7º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

Gestión del monte: servicios ambientales y bioeconomía

26 - 30 junio 2017 | Plasencia
Cáceres, Extremadura

7CFE01-107

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Plasencia. Cáceres, Extremadura. 26-30 junio 2017
ISBN 978-84-941695-2-6
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Sociedad Española de Ciencias Forestales
SECF

DISTRIBUCIÓN ACTUAL DE LOS EUCALIPTARES EN ANDALUCÍA Y MODELOS DE CRECIMIENTO Y PRODUCCIÓN DE BIOMASA

VENEGAS TRONCOSO, J. [1], GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.[2], SESEÑA RENGEL, A.[1]

[1] Agencia de Medio Ambiente y Agua. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía.
[2] Dirección General de Gestión del Medio Natural. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Junta de Andalucía.

Resumen

Para estimar el volumen de existencias de biomasa de las especies de eucaliptos de Andalucía bajo distintos modelos de gestión, se sigue una metodología que permite elaborar modelos de crecimiento-producción basada en fundamentos de ecología forestal, y apoyada sobre modelizaciones de variables selvícolas y ambientales, tratadas mediante SIG. A partir de la información: a) Inventarios e información de distribución de la empresa ENCE b) inventarios dasométricos e información de distribución de los Proyectos de Ordenación Públicos, c) información sobre vegetación de la REDIAM e IFN3 y d) variables ambientales, se ha determinado en primer lugar la distribución actualizada al año 2013 de las dos especies de eucalipto de Andalucía. Posteriormente, se ha determinado la calidad de estación forestal e índice de sitio de las especies analizadas, obteniendo curvas de calidad de estación para *E. globulus* representativas del suroeste de Andalucía, que actualizan las curvas definidas por PARDO (1990). Para *E. camaldulensis* se han definido en este trabajo las primeras curvas de calidad representativas para el sur peninsular. Por otro lado, se propone un modelo de distribución potencial de estas especies, llegando finalmente a la obtención de modelos de crecimiento-producción que posibilitan la estandarización temporal de la información preexistente en las diferentes fuentes de información y la regionalización espacial de las variables bajo distintos modelos de gestión.

Palabras clave

Eucaliptos, *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus globulus*, inferencia, interpolación espacial, regresión-kriging, calidad de estación, modelos de crecimiento, biomasa, modelos de gestión.

1. Introducción

Este estudio forma parte de los trabajos emprendidos por la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio para aumentar el conocimiento sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal en Andalucía. Está motivado por el gran interés actual en el aprovechamiento sostenible de la biomasa forestal para la obtención de diferentes materias primas y para la generación de energía, partiendo de la base de que la utilización de parte de esta biomasa forestal (entendida como recurso) de manera compatible con otros usos y funciones de los sistemas forestales que la originan requiere de una planificación adecuada que permita una oferta predecible y un aprovechamiento racional desde los puntos de vista selvícola, ecológico y operativo.

2. Objetivos

El objetivo de este trabajo es estimar la producción potencial de biomasa de las plantaciones de las especies de eucaliptos presentes en el territorio andaluz a partir del mapa actualizado de distribución de estas especies y el desarrollo de modelos de calidad de estación.

3. Metodología

El desarrollo metodológico de este trabajo supone integrar una gran cantidad de información original y diseñar procedimientos para convertir esta información en parámetros y variables distribuidos espacialmente de modo regular y temporalmente normalizados.

El esquema sintético de la metodología se muestra en la siguiente figura, que representa bajo la forma esquemática de diagrama de flujo el procedimiento seguido para la elaboración de los Modelos Distribuidos de Crecimiento y Producción Territorial de Andalucía para las especies del

género *Eucalyptus* más representativas en la superficie forestal: *Eucalypus camaldulensis* y *E. globulus*. Este esquema de trabajo es similar al seguido para el caso de la biomasa de coníferas (pinares) publicado en "Modelos de existencias, crecimiento y producción coníferas para Andalucía" GUZMÁN ÁLVAREZ *et al*. (2012).

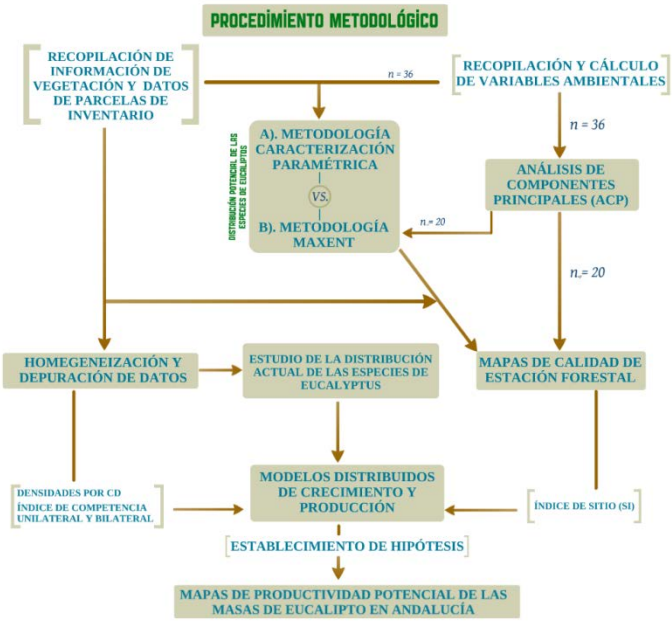

Figura 1. Esquema general metodológico

A continuación, se desarrollan los hitos metodológicos (objetivos específicos) necesarios para alcanzar el objetivo general:

A. Recopilación, homogeneización y depuración de la información dasométrica. Datos de inventario.

Se parte de la información recopilada en el trabajo "Modelos de existencias, crecimiento y producción coníferas para Andalucía" GUZMÁN ÁLVAREZ *et al*. (2012), donde ya se normalizó toda la información de los Proyectos de Ordenación e IFN3, dando como resultado una geodatabase espacial consultable en la página web de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía a través de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

Para el presente trabajo se han incorporado 20 nuevos inventarios procedentes de proyectos de ordenación recientes, así como información de los inventarios sobre plantaciones de eucaliptos llevados a cabo por la empresa Energía y Celulosas (ENCE).

