

Modelización de la producción de biomasa de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden en corta rotación para cultivo energético

M. González-García^{1,2,*}

(1) Centro Tecnológico Forestal y de la Madera (CETEMAS). Área de Gestión Forestal Sostenible. Pumarabule s/n - Carbayín Bajo. 33936 Siero. Asturias. España.

(2) Grupo de Investigación en Sistemas Forestales Atlánticos (GIS Forest), Departamento de Biología de Organismos y Sistemas, Escuela Politécnica de Mieres, Universidad de Oviedo. Calle Gonzalo Gutiérrez Quirós, 33600 Mieres, Asturias, España.

* Autor de correspondencia: M. González-García [mgonzalez@cetemas.es]

> Recibido el 25 de noviembre de 2015 - Aceptado el 12 de febrero de 2016

González-García, M. 2016. Modelización de la producción de biomasa de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden en corta rotación para cultivo energético. *Ecosistemas* 25(1): 99-104. Doi.: 10.7818/ECOS.2016.25-1.15

El uso de la biomasa como fuente de energía se ha incrementado en los últimos años con el objetivo de frenar el cambio climático y reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Adicionalmente, este recurso proporciona otros beneficios de carácter social asociados a la generación de empleo y al impulso del desarrollo del medio rural.

Desde hace décadas las plantaciones de eucalipto han contribuido firmemente al desarrollo del medio rural en regiones del norte de España (Vázquez et al. 1997, ENCE 2009) donde existen terrenos inutilizados y colonizados por matorral con bajo valor ecológico y alto riesgo de incendio o superficies agrícolas abandonadas (DGCN 2012) que podrían ser empleadas con fines energéticos.

Los cultivos energéticos de la especie *Eucalyptus nitens* (Deane and Maiden) Maiden pretenden incrementar la oferta de dicha biomasa proporcionando un combustible más homogéneo, de mayor calidad y disponibilidad constante que sea respetuoso con el medio ambiente mediante una planificación adecuada de los recursos.

El objetivo de esta Tesis es el desarrollo de herramientas de modelización incluyendo factores ambientales, para diferentes escalas de predicción (árbol, masa, región) y tipos de modelos (dinámicos de crecimiento, ecofisiológicos) con el fin de generar información esencial para una gestión forestal sostenible y económicamente viable de los cultivos energéticos de *E. nitens* en el arco atlántico español.

Los datos empleados en esta Tesis proceden de una red experimental de 40 parcelas permanentes ubicadas en el noroeste de España. Esta red cubre la variabilidad ambiental existente en la región atlántica, además del rango de edades y densidades de plantación disponibles hasta la fecha (2300-5600 pies ha⁻¹). La recogida de datos incluyó: mediciones dendrométricas anuales, muestreos de biomasa aérea, análisis de nutrientes en suelos y biomasa aérea, humedad edáfica, estudio de diferentes componentes de la copa incluyendo mediciones fotosintéticas y monitorización de desfronde, y evaluación energética entre otros parámetros. En la **Figura 1** se muestra el resumen gráfico de la Tesis.

Los modelos de crecimiento y producción son herramientas esenciales para predecir la productividad de las plantaciones energéticas. En esta Tesis se emplearon las metodologías de ajuste más avanzadas en la generación de modelos dinámicos de crecimiento y producción, ecuaciones de biomasa y el modelo ecofisiológico 3-PG (Physiological Principles Predicting Growth) (Landsberg y Waring 1997) además de su aplicación espacial (3-PGS) (Coops et al. 1998).

La estimación de biomasa se llevó a cabo mediante el desarrollo de modelos a nivel de árbol y de masa para la determinación de la biomasa de copa, fuste y la biomasa aérea total. Además de ecuaciones de biomasa, fueron estimados factores de expansión de la biomasa (BEFs) y ecuaciones de BEF así como ecuaciones predictivas del volumen del fuste. Los resultados incluidos en González-García et al. (2013) mostraron que la ecuación de biomasa fue el método más preciso para estimar la fracción del fuste, aunque cualquiera de las metodologías estudiadas podría ser aplicada con buenos resultados. Por otra parte, para la fracción de copa el modelo de BEF y la ecuación de biomasa proporcionaron las mejores predicciones mientras que esta última fue, a su vez, la mejor herramienta de predicción para la biomasa aérea. En ambas fracciones, copa y biomasa aérea, el BEF constante subestimó la producción, llevando a recomendar la determinación de ecuaciones BEF para un cálculo más preciso de la biomasa. Sin embargo, la selección de una herramienta u otra para predecir la producción va venir determinada por las variables disponibles y el nivel de precisión requerido en cada caso.

