

ANÁLISIS Y MODELIZACIÓN DE LA REGENERACIÓN DE *PINUS PINASTER* AIT. EN EL SISTEMA IBÉRICO MERIDIONAL

B. Guerra Burton y F. Bravo Oviedo

Departamento de Producción Vegetal y Recursos Forestales. Universidad de Valladolid. (Campus de Palencia). Avd. Madrid 144. 34004-PALENCIA (España). Correo electrónico: bguerra@pvs.uva.es

Resumen

La regeneración es un proceso clave en la evolución de una masa, pues condiciona de manera importante el futuro desarrollo de la misma. Es por lo tanto útil poder evaluar y predecir esta fase a partir de ciertos parámetros ecológicos y selvícolas, de influencia notable en la germinación y desarrollo de los regenerados. En este estudio se pretende determinar el efecto de distintos tratamientos e intensidades de intervención sobre la viabilidad de la regeneración de *Pinus pinaster* Ait., teniendo en cuenta además las características y variaciones ambientales y efectos de la vegetación competidora o facilitadora, en varias localidades dentro de un área geográfica bastante homogénea. Para ello se lleva a cabo un inventario, evaluando mediante muestreo sistemático las características de los regenerados y aspectos de la estación, de la vegetación y de la masa residual. Posteriormente se recurre a la elaboración de un modelo logístico para predecir el éxito o fracaso de la regeneración en función de las variables ecológicas y selvícolas más significativas. La selección finalmente nos indica la influencia de variables como la cobertura de herbáceas, matorral y restos de corta sobre la supervivencia y desarrollo de los regenerados. La predicción del éxito en la regeneración fue del 55% de las parcelas frente a un éxito observado del 65% de las mismas.

Palabras clave: *Modelo logístico, Pino negral, Competencia, Componentes principales, Encespedamiento*

INTRODUCCIÓN

La regeneración natural, obtenida normalmente por la dispersión de semillas de la masa, constituye una herramienta básica en la silvicultura extensiva mediterránea, que favorece la biodiversidad y la gestión sostenible de los recursos forestales, siempre que se manejen de manera adecuada las características selvícolas y ecológicas. Una elevada proporción de los modelos de crecimiento forestal desarrollados en la actualidad ignoran la simulación del proceso de regeneración debido fundamentalmente a la dificultad de su modelización, al ser un proceso con caracte-

terísticas de estocasticidad y gran variabilidad espacial y temporal. Existen sin embargo algunos estudios que buscan predecir la viabilidad y características de los regenerados en función de multitud de factores (SCHWEIGER & STERBA, 1997; VANCLAY, 1992; FERGUSON & CARLSON, 1993). Este trabajo se centra en determinar el efecto de distintas formas e intensidades de intervención sobre la regeneración lograda, teniendo presente los condicionantes ecológicos, selvícolas y de calidad de estación implicados. Para disminuir la estocasticidad y variabilidad, se centra el estudio en esta primera aproximación en una zona amplia pero menor que los estudios citados,

homogénea en ciertos condicionantes como pueden ser los de tipo climático.

MATERIAL Y MÉTODOS

Para este trabajo se han empleado datos procedentes de 75 parcelas instaladas a finales del 2003 en masas naturales de pino negral de los Arenales de Almazán–Bayubas, en las estribaciones meridionales del sector noroccidental del Sistema Ibérico, en la provincia de Soria. En concreto las parcelas se distribuyeron en tres Montes de Utilidad Pública que fueron sometidos a cortas de regeneración de distinta intensidad, en la modalidad de reserva de árboles en el período comprendido entre 1993 y 2000. En las masas seleccionadas no se había llevado a cabo ningún tipo de siembra ni plantación y estaban reflejados los diferentes tipos de intervención aplicados en la provincia. Las tres localidades presentan unas características climáticas bastante homogéneas, propias de un clima mediterráneo de inviernos rigurosos, con hasta 5 meses de heladas y mínimas absolutas de -22° C. Los veranos son más suaves aunque secos, y las precipitaciones medias anuales no sobrepasan los 500-600 mm. Los suelos de la zona de Almazán, pertenecen a los órdenes entisoles, suelos profundos y de buena estructura e inceptisoles, arenosos de menor profundidad, mientras que en la localidad de Bayubas son más frecuentes los suelos de formación aluvial (argilúvicos), pobres en nutrientes y con baja capacidad de retención de agua (GANDULLO, 1984).