La información contenida en la geodatabase espacial procede de los datos recogidos a fecha del levantamiento del inventario dasométrico en las parcelas de los distintos proyectos de ordenación.

A continuación a modo resumen se muestran las parcelas de inventario recopiladas para el presente trabajo, diferenciando entre especie, procedencia de la información y provincia:

Tabla 1. Número de parcelas de inventario: IFN3, proyectos de de ordenación y ENCE.

PROVINCIA	FUENTE	PARCELAS			
		TOTAL	*Eucalyptus camaldulensis*	*Eucalyptus globulus*	*Eucalyptus* spp.(1)
Almería	IFN3	838			
	ENCE				
	PO	4.562			
Cádiz	IFN3	1.025	31		
	ENCE	5		5	
	PO	7.446	138	6	
Córdoba	IFN3	1.053	36		
	ENCE				
	PO	9.309	299		1

PROVINCIA	FUENTE	PARCELAS			
		TOTAL	*Eucalyptus camaldulensis*	*Eucalyptus globulus*	*Eucalyptus* spp.[1]
Huelva	IFN3	1.951	116	295	
	ENCE	10.886	18	10.884	1
	PO	13.910	1.902	1.842	15
Granada	IFN3	1.039			
	ENCE				
	PO	16.179			
Jaén	IFN3	1.582			
	ENCE				
	PO	35.528		1	1
Málaga	IFN3	1.023	22		
	ENCE				
	PO	10.018	33	52	
Sevilla	IFN3	1.060	50	31	
	ENCE				
	PO	3.950	335	309	
ANDALUCÍA	IFN3	9.571	255	326	0
	ENCE	10.891	18	10.889	1
	PO	100.902	2.707	2.210	17
	Total	**121.364**	**2.980**	**13.425**	**18**

[1] Se considera *Eucalyptus* spp. a otras especies de eucalipto o especie no identificadas en las fuentes de información.

B. Recopilación y cálculo de variables ambientales.

Para este estudio sobre el eucaliptar se van a emplear las mismas variables ambientales y sus componentes principales (CP) que fueron desarrolladas en el trabajo "Biomasa Forestas en Andalucía. Modelos de existencias, crecimiento y producción. Coníferas" GUZMÁN ÁLVAREZ *et al*. (2012), que son las que se enuncian en el siguiente cuadro.

Estas variables y sus CP están disponibles como mapas digitales o ráster con resolución de 100x100 m para la totalidad del territorio andaluz, a través de la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM).

Tabla 2. Variables ambientales (entre paréntesis se expresa la unidad de medida considerada).

VARIABLES OROGRÁFICA
Elevación del terreno (m)
Pendiente del relieve (grados)
Curvatura media (1/m)
Orientación del relieve (grados)
Insolación (adimensional)
VARIABLES CLIMÁTICAS
Precipitación anual (mm)
Precipitación de invierno (mm)
Precipitación de primavera (mm)
Precipitación de verano (mm)
Precipitación de otoño (mm)
Temperatura media anual (ºC)
Temperatura media de las mínimas del mes más frío (ºC)
Temperatura media de las máximas del mes más cálido (ºC)
Oscilación térmica media (ºC)
Temperatura media del mes más frío (ºC)
Temperatura media del mes más cálido (ºC)
Oscilación térmica total (ºC)
Evapotranspiración de referencia anual (mm)
Suma de superávits (mm)
Suma de déficits (mm)
Duración de la sequía (meses)
Indice hídrico anual (adimensional)

VARIABLES EDÁFICAS
Media ponderada del contenido de arena en todo el perfil del suelo (%)
Media ponderada del contenido de limo en todo el perfil del suelo (%)
Media ponderada del contenido de arcilla en todo el perfil del suelo (%)
Profundidad del suelo hasta el horizonte R (cm)
Media ponderada de la conductividad hidráulica saturada en todo el perfil del suelo (cm/día)
Media ponderada de materia orgánica en el perfil del suelo (%)
Contenido de materia orgánica en el horizonte superficial del suelo (%)
Media ponderada del pH en todo el perfil del suelo
Media ponderada del contenido de tierra fina en todo el perfil del suelo (%)
Caliza activa (%)
Capacidad de intercambio catiónico (meq/100 gr)
Porcentaje de saturación de bases (%)
Contenido de nitrógeno en el horizonte superficial del suelo (%)
Media ponderada de la capacidad de retención del agua en todo el perfil del suelo (mm/m)

C . Estudio de la distribución potencial de los eucaliptares andaluces

La distribución potencial de los eucaliptares andaluces se estimó aplicando la metodología MaxEnt (LIU *et al*., 2005; PHILLIPS *et al*., 2006; PHILLIPS y DUDÍK, 2008; WARREN y SEIFERT, 2011; ELITH, J. *et al*., 2011; NAVARRO-CERRILLO *et al*., 2011).

D. Determinación de la calidad de estación forestal e índice de sitio (IS).

Los datos de edad y altura de las especies de eucalipto se han obtenido de los Inventarios Forestales Nacionales IFN2 (MMA, 1996), IFN3 (MARM, 2008) y de las parcelas permanentes de ENCE (mediciones entre los años 1988-2011 para *E. globulus* y 2006-2011 para *E. camaldulensis*) para plantaciones procedentes de semilla. Dado que en este último caso aparecían para una misma parcelas distintos datos de edad y altura, se procedió a obtener los valores medios de dichas variables para cada una de las parcela, ya que todos los datos proporcionados procedían de un único ciclo productivo.

Tabla 3. Parcelas con datos de edad y altura.