El modelo dinámico de crecimiento desarrollado estuvo compuesto por dos ecuaciones (altura dominante y área basimétrica) que proporcionaron un alto grado de precisión. En este estudio, fueron establecidas las primeras curvas de calidad de estación para este tipo de plantaciones con valores de altura dominante de 5, 8, 11 y 14 m a la edad de referencia de 4 años (índice de sitio) y un turno óptimo proyectado de entre 6 y 12 años en función de la calidad de estación (González-García et al. 2015a). El crecimiento medio de la biomasa aérea osciló entre 3 y 18 Mg ha⁻¹ año⁻¹ al final del turno. Se ha demostrado que la incorporación de variables am-

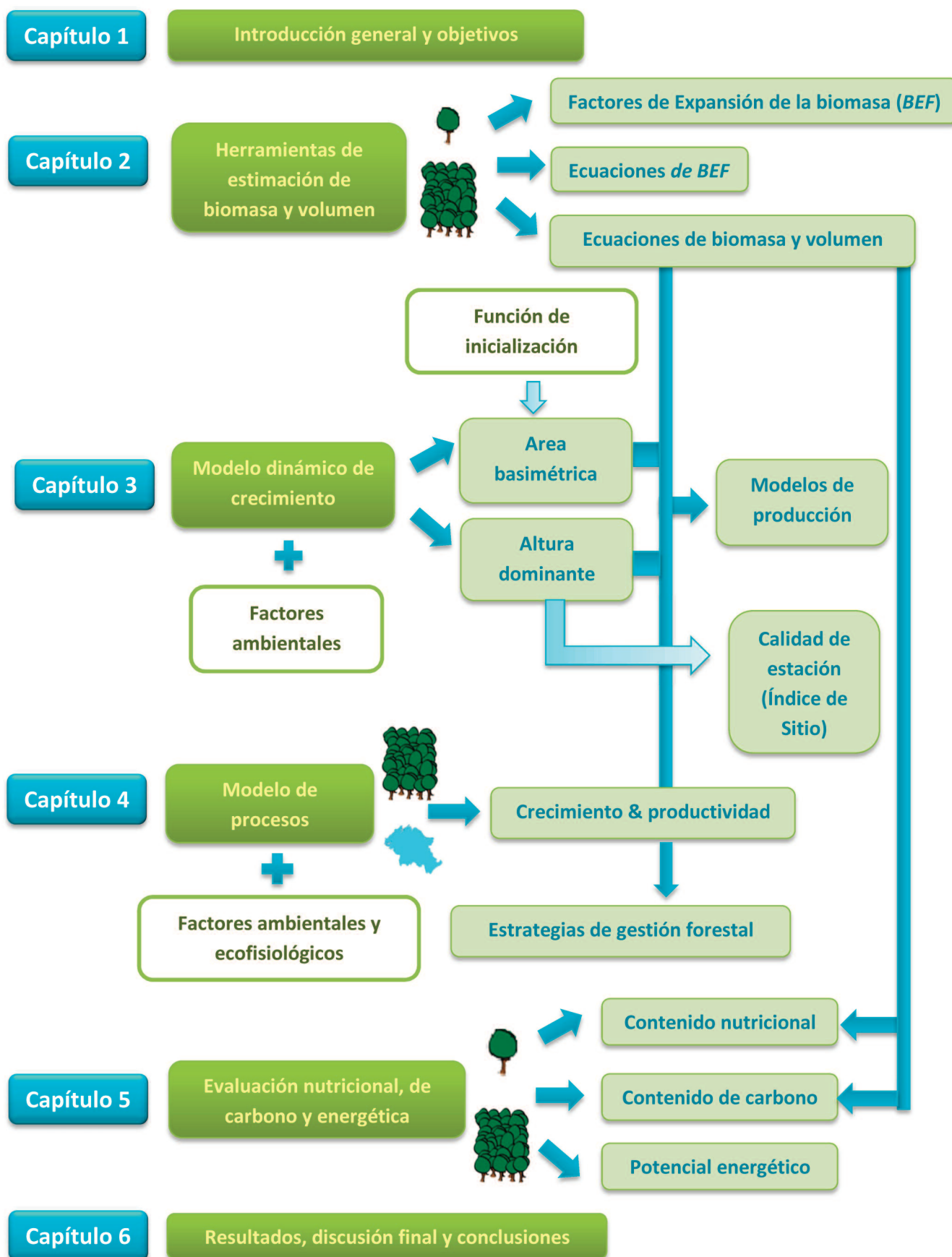


Figura 1. Resumen gráfico de la Tesis.

