

ALBA UM MODELO DE CRESCIMENTO EM ÁREA BASAL PARA POVOAMENTOS DE EUCALIPTO

ANA AMARO*¹, MARGARIDA TOMÉ**, ISABEL THEMIDO*

* CESUR, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, AV. ROVISCO PAIS, LISBOA

** DEF, INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA, TAPADA DA AJUDA, LISBOA. ¹MORADA CORRESPONDÊNCIA: IBET UNIDADE PILOTO, QUINTA DO MARQUÊS, AP.12, 2780 OEIRAS

RESUMO

Os modelos de povoamento para eucalipto, existentes em Portugal baseiam-se numa estrutura de sub-modelos, sendo o da área basal um dos seus componentes. Estes modelos foram parametrizados com conjuntos de dados não representativos das condições gerais do país, não sendo passíveis de generalização à escala nacional. Com base em dados de inventário florestal de uma empresa, apresenta-se uma metodologia de desenvolvimento de um modelo de crescimento em área basal, de âmbito nacional.

O modelo ALBA é seleccionado e parametrizado, de um conjunto de modelos candidatos e é finalmente submetido a um processo de validação efectuado com base em conjuntos de dados independentes, sendo ainda avaliada a sua precisão. Discute-se a sua validade e forma de utilização.

P.C. Área basal, regressão não linear, estimação de parâmetros, regionalização de modelos

SUMMARY

Stand growth models previously developed for Eucalyptus plantations in Portugal are based on a structure of submodels, the basal area model being one of its components. These available models were parametrized with data sets that are not representative of the overall growing conditions in the country therefore not being suitable for a generalized application over the whole country. A methodology for the development of national models, based on forest inventory data from a pulp and paper company is discussed.

The model presented - ALBA - was selected from a set of candidate models. ALBA model was then submitted to a validation process with independent data sets and the respective precision assessed. Its validity and usefulness is discussed.

K.W. basal area, non-linear regression, parameter estimation, regional models.

INTRODUÇÃO

Existem essencialmente três modelos de crescimento e produção para povoamentos de eucalipto em Portugal: os modelos GLOBUS (Tomé *et al.*1995), EUSOP (Tomé *et al.*1995) e SOP (Amaro 1997). São modelos determinísticos, constituídos por uma estrutura de sub-modelos relativos ao crescimento em altura dominante e área basal que, combinados numa relação alométrica, permitem estimar o volume de madeira produzido em idades sucessivas. Foram desenvolvidos com base em conjuntos de dados provenientes de parcelas permanentes e de inventário florestal, pertencentes a empresas de produção de pasta de papel.

O modelo SOP foi desenvolvido na sequência dos modelos GLOBUS e EUSOP, essencialmente devido a dois factores: 1) o desajustamento observado entre simulações do crescimento (Amaro & Tomé 1996) e a realidade associada a povoamentos de eucalipto pertencentes a universos diferentes dos utilizados na identificação e parametrização daqueles e 2) a identificação de factores edafoclimáticos como fundamentais na classificação dos povoamentos relativamente à sua produtividade resultando num conjunto de Unidades de Gestão de Informação (UGI) (Amaro *et al.* 1994).

Com o objectivo imediato de definir um modelo de crescimento em área basal, para o património florestal de uma empresa e um subsequente de, no futuro, desenvolver um modelo de nível nacional, efectua-se uma descrição da metodologia utilizada na selecção das funções candidatas e na sua parametrização, assim como os resultados obtidos e principais conclusões.

MATERIAL E MÉTODOS

O conjunto de dados utilizado para a identificação do sub-modelo da área basal para povoamentos de eucalipto, e conseqüentemente na estimação dos seus parâmetros, foi recolhido de uma base de dados de inventário florestal contínuo, referente aos anos de 1992 a 1994. As parcelas de inventário estão bem disseminadas pela área ocupada por propriedades da empresa, pretendendo ser uma amostra espacialmente representativa do seu património.

Foi efectuada uma análise preliminar da informação que resultou, não só na eliminação de informação resultante de erros (por ex. medição, armazenamento), como à eliminação aleatória de dados, com o objectivo de atingir a representatividade necessária. O resultado final foi um ficheiro de dados com 5452 observações, classificadas em duas grandes regiões de produtividade (Fig.1), resultantes da sobreposição das 7 UGIs que caracterizam o património florestal da empresa (Amaro *et al.* 1994), devidamente caracterizadas em termos edafoclimáticos e de produtividade, com a informação disponível. Com o objectivo de identificar possíveis relações entre variáveis analisou-se, graficamente e quantitativamente, o seu comportamento.