FUENTE	NÚMERO DE PARCELAS CON DATOS EDAD-ALTURA	
	Eucalyptus camaldulensis	*Eucalyptus globulus*
IFN2	86	196
IFN3	47	116
ENCE	16	3.953
Total	***149***	***4.265***

Los datos de altura del IFN se refieren a altura media, por lo que fue necesario transformar los datos originales a altura dominante a través de las siguientes regresiones obtenidas gracias a los datos de altura media y dominantes proporcionados por ENCE.

E. globulus: $Hd = 0{,}9139*(Hm)^{1{,}1130}$

E. camaldulensis: $Hd = 2{,}6430 + 1{,}0268*(Hm)$

Siendo Hm, altura total media y Hd altura total dominante.

A partir de los pares de datos de edad-altura dominante se determinó el valor del Índice de Sitio para cada parcela de inventario. El Índice de Sitio (IS) para la especie *E. globulus* se estimó tomando como referencia las curvas de calidad propuestas por PARDO (1990), pero procediendo al promediado de las existentes para cada tipo de suelo (arenas y pizarras), obteniendo de este modo una única familia de curvas representativas del suroeste de la Península Ibérica.

Para *E. camaldulensis,* dada la ausencia de las curvas de calidad, se generó una familia de curvas de calidad empleando la ecuación de SCHUMACHER (1939) a partir de los datos existentes. A continuación mostramos el modelo y parámetros de la ecuación de SCHUMACHER que definen los límites superiores de cada una de las clases de calidad:

$Hd = e^{(a - b/t)}$ Donde: *Hd* altura total dominante (m) y *t* es la edad (años).

Tabla 4.Llímites superiores de definición de las clases de calidad.

ESPECIE	CALIDAD DE ESTACIÓN									
	I		*II*		*III*		*IV*		*V*	
	a	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*	*a*	*b*
E. globulus	3.67062	4.29635	3.55625	4.64653	3.42979	5.13636	3.29476	5.91293	3.16846	7.34763
E. camaldulensis	3.55625	4.64653	3.42979	5.13636	3.29476	5.91293	3.1454	7.34763	2.9785	9.8545

Con los pares de datos “altura dominante-edad” de cada parcela de inventario, se determinó el valor de altura para la edad de referencia (7 años) situando el valor correspondiente en curvas interpoladas entre las curvas de calidad guías correspondientes. Este valor de altura dominante para la edad de referencia es el considerado como índice de sitio (IS) para este estudio.

La cartografía digital del IS de cada especie de eucalipto se obtuvo a través del procedimiento de regresión kriging, aproximación híbrida de inferencia espacial basada en la combinación del análisis de regresión múltiple con técnicas geoestadísticas de interpolación espacial (kriging ordinario). Las regresiones permiten correlacionar las variables ambientales (en este caso, las

componentes principales CP) con el IS, mientras que los residuos de las regresiones se interpolan espacialmente para mejorar la precisión de las predicciones finales.

Se optó por modelizar la evolución temporal de la altura de los árboles mediante funciones de tipo sigmoidal (PIENAAR y TURNBULL, 1973; COBLE y YOUNG-JIN, 2006), que suponen un crecimiento inicial aproximadamente exponencial, pasando por una ralentización gradual de la tasa de crecimiento hasta llegar a la madurez, cuando el crecimiento se ralentiza ostensiblemente.

Se continuó el procedimiento de cálculo desarrollando las funciones de predicción espacial del IS. Además de las CP de las variables ambientales se utilizaron las coordenadas geográficas (latitud y longitud) y la edad de las parcelas como variables independientes. El procedimiento utilizado para realizar los análisis de regresión se basó en el algoritmo de selección por pasos hacia atrás (*stepwise backward selection*) para ajustar los modelos lineales múltiples y eliminar, al mismo tiempo, las variables independientes irrelevantes en las ecuaciones finales. La parte de la varianza no explicada por los modelos de regresión, es decir, los residuos de las regresiones, se obtuvo como la diferencia entre los valores de IS procedentes de las parcelas que se han utilizado como muestras (tras la transformación logística de la variable tomando como altura máxima de arbolado 60m) y los estimados para esos mismos puntos por las funciones de predicción espacial. La interpolación espacial de los residuos se realizó con el software VESPER (MINASNY et al., 2005), mediante el procedimiento de block kriging ordinario y con variogramas omnidireccionales ajustados a un modelo exponencial.

Finalmente, la cartografía digital del Índice de Sitio para cada especie se obtuvo como la suma del mapa derivado con la función de predicción espacial correspondiente (evaluada para una edad de 7 años) y el mapa de los residuos interpolados.

E. Estudio y determinación espacial de la distribución actual.

Para este estudio se ha elaborado una cartografía propia de distribución actual de las especies de eucaliptos presentes en Andalucía, utilizando y confrontando la variedad de información de base preexistente.

A continuación, citaremos la fuente de información con la que se ha contado para la determinación de la distribución actual de los eucaliptares andaluces:

- *Información patrimonial e inventario de Empresa Energía y Celulosas (ENCE)*
- *Información de Proyectos de Ordenación. Parcelas y Cartografía.*
- *Información temática del Espacio Natural Doñana.*
- *Cartografía de proyectos de obra ejecutados en la CMAOT que afectan a eucaliptares.*
- *Cartografía de inventario y diagnosis de los eucaliptares en montes gestionados por la CMAOT. TRAGSA 2008*
- *SIOSE Andalucía 2009*

Para poder aprovechar las geometrías y atributos de la cartografía temática existente ha sido necesario idear un procedimiento de integración de cartografías, puesto que la unión simple de las mismas resultaba poco precisa y confusa.

Dicho procedimiento se sustenta en la normalización que lleva a cabo REDIAM en el proceso de armonización de capas de información que participan en la generación de SIOSE Andalucía, si bien dada la precisión que se requiere y particularidades existentes en las fuentes de información temática existentes, se ha tenido que ajustar el procedimiento normalizado para este caso.