bientales en los modelos da lugar a funciones más flexibles y robustas que tienen en cuenta variaciones en las condiciones ambientales, lo que resulta de gran importancia frente al cambio climático. Por ello, se estudió la posibilidad de incluir variables ambientales en el modelo dinámico ajustado el cual mostró un nivel predictivo similar al modelo base (Fig. 2). Las variables edáficas materia orgánica y contenido de arena y las variables climáticas relacionadas con la temperatura y precipitación en verano fueron las variables seleccionadas para este modelo de crecimiento (González-García et al. 2015a).

El desarrollo del modelo de procesos ecofisiológico 3-PG incluyendo información espacial (3-PGS) permitió estudiar el comportamiento de estas plantaciones a nivel de masa y a nivel regional. A nivel espacial el modelo fue aplicado en el área de distribución de las plantaciones donde se exploró su potencial y se evaluaron distintos escenarios de gestión en relación a la densidad de plantación (3000, 4000 y 5000 pies ha⁻¹) y al turno de corta (6-9 años). La parametrización del modelo 3-PG fue adecuada, siendo capaz de estimar el crecimiento de la masa forestal para un amplio rango de suelos y características climáticas (González-García et al. 2016). Las simulaciones del modelo mostraron que la productividad de las plantaciones se ve limitada por la disponibilidad de agua los meses de verano, principalmente la precipitación y en menor medida la temperatura mínima y máxima y el déficit de presión de vapor. Esta limitación, sin embargo, no puede compararse con los periodos de sequía de zonas mediterráneas donde la supervivencia de las plantaciones puede verse afectada. Adicionalmente, se mostró una sobreestimación de aproximadamente un 12 % en la producción de biomasa aérea cuando se utilizó el clima medio en lugar del clima real (Fig. 3) lo que resalta la importancia del uso de clima real, cuando esté disponible, para evitar errores en las predicciones. Las simulaciones espaciales llevadas a cabo en el área de estudio mostraron que las plantaciones con menores densidades de plantación (3000 pies ha⁻¹), que son a la vez menos intensivas, produjeron un crecimiento medio en biomasa similar a aquellas con mayores densidades de plantación (Fig. 3), obteniendo a su vez un mayor porcentaje de fuste (20 % de incremento en el diámetro medio) además de menores costes asociados a su producción (González-García et al. 2016). Adicionalmente, se obtuvo un turno óptimo que

osciló entre 6 y 8 años donde el máximo crecimiento medio se obtuvo entorno a los 8 años. Sin embargo, la decisión de alargar o acortar el turno estará íntimamente ligada a la maquinaria disponible para el aprovechamiento.

Desde el punto de vista ambiental los cultivos intensivos pueden presentar un impacto en el sistema forestal, fundamentalmente en el suelo, debido a que la extracción de biomasa y por tanto de nutrientes que puede afectar a su potencial productivo en el futuro. Por ello se llevaron a cabo estudios nutricionales con el fin de ayudar en la toma de decisiones en una gestión sostenible de las plantaciones. La mayoría de las plantaciones estudiadas estuvieron dentro de los rangos nutricionales típicos para las especies de *Eucalyptus* en N, K y Ca (González-García et al. 2015b). Los valores de P sobrepasaron dichos rangos debido a la fertilización llevada a cabo y por otra parte, se presentó una clara deficiencia de Mg y bajos valores de Ca edáficos, asociados a la baja disponibilidad de estos elementos en los suelos de la región. El fuste, componente mayoritario al final del turno, fue la fracción con mayor contenido de P, K, Mg y Na mientras que por otra parte el N y el Ca se almacenaron principalmente en las hojas y la corteza respectivamente (González-García et al. 2015b). Adicionalmente los nutrientes extraídos con la biomasa aérea de acuerdo con las calidades de estación especificadas fueron 243-706 kg N, 44-122 kg P, 131-375 kg K, 121-329 kg Ca, 25-67 kg Mg y 29-86 kg Na por ha (Fig. 4). Los datos obtenidos en este estudio sugieren la estimación de los nutrientes extraídos en función de la producción de biomasa estimada mediante las metodologías incluidas en esta tesis. A partir de ellos se debe considerar el ciclo completo de nutrientes para ser reemplazados en los siguientes turnos con el fin de mantener la productividad del suelo.