En la evaluación de la regeneración se citan en la literatura una gran variedad de métodos de inventario en función de los objetivos y teniendo en cuenta las peculiaridades de las etapas tempranas del rodal (MATNEY & HODGES, 1991). En particular la tendencia a agruparse de manera contagiosa condicionó el desarrollo de diversos métodos como el denominado Método de existencias por cuadrante (“Stocked Quadrants”) usado en este caso y que define el tamaño de la parcela, en función de los regenerados viables que se estiman necesarios para considerar la regeneración como conseguida. Para esta especie se puede considerar como suficiente, una densidad superior a los 2000 pies/ha, por lo que el

radio de la parcela elegido fue de 2,5 m (19,6 m² de superficie). Estas parcelas se localizaron en los nudos de una malla sistemática de 100 m de lado, cubriendo toda la zona sometida a intervención. Para cada uno de los cuadrantes de la parcela se anotó el número de regenerados, su diámetro en el cuello de la raíz y a 1,3 m, su altura y estado de vigor general así como las características de la estación y de la vegetación acompañante. Además se tomaron muestras de suelo en tres puntos representativos de cada localidad.

En una primera aproximación, tras la caracterización de las variables explicativas, que presentaron gran variabilidad y una elevada correlación entre ellas, se decidió aplicar un análisis estadístico multivariante de componentes principales (PCA) para discernir aquellas que mejor podrían representar de un modo global las características del medio y de la masa residual respectivamente. Se trata de extraer los factores que recojan la mayor parte de la variabilidad del conjunto reduciendo la dimensionalidad producida por un elevado número de variables.

Como lo que se desea predecir fundamentalmente es si la regeneración ha tenido éxito o no, entendiendo por esta definición que existen suficientes pies viables y adecuadamente distribuidos para convertirse en una masa adulta, se decide transformar la variable dependiente; número de regenerados-; en una variable binaria, codificado como 0 si se considera la regeneración fracasada y 1 si se estima que esta ha tenido éxito. Para ajustar un modelo a una variable de este tipo se emplea la regresión logística (PROC LOGISTIC) del paquete estadístico SAS. La ecuación logística recomendada por HAMILTON & BRICKELL (1983) para estimar las probabilidades de un suceso ha sido ya empleado por FERGUSON & CARLSON (1993) y por SCHWEIGER & STERBA (1997) para predecir la probabilidad de regeneración. La selección del mejor modelo se ha basado en diversos parámetros como el criterio de información de Akaike (AIC) y el criterio de comparación de Schwarz. No resulta apropiada la utilización de coeficientes de determinación en este tipo de modelos, sin embargo es importante observar valores de concordancia en la clasificación de observaciones a través de la D de Somer o el valor de c, que es igual al área bajo la curva operacional caracte-

rísticas ROC (Receiver Operating Characteristic) ampliamente usada en la interpretación de estas ecuaciones (ALENIUS et al., 2002) donde se contrastan la sensibilidad; proporción de sucesos positivos correctamente clasificados sobre el total de positivos; frente a la especificidad como proporción de sucesos negativos correctamente clasificados sobre su respectivo total. Al representar sensibilidad y especificidad para diferentes umbrales de probabilidad se obtiene un punto de corte gráfico que ha sido utilizado en estudios de mortalidad; SOARES & TOMÉ (2002) para determinar el mejor umbral de discriminación de probabilidades, aunque otros autores consideran que es la probabilidad media observada la que debe tomarse como umbral de decisión. Esta última opción no se contempla en este estudio debido a la elevada variabilidad, que hace que la media no sea representativa de la situación general de las masas.

RESULTADOS

Del análisis de las variables tanto dependientes como independientes de forma aislada se desprende que la variabilidad de situaciones es elevada, aún en un área de cierta homogeneidad. La densidad de pies viables presenta una media de 5758+5678 pies/ha ($\alpha=0.05$) con un máximo alcanzado de 20371 individuos/ha de manera puntual y una proporción del 35% de las parcelas vacías. Su distribución no se adapta a los parámetros de la normalidad. De entre las variables explicativas las que presentan mayor variabilidad corresponden a la cobertura de herbáceas, matorrales y restos de corta, mientras que otras como la presencia de especies alelopáticas o existencia de piñas presentan valores menores y puntuales. Por otro lado la correlación observada entre muchas de las variables (Coeficiente de Correlación de Pearson) condiciona los resultados y el tipo de análisis que se va a llevar a cabo.

Mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) se seleccionaron tres factores representativos de las coberturas vegetales existentes, en los que la máxima influencia la presentan la cobertura de herbáceas, la altura de las cistáceas; muy abundantes en algunas localidades y los residuos de corta. Seleccionando los tres ejes se lograba explicar un 80,5% de la

variabilidad total, lo que se considera bastante satisfactorio (Figura 1a). Además las variables de menor incidencia dentro de los factores corresponden a variables poco representativas como la presencia de regeneración de otras especies, en general escasa o la presencia de vegetación de efectos alelopáticos constatados, también muy puntual. Por otro lado se seleccionan otros tres factores representativos mayoritariamente de la masa residual como son la distancia al árbol más cercano, la altura de la vegetación arbórea y los tocones presentes en las parcelas. El resto de variables aunque se encontraban representadas dentro de los factores presentaban una importancia mucho menor, como fue el caso del Área Basimétrica residual o la presencia de piñas. Estos tres ejes logran agrupar en tres direcciones bastante bien definidas el 93,5% de la variabilidad absoluta (Figura 1b).

Se generaron una gran variedad de ecuaciones logísticas, tratando de introducir tanto las nuevas variables creadas como las originales y sus transformaciones en la ecuación logística (1). Finalmente, las variables seleccionadas fueron la cobertura de herbáceas y la cobertura de restos de corta, esta última elevada al cuadrado. La expresión del modelo seleccionado resulto ser la siguiente:

$$p = \frac{1}{1 + e^{1.774 - 0.0246 * Herb - 0.00033 * Cort^2}} \quad (2)$$

Donde p es la probabilidad de que exista regenerado viable. *Herb* la cobertura en porcentaje de herbáceas y *Cort* la cobertura en porcentaje de restos de corta.

En la elección del modelo se ha tenido en cuenta que los parámetros sean significativos al 95% y que tengan cierto sentido biológico. El valor umbral establecido para la ecuación seleccionada según el criterio gráfico (Figura 2a), resulta ser de 0,708. Este punto de corte nos proporciona una sensibilidad de 65,3% y una especificidad análoga de 65,4%. La predicción del éxito en la regeneración, considerando como criterio la existencia de una densidad superior a 2000 pies viables por hectárea, fue del 55% de las parcelas frente a un éxito observado del 65% de las mismas. El área bajo la curva ROC (Figura 2b), fue de 0,749 indicando una buena discriminación.

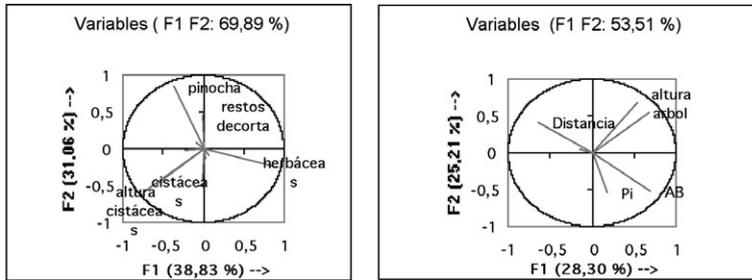


Figura 1. Análisis gráfico de la distribución de las variables sobre los ejes de los componentes principales

DISCUSIÓN

La variabilidad contrastada de los datos, dado el tipo de muestreo sistemático llevado a cabo es indicadora de la distribución agregada típica de la regeneración que ya ha sido encontrada previamente en otras investigaciones (KUULUVAINEN et al., 1993; GONZÁLEZ-MARTÍNEZ Y BRAVO, 2001) aunque otras fuentes establecen que la distribución se puede asimilar a una aleatoria (SZWAGRZYTK et al., 2001). La importancia de la heterogeneidad espacial forestal se hace patente en el proceso de regeneración, pues depende de la existencia y distribución de micrositios específicos que permiten el establecimiento y desarrollo de los regenerados. Las variables explicativas que tratan de definir estos micrositios, favorables o no, presentan también una alta variabilidad espacial, que ya ha sido relacionada con la aparición de la regeneración en otros estudios (SCHWEIGWER & STERBA, 1997; FERGUSON & CARLSON, 1993).