La metodología para la realización de este proceso está basada en operaciones geométricas que modifican la definición de los polígonos para que, dadas unas tolerancias métrica y superficial, se acoplen a la geometría de los polígonos de la capa que se integra. Todas las líneas de una capa que queden a menos distancia que la determinada por el parámetro de tolerancia métrica de alguna línea de la capa que se integra, se modificarán para coincidir con las geometrías de la capa hacia las que se armoniza.

Dicha integración (también llamada armonización) se fundamenta en la definición de unos valores mínimos de tolerancia, tanto de distancia entre líneas como de tamaño mínimo de superficie,

y en el establecimiento de un orden de prioridad de las capas a integrar en función de la relevancia concedida a la fuente de información del polígono.

En la armonización se ha dado respuesta al hecho de que partimos de una gran cantidad de bases cartográficas de distintas fuentes, con diferente marco temporal y que representan el mismo objeto del mundo real. Además, al ser trabajos de diferentes entidades y con diferentes medios, los límites de estos objetos son similares, pero no idénticos. Esta integración no se basa en la simple superposición de capas, sino que debe tener en cuenta que las distintas coberturas proceden de diferentes interpretaciones del territorio y, en la mayoría de las ocasiones, las líneas que el intérprete dibuja tienen diferentes plasmaciones geométricas, a pesar de simbolizar el mismo objeto físico. Como en todo proceso de armonización, ha sido necesario adoptar una jerarquía entre las capas, de forma que se pueda establecer un orden de prelación a la hora de decidir qué capas se subordinan a otras.

Tras el proceso de integración geométrica y temática de las bases de referencia existentes, se ha obtenido una cobertura con un único modelo de datos que integra toda la información temática de las fuentes de información originales. A partir de esta cobertura ha sido preciso definir una regla de decisión de forma análoga a la realizada anteriormente para el proceso de armonización, lo que ha permitido crear el mapa de distribución de las masas de eucaliptares presente en nuestra comunidad.

Por otra parte, y tras la definición de la distribución actual del eucaliptar en Andalucía, se ha considerado interesante diferenciar la superficie donde el eucalipto se presenta como especie principal y en formaciones densas de aquella otra en donde el eucalipto no es la especie principal o está presente de forma secundaria o testimonial.

Para ello se ha llevado a cabo un análisis vectorial empleando la fuente de información disponible en el modelo de datos definido, a la cual se le ha aplicado una serie de reglas de decisión para la diferenciación de las zonas donde el eucalipto es especie principal respecto a las que no los son.

Tabla 4.Modelo de datos de cobertura armonizada y prelación de capas

PROCEDENCIA DE LA BASE DE REFERENCIA	*CÓDIGO MODELO DE DATOS*	*INFORMACIÓN SUMINISTRADA*	*PRIORIDAD*
PATRIMONIO ENCE	A0	Presencia de *E. camaldulensis*	Mayor Prioridad
	A1	Presencia de *E. globulus*	
	A2	Presencia de *E.* spp	
	A3	Ausencia de Eucaliptos	
ESTUDIO ENCE Eucalipto en masas forestales de Huelva	C0	Presencia de *E. camaldulensis* en terreno público	
	C1	Presencia de *E. camaldulensis* en terreno privado	
	C2	Presencia de *E. globulus* en terreno público	
	C3	Presencia de *E. globulus* en terreno privado	
	C4	Ausencia de Eucaliptos en terreno público	
	C5	Ausencia de Eucaliptos en terreno privado	
INFORMACIÓN ESPACIO NATURAL DOÑANA	D0	Presencia de *E. camaldulensis*	
	D1	Presencia de *E. globulus*	
	D2	Presencia de *E.* spp	
PROYECTOS TRANSFORMACIÓN CMAOT	E0	Ausencia de Eucaliptos	
SIOSE ANDALUCÍA 2009	SIOSE 2009	Presencia de Eucaliptos	
	COBERTURA	Identificación Especie de Eucalipto	
	PCT_COBERT	Porcentaje de cobertura arbórea	
	COD_UCLA	Código Uso del Suelo	
	PCT_EUC	Porcentaje de eucaliptar respecto a cobertura arbórea	
SIG TRAGSA 2008	G0	Presencia de *E. camaldulensis*	
	G1	Presencia de *E. globulus*	
	G2	Presencia de *E.* spp	
	G3	Ausencia de Eucaliptos	Menor Prioridad
PROYECTOS DE ORDENACIÓN	B0	Presencia de *E. globulus*	Información auxiliar para la identificación de especie
	H0	Parcelas de inventario con Presencia de *E. camaldulensis*	
	H1	Parcelas de inventario con Presencia de *E. globulus*	
	H2	Parcelas de inventario con Presencia de *E.* spp	
	H3	Parcelas de inventario con Ausencia de Eucaliptos	

F. Modelos distribuidos de crecimientos y producción de los eucaliptares andaluces

Dada la disponibilidad de fuentes de información, se optó por desarrollar un modelo estadístico basado en una ecuación dinámica, que permite predecir el diámetro futuro del árbol representativo de una clase diamétrica en función de las variables que caracterizan su estado inicial y el entorno donde se desarrolla. Este modelo permite proyectar las observaciones puntuales de las parcelas de muestreo (tomadas en origen en fechas particulares) hacia una fecha común (enfoque temporal), requisito indispensable para generar la cartografía digital de las variables dasométricas y, asimismo, los mapas temáticos de biomasa y producción de las especies de eucalipto analizadas (enfoque espacial).

Para satisfacer los objetivos antes expuestos, se desarrolló un modelo distribuido de crecimiento y producción de las especies de eucaliptos analizadas. El término distribuido se refiere a que las clases diamétricas que conforman la masa forestal se actualizan individualmente, aunque se modeliza la interacción entre ellas a través de relaciones de competencia (BUONGIORNO y MICHIE, 1980; NAMAALWA *et al.*, 2005). El núcleo del simulador está constituido por un modelo de clases diamétricas que permite predecir el crecimiento diamétrico del árbol medio representativo de cada clase en función de la edad, la calidad de estación, la densidad y la competencia. Al ser un modelo distribuido, es posible abordar tanto masas regulares como irregulares.