Desde el punto de vista del cambio climático se considera de gran importancia la estimación del carbono almacenado en el suelo y la biomasa de las plantaciones. Los resultados del análisis de carbono en este estudio mostraron una concentración constante en todos los componentes arbóreos analizados. Las hojas presentaron la mayor concentración de C, sin embargo la madera fue el componente mayoritario en dicho elemento. El contenido medio de C en la biomasa aérea estuvo entre 2 y 9 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ de acuerdo con la calidad de estación (González-García et al. 2015b).

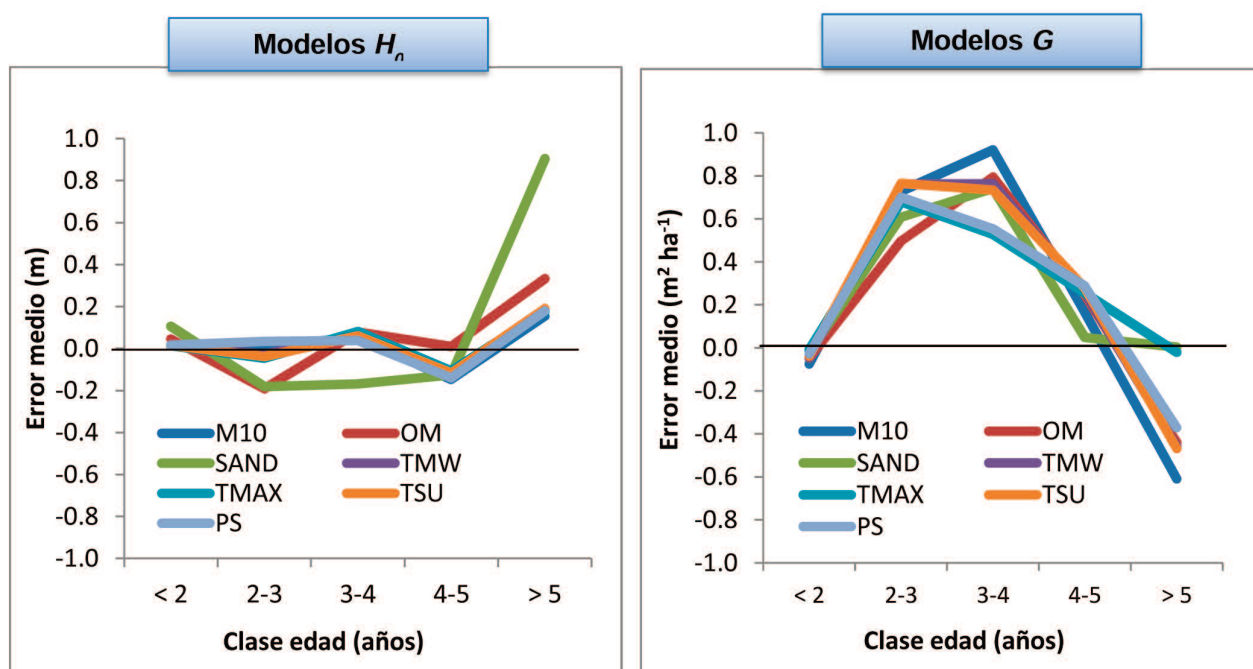


Figura 2. Comparación de las estimaciones de (a) altura dominante (H_0) y (b) área basimétrica (G) usando los modelos dinámicos desarrollados. M10 es el modelo base y el resto son los modelos expandidos que incluyen como variables: el contenido edáfico de materia orgánica (OM), el contenido edáfico de arena (SAND), la temperatura media del mes más cálido (TMW), la media de las temperaturas máximas del mes más cálido (TMAX), la temperatura media del verano (TSU) o la precipitación del verano (PS).