Además de la selección de los factores, el Análisis de Componentes Principales nos proporciona información sobre la relación entre diferentes variables. La representación mediante

ejes ha mostrado lo que se había observado de manera intuitiva, las coberturas más frecuentes producidas por herbáceas, restos de corta y matorral son divergentes, es decir no suelen aparecer de manera simultánea y pueden alcanzar valores elevados. En concreto la pinocha se encuentra en lugares donde no existe una cobertura de herbáceas y musgo y las cistáceas se separan de las dos anteriores, siendo importantes en su definición tanto la cobertura como la altura que alcanzan. Este hecho ha sido empleado en estudios anteriores a través del cálculo del volumen de estas plantas (ALTURO, 1990), que sin embargo no resultó directamente significativo en nuestro caso. Algunos autores han concluido que muchas arbustivas tienen un efecto positivo de facilitación en las primeras fases de la regeneración (CALLAWAY & D’ANTONIO, 1991; CASTRO et al., 2002) y esto puede influir en la falta de significación de este parámetro que producirá un efecto positivo o negativo según las condiciones ambientales. El efecto de las herbáceas, en concreto de las de tipo encespedantes ha sido comprobado en anteriores estudios (MONTERO, 1987; KARLSSON, 2001), mientras otros tipos de cobertura como pueden ser los restos de corta, tienen

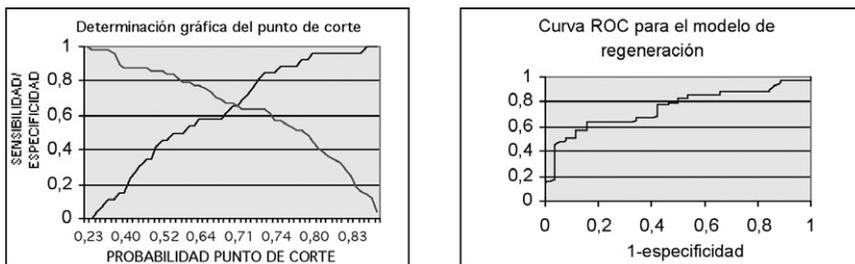


Figura 2. a) Representación del punto de corte a partir del cual se clasifican las parcelas como éxito o fracaso. b) Curva ROC para el modelo de regeneración del pino negral meridional

diferentes interpretaciones, relacionadas con la conservación de mayor humedad y estabilidad de la temperatura en la zona ocupada por estos restos (SMETHURST & NAMBIAR, 1990) a pesar de la barrera espacial que suponen, como en la zona objeto de estudio, donde este efecto se relaciona con el gran tamaño de los mismos y la práctica ausencia de preparación del terreno.

En cuanto a las variables representativas de la masa residual, resultan divididas por ejes bastante claros que separan la influencia de la altura y la distancia a los árboles padre, lo que puede relacionarse con el hecho de tomar esta altura solo cuando el árbol presentaba una influencia directa sobre la parcela, es decir cuando las distancias eran menores. El resto de variables, a excepción de los tocones, representados en el tercer eje, presentan escasa importancia, aunque se tendrán en cuenta en la futura ampliación del estudio, dada la relación con el regenerado que mostraban algunas de ellas en anteriores estudios (SCHWEIGER & STERBA, 1997).

El modelo logístico supone una buena aproximación al fenómeno de la regeneración, ya que facilita la interpretación y aplicación práctica. En el modelo seleccionado las únicas variables explicativas fueron la cobertura de herbáceas y de restos de corta, en contraste con otros modelos logísticos como el elaborado por FERGUSON & CARLSON (1993) para mayor número de especies y para una zona geográfica más amplia que encontraron significativas múltiples variables características de la estación y de la masa residual así como otras indicativas de la preparación del terreno. SCHWEIGER & STERBA (1997) también encontraron esta relación logística con variables ecológicas y descriptivas del estado de desarrollo de la masa. El modelo elegido en este trabajo abarca unas condiciones de estación y tratamiento bastante homogéneas lo que permite un análisis detallado de aspectos de cobertura y características de la masa residual, pero disminuye considerablemente las variables que se pueden incluir de manera efectiva en el modelo.

CONCLUSIONES

Es esta una primera aproximación al estudio de la regeneración y supervivencia del pino

negral, en el sector soriano del Sistema Ibérico Meridional; que deberá ampliarse en cuanto a parcelas empleadas, área geográfica y variables a considerar. Los resultados nos indican la importancia de la influencia de la cobertura vegetal sobre las edades tempranas de las masas forestales. Se trata de un modelo bastante práctico, basado en medidas sencillas y comunes a la mayoría de los análisis de la regeneración, útil para establecer una clasificación de la viabilidad y determinar la necesidad de diferentes intervenciones selvícolas. El hecho de que variables de cobertura de especies herbáceas y restos de corta, hayan resultado más importantes que la presencia de piñas o variables de masa, hace pensar en la importancia en esta zona de llevar a cabo tratamientos sobre el suelo que permitan la adecuada instalación de las plántulas. La consecución de una adecuada regeneración será mayor cuanto menor sea la cobertura tanto de herbáceas como de restos de corta, lo que implica que estos son los mayores condicionantes de la gestión. Sin embargo no debemos olvidar que las predicciones se ven afectadas por criterios de definición de la regeneración lograda y decisiones de muestreo, que deben ser contrastados en posteriores ampliaciones de este estudio.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto AGL2001-1780 del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (2000-2003) y por una beca de personal investigador de la Junta de Castilla y León. Los autores quieren expresar su agradecimiento al personal del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Segovia por la información y ayuda prestada.