El modelo se formuló sobre la base del enfoque estado-espacio propuesto por VANCLAY (1994), que hace uso de variables de estado para caracterizar las condiciones iniciales del sistema en cualquier instante de tiempo, y de funciones de transición para proyectar las variables de estado hacia el futuro. Asimismo, el modelo permite estimar otras variables de interés mediante funciones de producción y biomasa. Se consideraron dos variables de estado: (i) la densidad de la especie analizada agrupada en clases diamétricas y (ii) la competencia que ejercen otras especies presentes en la masa forestal que se está analizando. Estas variables caracterizan las condiciones iniciales de la masa. Además, permiten abordar masas forestales mixtas incluyendo la presencia de otras especies distintas a la analizada.

El modelo se basa en las ecuaciones propuestas por ZEIDE (1993), en las que el crecimiento se divide en dos componentes: uno representa la tendencia intrínseca hacia un crecimiento ilimitado y el otro las restricciones al mismo. Así, el modelo utiliza dos funciones de transición (DIÉGUEZ-ARANDA *et al.*, 2009). La primera permite pronosticar el diámetro normal futuro del árbol representativo de una clase diamétrica en función de su altura total, el número de pies de la clase que representa y la competencia que ejercen el resto de árboles presentes en la masa analizada (tanto de la propia especie como de otras especies). La segunda predice la altura total del árbol representativo en función de la edad y la productividad del sitio donde se encuentra.

Después de analizar diversas alternativas (ZEIDE, 1993; KIVISTE *et al.*, 2002), y una vez comprobado el grado de bondad de los ajustes, las funciones que finalmente fueron elegidas para simular las transiciones descritas son las siguientes:

$$d_i = c_1 \cdot H_i^{\exp_1} \cdot N_i^{\exp_2} \mathrm{IC}_i^{\exp_3} N_T^{\exp_4}$$
$$H_i = c_2 \cdot E_i^{\exp_3} \cdot \mathrm{IS}^{\exp 4}$$

donde *di, Hi, Ni, ICi y Ei* son, respectivamente, el diámetro normal (cm), la altura total (m), la densidad (pies/ha), el índice de competencia (adimensional) y la edad (años) correspondientes al árbol representativo de la clase diamétrica, *i* y N_T (pies/ha) se corresponde a la densidad total de pies arbóreos presentes en la parcela descontando los *Ni* (pies/ha); *IS* es el índice de sitio del lugar (m), mientras que *exp1, exp2, exp3, exp4, c1 y c2* son los exponentes y coeficientes del modelo de regresión.

Puede observarse en las ecuaciones anteriores que todos los parámetros de los modelos están incluidos como términos potenciales. Por lo tanto, la aplicación de una transformación logarítmica

permite convertir las ecuaciones anteriores en modelos lineales múltiples de más fácil resolución, de modo que:

$$\ln(d_i) = c_1 + c_2\ln(H_i) + c_3\ln(N_i) + c_4 \cdot \ln(\mathrm{IC}_i) + c_5 \cdot \ln(N_T)$$
$$\ln(H_i) = c_6 + c_7\ln(E_i) + c_8\ln(\mathrm{IS})$$

El diámetro de una especie es función de su altura (que se traduce en edad y productividad del sitio) y está limitado por la competencia, que puede ser de naturaleza unilateral o bilateral (YANG *et al.*, 2003). En la competencia unilateral, los árboles más grandes están en ventaja competitiva sobre los árboles más pequeños y, por tanto, estos no afectarán sustancialmente el crecimiento y supervivencia de los más grandes (CANNEL *et al.,* 1984). Esta competencia unilateral (*ICi*) se ha expresado aquí por la relación del diámetro del árbol sujeto o representativo de la clase diamétrica *i* y el diámetro promedio de la parcela de muestreo. En la competencia bilateral todos los árboles imponen cierta competencia sobre sus vecinos, independientemente de su tamaño (CANNEL *et al*., 1984), lo que puede ser descrito con la variable densidad (N_T).

La competencia unilateral *ICi* se definió como el índice que describe la siguiente ecuación:

$$\mathrm{IC}_i = \frac{\mathrm{di}}{\frac{\sum_{i=1}^{\mathrm{Nc}} d_i \cdot N_i}{\sum_{i=i}^{\mathrm{Nc}} N_i}}$$

donde *di*, es el diámetro normal (m) correspondientes al árbol representativo de la especie analizada de la clase diamétrica, *i; Ni* es la densidad (pies/ha) tanto para la especie analizada como para el resto de especies presentes en la parcela, *Nc* es el número total de clases diamétricas.

N_{Ti} se definió como un Índice de Competencia Bilateral, tal como describe la siguiente ecuación:

$$N_{T_i} = N_a + \sum_{j=1, j\neq i}^{\mathrm{Nc}} N_j$$

donde *Na* es la densidad total (pies/ha) de las especies ajenas presentes en la parcela, mientras *Nj* es la densidad correspondiente a la clase diamétrica, j, de la especie analizada, siendo j diferente a *i*, y *Nc* es el número total de clases diamétricas.

Las funciones de producción para estimar el volumen con corteza, su incremento anual, y el volumen de leñas también se ajustaron a modelos potenciales según las siguientes ecuaciones (MARTINEZ *et al*., 1993):

$$\ln(\mathrm{VCC}_i) = c_8 + c_9\ln(H_i) + c_{10}\ln(d_i)$$
$$\ln(\mathrm{IAVC}_i) = c_{11} + c_{12}\ln\left(\frac{\mathrm{VCC}_i}{E_i}\right)$$
$$\ln(\mathrm{VLE}_i) = c_{13} + c_{14}\ln(\mathrm{VCC}_i) + c_{15}\ln(d_i)$$

siendo *VCCi* el volumen con corteza (m^3/pies), *IAVCi* el incremento anual del volumen con corteza (m^3/pies) y *VLEi* el volumen de leñas (m^3/pies) que producen los árboles pertenecientes a la clase diamétrica, *i*. El resto de parámetros de las ecuaciones anteriores ya han sido definidos con anterioridad.