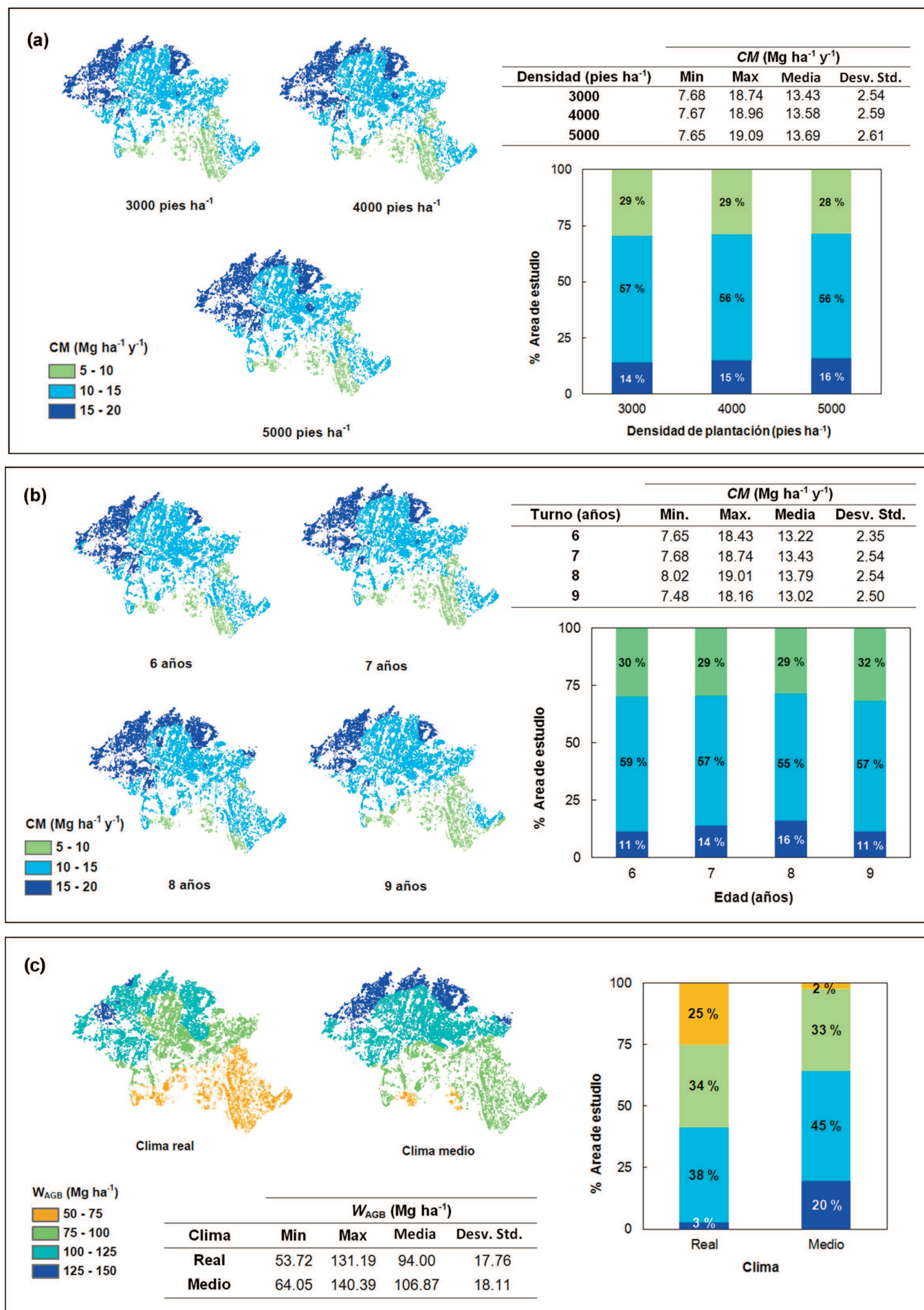


Figura 3. Variación espacial en el incremento medio de biomasa aérea (CM) para (a) distintas densidades de plantación (3000, 4000, 5000 pies ha⁻¹) con un turno de 7 años, (b) distintos turnos de corta (6-7-8-9 años) con una densidad de plantación de 3000 pies ha⁻¹ y (c) variación espacial en biomasa aérea (WAGB) para una densidad de plantación de 3000 pies ha⁻¹ y un turno de corta de 7 años usando el clima real vs. el clima medio.

