimiento en diámetro, altura y volumen de una plantación de *Eucalyptus nitens* sometida a tratamientos silvícolas de poda y raleo. *Bosque* 26(1): 93-99
- PÉREZ-CRUZADO, C.; MUÑOZ-SÁEZ, F.; BASURCO, F.; RIESCO, G. & RODRÍGUEZ SOALLEIRO, R.; 2011. Combining empirical models and the process-based model 3-PG to predict *Eucalyptus nitens* plantation growth in Spain. *Forest Ecol. Manage.* 262: 1067-1077.
- SANDS, P.J. & LANDSBERG, J.J.; 2002. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecol. Manage.* 163: 273-292.
- WARING, R.H. & MCDOWELL, N.; 2002. Use of a physiological process model with forestry yield tables to set limits on annual carbon balances. *Tree Physiol.* 22: 179-188.