Los datos utilizados para calibrar los parámetros de la ecuación de transición fueron los mismos que se utilizaron para estimar el IS. Para el resto de funciones se utilizaron las muestras provenientes de diferentes inventarios.

Finalmente, se utilizaron las funciones desarrolladas por RUÍZ-PEINADO *et al*. 2012, para estimar las diferentes fracciones de biomasa forestal de las especies de eucaliptos estudiadas.

G. Producción potencial de las masas de eucaliptares andaluzas

Dado que el eucalipto tiene ventajas industriales que lo convierten en un árbol interesante como materia prima renovable, se ha considerado interesante conocer la producción potencial de eucalipto en Andalucía bajo dos situaciones de referencia: una enfocada a la producción de celulosa y

otra a la producción de biomasa. Dicha diferenciación es importante tenerla en cuenta ya que los turnos de aprovechamientos, así como los marcos de plantación y manejo que se emplean difieren en cada caso según el destino final que se proponga, si bien con frecuencia se da lugar a una situación mixta en la que existe un aprovechamiento complementario de celulosa (o madera) y biomasa.

Partiendo de los resultados obtenidos en cada una de las etapas metodológicas (distribución actual del eucalipto, calidad de estación e índice de sitio y modelos de crecimiento y producción) y una situación o hipótesis de partida que define el valor de las variables de estado de las masas: turno de aprovechamiento (edad) y marco de plantación (densidad), se han empleado los modelos o funciones de transición para estimar el estado de desarrollo a la edad del turno establecido de esas hipotéticas masas en el territorio (definido por la distribución actual del eucalipto). Y una vez estimado su estado de desarrollo, se ha calculado, a partir de las funciones de producción y biomasa, el volumen de madera y biomasa para el turno de aprovechamiento establecido.

Las hipótesis de partida que se han establecido para la determinación de la producción potencial de eucalipto son las siguientes:

- *PRODUCCIÓN DE CELULOSA:*

Especie: *Eucalyptus globulus*
Turno de Aprovechamiento: 12 años
Marco de Plantación: 520 pies/ha

- *PRODUCCIÓN DE BIOMASA:*

Especie: *Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis*
Turno de Aprovechamiento: 7 años
Marco de Plantación: 530 pies/ha

4. Resultados

Como resultado de la aplicación de esta metodología y de los modelos de crecimiento y producción se ha obtenido un amplio catálogo de información raster georeferenciada para toda la región andaluza con resolución 100x100, consultables a través de la Red de Información Ambiental (REDIAM).

Para cada especie de eucalipto se ha obtenido las variables dendrométricas que definen las existencias de cada unidad territorial para las dos hipótesis de partida definidas. Para cada una de ellas se ha obtenido un raster de resolución 100x100 m, cuyo ámbito ha sido la distribución actual de cada una de la especie.

Tabla 5. Información raster resultantes. Variables dendrométricas.

VARIABLES RESULTANTES	DESCRIPCIÓN
VCC	Volumen con corteza
VLE	Volumen de leñas
IAVC	Incremento anual de volumen con corteza
B_{RF}	Biomasa ramas finas < 2 cm + acículas (RUIZ-PEINADO *et al*. 2012)
B_{FRG}	Biomasa de fuste y ramas gruesas > 7 cm (RUIZ-PEINADO *et al*. 2012)
B_{RM}	Biomasa ramas medias 7-2 cm (RUIZ-PEINADO *et al*. 2012)
B_{TA}	Biomasa total aérea (B_{RF} + B_{FRG} + B_{RM}) (RUIZ-PEINADO *et al*. 2012)
Di	Diámetro medio a la edad del turno de aprovechamiento
H_i	Altura dominante media a la edad del turno de aprovechamiento

A continuación, se presentan los valores de distribución actual, así como los datos de existencia calculada al año de referencia expresadas en volumen con corteza (m^3) y biomasa total aérea (t), agregados a nivel provincial para las dos especies de eucaliptos y para cada una de las hipótesis contempladas.

Cabe puntualizar que los datos de existencias de otras especies de eucalipto se han incluido en los resultados correspondientes a *Eucalyptus globulus*, aplicándose los modelos de crecimiento y

producción correspondientes y adicionando a la distribución territorial de *Eucalyptus globulus* la definida para estos casos.

Tablas 6. Superficie de distribución actual (ha) para el año de referencia del estudio (2013), de las especies de eucaliptos en Andalucía diferenciando entre aquellas zonas donde el eucalipto se presenta como especie principal y en formaciones densas de aquellas otras donde el eucalipto no es la especie principal o está presente de forma secundaria o testimonial

PROVINCIA	*Eucalyptus globulus*			*Eucalyptus camaldulensis*		
	Especie Principal	Especie Secundaria	*Total*	Especie Principal	Especie Secundaria	*Total*
Almería	0	0	*0*	0	224,47	*224,47*
Cádiz	0	0	*0*	0	3.322,14	*3.322,14*
Córdoba	0	6,55	*6,55*	0	2.195,33	*2.195,33*
Granada	0	0	*0*	0	191,48	*191,48*
Huelva	57.819,26	54.873,89	*112.693,15*	5.107,31	15.879,04	*20.986,35*
Jaén	0	17,71	*17,71*	0	297,49	*297,49*
Málaga	0	48,79	*48,79*	0	999,22	*999,22*
Sevilla	2.745,75	6.338,61	*9.084,35*	1.122,92	1.739,91	*2.862,83*
TOTAL	*60.565,01*	*61.285,55*	*121.850,55*	*6.230,23*	*24.849,08*	*31.079,31*

PROVINCIA	*Eucalyptus* spp.		
	Especie Principal	Especie Secundaria	*Total*
Almería	0	11,98	*11,98*
Cádiz	0	2.654,29	*2.654,29*
Córdoba	0	1.021,89	*1.021,89*
Granada	0	169,9	*169,9*
Huelva	5.535,76	9.254,60	*14.790,35*
Jaén	0	551,74	*551,74*
Málaga	0	2.244,27	*2.244,27*
Sevilla	1.450,23	2.363,30	*3.813,53*
TOTAL	*6.985,99*	*18.271,97*	*25.257,95*

Tabla 7. Datos de existencias calculadas. Celulosa (Eucalyptus globulus).
Datos de superficie actual para el año de referencia del estudio (2013).