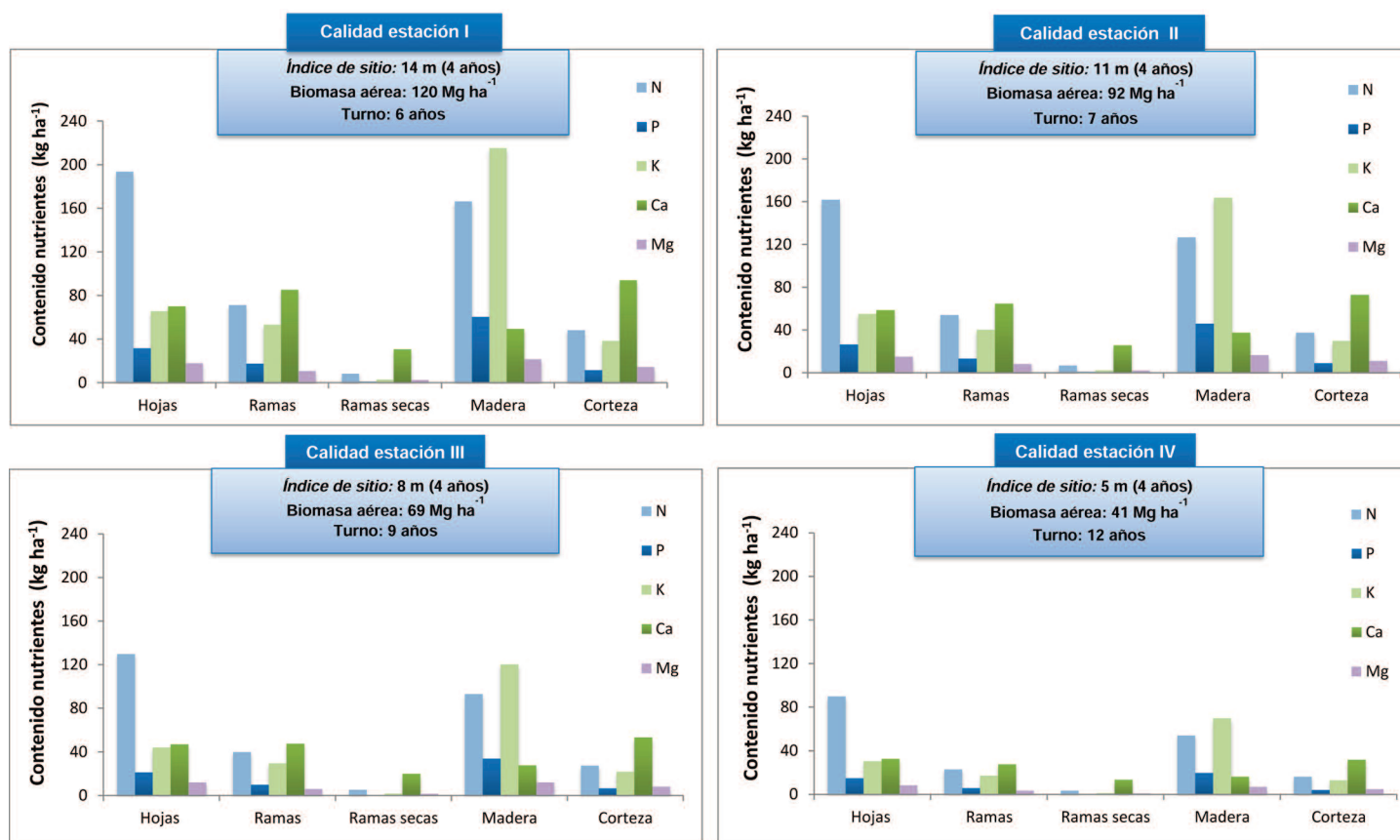


Figura 4. Cuantificación de los nutrientes existentes en los distintos componentes del árbol al final del turno en función de la calidad de estación. La calidad de estación está definida por el índice de sitio: (a) 14 m, (b) 11 m, (c) 8 m and (d) 5 m a una edad de referencia de 4 años. La biomasa se expresa en peso seco.

El estudio de las propiedades energéticas resulta de gran importancia en el uso de los cultivos leñosos como biocombustibles con el fin de estimar el potencial energético que estos pueden generar. Las plantaciones bioenergéticas de *E. nitens* obtuvieron un poder calorífico constante con un valor medio de poder calorífico inferior de 18.32 MJ kg⁻¹ (González-García et al. 2015b), valor superior a otras especies de cultivos leñosos como el chopo y el sauce (McKendry 2002) y un contenido de cenizas medio < 1%, inferior a los cultivos herbáceos (Jenkins et al. 1998).