BIBLIOGRAFÍA

- ALENIUS, V.; HÖKKÄ, H. & SALMINEN, H; 2002. Evaluating logistic regression models with special reference to modelling individual tree mortality. *In: Reality, models and parameter estimation-the forestry scenario Congress*. Sesimbra (Portugal).

- ALTURO, R.A.; 1990. *Estudio sobre la regeneración natural de Pinus uncinata en masas del Pirineo Central*. Inédito. E.T.S.I.M. de Madrid. Madrid.
- CALLAWAY, R. & D'ANTONIO, J.; 1991. Shrub facilitation of coast live oak establishment in central California. *Madroño* 38: 158-169.
- CASTRO, J.; ZAMORA, R.; HÓDAR, J.A. Y GÓMEZ, J.M.; 2002. The use of shrubs as nurse plants: a new technique for reforestation in Mediterranean mountains. *Rest. Ecol.* 10(2): 297-305.
- FERGUSON, D.E. & CARLSON, C.E.; 1993. Predicting regeneration establishment with the Prognosis Model. *Intermountain Research Station Research Paper* INT-463.
- GANDULLO, J.M.; 1984. *Clasificación básica de los suelos españoles*. Ed. Fundación Conde del Valle Salazar. ETSIM Madrid. Madrid.
- GONZÁLEZ MARTÍNEZ, S.C. & BRAVO, F.; 1997. Density and population structure of the natural regeneration of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the High Ebro Basin (Northern Spain). *Ann. For. Sci.* 58: 277-288.
- HAMILTON, D.A. & BRICKELL, J.E.; 1983. Modelling methods for a two state system with continuous responses. *Can. J. For. Res.* 13: 1117-1121.
- KARLSSON, M.; 2001. *Natural regeneration of Broadleaved Tree Species in Southern Sweden. Effects of silvicultural treatments and seed dispersal from surrounding stands*. Doctoral Thesis Swedish University of Agricultural Sciences. Alnarp
- KUULUVAINEN, T.; 1993. Factors related to seedling growth in a boreal Scots pine stand: a spatial analysis of a vegetation-soil system *Can. J. For. Res.* 23:2101-2109.
- MATNEY, T.G. & HODGES, J.D.; 1991. Evaluating regeneration success. In: M.L. Duryea & P.M. Dougherty (eds.) *Forest regeneration manual*. Kluwer Academic Publishers. Dordret.
- MONTERO, G.; 1987 *Primera Revisión del Proyecto de Ordenación del monte "Cabeza de Hierro" Rascafría*. (inédito). Madrid.
- MONTERO, G.; 1994. Generalities on silvicultura of *Pinus sylvestris* L. in Spain. *Inv. Agr., Sist. Rec. For.* Fuera de Serie 3: 251-259.
- SMETHURST, P.J. & NAMBIAR, E.K.S.; 1990. Effects of slash and litter management on fluxes of nitrogen and tree growth in a young *Pinus radiata* plantation. *Can. J. For. Res.* 20: 1498-1507.
- SCHWEIGER J. & STERBA H.; 1997. A model describing natural regeneration recruitment of norway spruce (*Picea abies* (L.) Kars.) in Austria. *For. Ecol. Manage.* 97: 107-118.
- SOARES, P. & TOME M.; 2002. GLOBTREE, an individual growth model for Eucalypt in Portugal. In: *Reality, models and parameter estimation-the forestry scenario Congress*. Sesimbra (Portugal).
- SZWAGRZYK, J.; SZEWCZYK J. & BODZIARCZYK J.; 2001. Dynamics of seedling banks in beech forest: results of a 10-year study on germination, growth and survival *For. Ecol. Manage.* 141: 237-250.
- VANCLAY, J.K.; 1992. Modelling regeneration and recruitment in a tropical rain forest. *Can. J. For. Res.* 22: 1235-1248.