Provincia	*Sup. presencia (ha)*	*VCC (m³)*	$B_{TA}(t)$
Almería	11,98	162,84	265,21
Cádiz	2.654,29	121.735,10	161.282,30
Córdoba	1.028,44	42.025,07	56.743,16
Granada	169,90	8.281,78	10.613,67
Huelva	127.483,50	6.097.289,00	7.966.061,00
Jaén	569,45	28.907,89	37.575,45
Málaga	2.293,06	82.940,27	115.382,90
Sevilla	12.897,88	493.017,80	673.345,80

Tabla 8. Datos de existencias calculadas. Biomasa (Eucalyptus globulus).
Datos de superficie actual para el año de referencia del estudio (2013).

Provincia	*Sup. presencia (ha)*	*VCC (m³)*	$B_{TA}(t)$
Almería	11,98	80,19	160,18
Cádiz	2.654,29	59.949,85	92.910,63
Córdoba	1.028,44	20.695,73	32.838,74
Granada	169,90	4.078,46	6.069,11
Huelva	127.483,50	3.002.680,00	4.574.947,00
Jaén	569,45	14.236,02	21.553,44
Málaga	2.293,06	40.844,89	67.257,33
Sevilla	12.897,88	242.792,30	390.899,20

Tabla 9. Datos de existencias calculadas. Biomasa (Eucalyptus camaldulensis).
Datos de superficie actual para el año de referencia del estudio (2013).

Provincia	*Sup. presencia (ha)*	*VCC (m³)*	*B_{TA}(t)*
Almería	224,47	1.249,30	2.997,88
Cádiz	3.322,14	39.048,86	73.695,02
Córdoba	2.195,33	29.030,05	52.927,73
Granada	191,48	1.170,25	2.668,00
Huelva	20.986,35	342.517,00	586.575,90
Jaén	297,49	4.413,30	7.849,96
Málaga	999,22	10.905,77	21.115,73
Sevilla	2.862,83	33.774,86	64.039,22

5. Discusión

Es bien conocida la influencia decisiva de la resolución espacial sobre las variables ambientales, que exhiben diferente comportamiento y estructura espacial en función de la escala de representación utilizada. Por esta razón, debe remarcarse que la resolución espacial adoptada en este trabajo (100 m, que permite un adecuado equilibrio entre el grado de detalle de las fuentes utilizadas, la precisión de los resultados y los recursos necesarios para efectuar los cálculos (McBRATNEY et al., 2003; HENGL, 2006)), además de otras posibles pérdidas de información derivadas de otras decisiones metodológicas, determina la calidad de los resultados y, especialmente, su capacidad de ajustarse a condiciones locales precisas. Aunque la información, al ser rasterizada, permite ser consultable a diferentes niveles de agregación (rodal, cantón, cuartel, sección, monte, unidades administrativas, etc.), el procedimiento metodológico seguido ofrece unos resultados más robustos para una escala de trabajo de ámbito comarcal (escala de trabajo a partir de 1:25.000), presentando un grado de aproximación menor (debido principalmente a los procedimientos de interpolación espacial y temporal empleados) para estudios de grado más fino. En este sentido, conviene atender a la síntesis que realizaron GANDULLO y SANCHEZ-PALOMARES (1994), resumiendo las principales simplificaciones que usualmente se introducen en el desarrollo de modelos de pronóstico de la calidad de estación forestal, y que son indudables fuentes de errores.

Además, es muy importante tener en cuenta que, si bien se ha empleado toda la información vectorial disponible para la estimación de la distribución actual de los eucaliptares en Andalucía (actualizada al año 2013), ha de tenerse en cuenta que estamos tratando una especie de crecimiento rápido y con turnos de corta relativamente cortos, y al no haber llevado a cabo prospecciones de campo, no se han podido contemplar las variaciones que se hayan podido producir en las zonas cartografiadas e inventariadas desde que se tomaron los datos en campo (cortas finales, intervenciones selvícolas como claras, aprovechamientos, incendios o algún otro tipo de circunstancia), en un sector muy dinámico, máxime como respuesta a los importantes cambios en el mercado de los productos maderables y biomásicos, lo que introduce un elemento de incertidumbre que ha de ser evaluado y corregido en las consultas concretas a la base de datos del SIG a partir del conocimiento histórico reciente de la gestión y evolución de las zonas de distribución. En este sentido, los resultados deben considerarse como datos estimativos y orientativos que han de ser contrastados con las superficies reales a través de análisis particularizados.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos para el IS y los mapas temáticos generados en este trabajo constituyen una herramienta de puesta al día de información territorial concerniente a la distribución actual y potencial del eucalipto y sobre la calidad de las estaciones forestales a escala de semidetalle en Andalucía (100 x 100 m), cuyos resultados concretos espaciales han de contrastarse con la situación actual de cada rodal. Con la metodología empleada se ha logrado contar con la información necesaria para poder estimar la capacidad productiva de celulosa o biomasa de la superficie forestal de Andalucía con presencia histórica de eucalipto, siendo información rasterizada y, por tanto, consultable a diferentes niveles de agregación. No obstante, el manejo y explotación de la misma requiere de un conocimiento experto en SIG, es por ello que la CMAOT de la Junta de Andalucía integrará dicha información en el "*Sistema de Información de Biomasa Forestal en Andalucía*", cuya finalidad es hacer accesible la información de biomasa resultante de forma sencilla y ágil, como ya

viene realizándose para las coníferas, convirtiéndose por ello en la herramienta de difusión preferente de los resultados obtenidos.