La presente Tesis resulta pionera en cultivos de *E. nitens* en Europa aportando información muy valiosa para investigadores, gestores forestales e industrias regionales, contribuyendo a promover la generación de energía mediante el uso de la biomasa dentro de una gestión forestal sostenible.

Agradecimientos

Al Grupo ENCE por la disposición para el uso de las plantaciones y la financiación inicial del proyecto. Al personal del CETEMAS y del Área Forestal del SERIDA. A mis directores de tesis, M. Barrio-Anta y A. Hevia, a J. Majada, R. Calvo, A. Almeida, C. Beadle y F. Rubiera por su colaboración en la tesis. Al Plan de Ciencia Tecnología e Innovación del Principado de Asturias (PCTI) por la financiación de M. González-García mediante el Programa de Ayudas Predoctorales Severo Ochoa.

Referencias

Coops, N.C., Waring, R.H., Landsberg, J.J. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management* 104:113–127. doi:10.1016/S0378-1127(97)00248-X

DGCN 2012. *Cuarto Inventario Forestal Nacional, Galicia*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, España.

ENCE 2009. *Sustainable Forest Management and Eucalyptus*. Grupo Empresarial ENCE S.A. Madrid, España. Disponible en: <https://www.ence.es/pdf/Eucalyptus.pdf>.

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Barrio-Anta, M. 2013. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy* 54:147–157. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Calvo de Anta, R., Barrio-Anta, M. 2015a. Dynamic growth and yield model including environmental factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden short rotation woody crops in Northwest Spain. *New Forest* 46:387–407. doi: 10.1007/s11056-015-9467-7

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Rubiera, F., Barrio-Anta, M. 2015b. Impact of site on the nutritional balance and carbon content of *Eucalyptus nitens* short rotation plantations for bioenergy. *iForest Biogeoscience and Forestry*. doi: 10.3832/ifor1505-008

González-García, M., Almeida, A.C., Hevia, A., Majada, J., Beadle, C. 2016. Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. *Global Change Biology Bioenergy* 8:194–210. doi: 10.1111/gcbb.12256

Jenkins, B.M., Baxter, L.L., Miles Jr., T.R., Miles, T.R. 1998. Combustion properties of biomass. *Fuel Processing Technology* 54:17–46. doi:10.1016/S0378-3820(97)00059-3

Landsberg, J.J., Waring, R.H. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* 95:209–228. doi:10.1016/S0378-1127(97)00026-1

McKendry, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology* 83:37–46. doi:10.1016/S0960-8524(01)00118-3

Vázquez, J.A., Gutiérrez, R., Pañeda, C., Blanco, J. 1997. *La contribución del cultivo del eucalipto al desarrollo de las áreas rurales*. Celulosas de Asturias, Navia, Asturias.

MARTA GONZÁLEZ GARCÍA**Modelización de la producción de biomasa de *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden en corta rotación para cultivo energético**

Tesis Doctoral

Universidad de Oviedo

Abril 2015

Directores: Marcos Barrio Anta y Andrea Hevia Cabal

Publicaciones resultantes de la tesis

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Barrio-Anta, M. 2013. Above-ground biomass estimation at tree and stand level for short rotation plantations of *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden in Northwest Spain. *Biomass and Bioenergy* 54:147–157. doi: 10.1016/j.biombioe.2013.03.019

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Calvo de Anta, R., Barrio-Anta, M. 2015. Dynamic growth and yield model including environmental factors for *Eucalyptus nitens* (Deane & Maiden) Maiden short rotation woody crops in Northwest Spain. *New Forest* 46:387–407. doi: 10.1007/s11056-015-9467-7

González-García, M., Hevia, A., Majada, J., Rubiera, F., Barrio-Anta, M. 2015. Impact of site on the nutritional balance and carbon content of *Eucalyptus nitens* short rotation plantations for bioenergy. *iForest Biogeoscience and Forestry*. doi: 10.3832/ifer1505-008

González-García, M., Almeida, A.C., Hevia, A., Majada, J., Beadle, C. 2016. Application of a process-based model for predicting the productivity of *Eucalyptus nitens* bioenergy plantations in Spain. *Global Change Biology Bioenergy* 8:194–210. doi: 10.1111/gcbb.12256