7. Agradecimientos

El proyecto ha contado con la financiación del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente a través del Fondo para el Aprovechamiento de la Biomasa Forestal Residual (Subconcepto 755.02) del Fondo del Patrimonio Natural de los Presupuestos Generales del Estado.

8. Bibliografía

BUONGIORNO, J.; MICHIE, B. R. 1980. A Matrix Model of Uneven-Aged Forest Management. *Forest Sci,* 26(4): 609-625.

CANNEL, M.G.R.; ROTHERY, P.; FORD, E.D. 1984. Competition within stands of Picea sitchensis and Pinus contorta. *Ann. Bot*. 53, 349-362.

COBLE, D.W.; YOUNG-JIN, L. 2006. Use of a generalized sigmoid growth function to predict site index for unmanaged loblolly and slash pine plantations in East Texas. Proceedings of the 13th biennial southern silvicultural research conference. *Gen. Tech. Rep*. SRS–92. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; ROJO-ALBORECA, A.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; BARRIO-ANTA, M.; CRECENTE-CAMPO, F.; GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, J. M.; PÉREZ-CRUZADO, C.; RODRÍGUEZ-SALLEIRO, R.; LÓPEZ-SÁNCHEZ. C. A.; BALBOA-MURIAS, M. A.; GORGOSO-VARELA, J. J.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F. 2009. Herramientas selvícolas para la gestión forestal sostenible en Galicia. *Universidad de Santiago de Compostela*. Lugo.

ELITH, J., PHILLIPS, S.J., HASTIE, T., DUDÍK, M., CHEE, Y.E., YATES, C.J., 2011. A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity Distributions* 17: 43–57.

GANDULLO, J.M. y SÁNCHEZ-PALOMARES, O. 1994. Estaciones ecológicas de los pinares españoles. ICONA. *Colección Técnica*.

GUZMÁN ÁLVAREZ, J.R.; VENEGAS TRONCOSO, J.; SESEÑA RENGEL, A.; SILLERO ALMAZÁN, M.L.; RODRÍGEZ ÁLVAREZ, J.A. 2012. Biomasa forestal en Andalucía, Modelo de existencias, crecimiento y producción. Coníferas. Consejería de Agricultura, Pesca y Medio Ambiente.

HENGL, T. 2006. Finding the right pixel size. *Comput. Geosci.* 32: 1238-1298.

HENGL, T. 2007. A Practical Guide to Geostatistical mapping of environmental variables. EUR 22904 *Scientific and Technical Research series*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxemburg.

HENGL, T.; HEUVELINK, G.B.M. & ROSSITER, D.G. 2007. About regression-kriging: from equations to case studies. *Comput. Geosci.* 33(10): 1301-1315.

KIVISTE, A.; ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G.; ROJO, A.; RUIZ GONZÁLEZ, A.D. 2002. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. *Monografías INIA: Forestal nº 4.* Madrid.

LIU, C., BERRY, P. M.; DAWSON, T. P.; PEARSON, R. G. 2005. Selecting thresholds of occurrence in the prediction of species distributions. *Ecography*, 28: 385 – 393.

MARM. 2008. Tercer Inventario Forestal Nacional (IFN3) 1997-2007. Andalucía. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

McBRATNEY, A.; MENDOC-A SANTOS, M.; MINASNY, B. 2003. On digital soil mapping. *Geoderma,* 117: 3–52.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B.; WHELAN, B.M. 2005. VESPER version 1.62. Australian Centre for Precision Agriculture, McMillan Building A05, The University of Sydney, NSW 2006. http://www.usyd.edu.au/ agriculture/acpa.

MMA. 1996. Segundo Inventario Forestal Nacional (IFN2) 1986-1995. Andalucía. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.

NAMAALWA, J.; EID, T.; SANKHAYAN, P. 2005. A multi-species density-dependent matrix growth model for the dry woodlands of Uganda. *For. Ecol. Manage,* 213(1-3): 312-327.

NAVARRO-CERRILLO, R. M.; HERNÁNDEZ-BERMEJO, J. E.; HERNÁNDEZ-CLEMENTE, R. 2011. Evaluating models to assess the distribution of *Buxus balearica* in southern Spain. *Appl. Veg. Sci.*, 14: 256 –267.

PARDO M., 1990. Forestry management of a Spanish Eucalyptus globulus area based on continuous forest inventory. Bulletin des Recherches Agronomiques de Gembloux 25 (1), 77-90.

PHILLIPS, S.; ANDERSON, R.; SCHAPIRE, R. 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Model.*, 190 (3-4): 231-259.

PHILLIPS, S.J., DUDÍK, M., 2008. Modeling of species distributions with MaxEnt: new extensions and a comprehensive evaluation. *Ecography* 31: 161–175.

PIENAAR, L.V.; TURNBULL, K.J. 1973. The Chapman-Richards generalization of Von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. *Forest Sci*, 19 (1): 2-22.

RUIZ-PEINADO, R.; RÍO, M. y MONTERO, G. 2012. Biomass models to estimate carbon stocks for hardwood tree species. *Forest Systems*, 21(1), 42-52.

SCHUMACHER, F. X. 1939. A new growth curve and its applications to timber yield studies. *J. For*. 37: 819–820.

VANCLAY, J.K. 1994. Modelling forest growth and yield. Applications to mixed tropical forests. *CAB International*, Wallingford.

WARREN, D. L.; SEIFERT. S. N. 2011. Ecological niche modeling in Maxent: the importance of model complexity and the performance of model selection criteria. *Ecol Appl*, 21: 335–342.

YANG, Y.Q.; TITUS, S.J.; HUANG, S.M. 2003. Modeling individual tree mortality for white spruce in Alberta. *Ecol. Model*. 163, 209–222.

ZEIDE, B. 1993. Analysis of growth equations. *Forest Sci.* 39 (3), 594–616.