- *Equações candidatas.* São inúmeras as funções que potencialmente podem ser utilizadas para a modelação empírica das variáveis de crescimento, como por exemplo a área basal (por ex. Carvalho 1992, Quicke 1993 & Tomé 1988). A maior parte destas funções apresenta um comportamento sigmóide, sendo algumas delas casos particulares de outras funções com maior número de parâmetros (por ex. as funções *Monomolecular* e de *Schumacher* (Tomé 1988 e Carvalho 1992), como casos particulares da função de *Richards* e *Lundqvist* respectivamente). Por outro lado, análises anteriores mostraram existir, sistematicamente, um subconjunto desses modelos rejeitado. Assim, consideram-se apenas as funções de *Richards* e de *Lundqvist-Korf* e a equação de *McDill-Amateis*, deduzida por estes dois autores, em 1989 (Amateis & McDill, 1989).

As funções de *Richards* e de *Lundqvist-Korf* são apresentadas, em geral, sob a forma integral ou diferencial. Contudo, quando se utilizam medições sequenciais (neste caso a área basal de um povoamento em momentos diferentes, correspondendo-lhes diferentes idades), com o objectivo de projectar a variável de resposta em intervalos de tempo discretos (diferentes idades de projecção) é comum exprimir tais funções sob a forma de equações às diferenças (por ex. Borders 1989). A equação de *McDill e Amateis* foi deduzida directamente sob a forma de uma equação às diferenças.

Assim, as equações de *Richards* e *Lundqvist-Korf*, sob a forma integral (cada uma com 3 parâmetros a estimar) e a equação às diferenças de *McDill e Amateis* resultaram num conjunto de 7 equações candidatas ao modelo da área basal. Todas estas equações têm a propriedade de serem invariantes com o intervalo de projecção considerado: uma projecção efectuada num povoamento com t_1 anos para t_2 anos (intervalo de projecção t_2-t_1), e com t_2 anos para t_3 anos (intervalo de projecção t_3-t_2), tem o mesmo valor que, directamente, com t_1 anos para t_3 anos (intervalo de projecção t_3-t_1). Uma análise mais detalhada das propriedades destas funções pode ser vista em Amaro (1997).

- *Estimação de parâmetros e selecção da função.* Pelo facto dos modelos candidatos serem não lineares, a estimação dos parâmetros foi efectuada de forma iterativa, a partir de um conjunto de valores iniciais, utilizando algoritmos que convergem para o mínimo da função objectivo, coincidente com o critério dos mínimos quadrados (StatSoft, Inc. 1995 & SPSS Inc. 1993).

As 7 equações candidatas foram ajustadas ao conjunto de dados considerando a sua totalidade (equações nacionais) e o seu agrupamento nas duas regiões de produtividade potencial diferente (equações regionais). Com base em critérios biológicos (por ex. o significado dos parâmetros e respectivos valores estimados) e estatísticos (por ex. resíduo médio (RM), coeficiente de determinação (r^2), valor médio da soma dos quadrados dos resíduos (MSQR)) seleccionou-se a equação candidata que melhor desempenho pareceu demonstrar para a simulação do crescimento dos povoamentos de eucalipto em área basal.

Pelo facto de se observar uma relação (teórica e real) entre a área basal e a densidade de plantação por um lado e a classe de qualidade, por outro, e se dispor desta informação, quer observada (número de plantas por hectare), quer estimada (classe de qualidade), a equação pré-seleccionada foi modificada por forma a reduzir a percentagem de variação não explicada. A decisão relativa aos diferentes modelos obtidos a partir da mesma forma funcional e aos modelos nacionais e regionais (com a utilização de variáveis artificiais) foi efectuada utilizando o teste da razão de verosimilhanças (Draper & Smith 1981).

O sub-modelo ALBA foi desenvolvido na sequência do sub-modelo da altura dominante, ALDO. Com o objectivo de eliminar possíveis efeitos no enviesamento e/ou precisão das estimativas dos parâmetros obtidas não só para o ALBA como para o ALDO, efectuou-se a estimação simultânea dos seus parâmetros, recorrendo a métodos de regressão não linear ponderados.

Para validar o modelo ALBA utilizaram-se dois conjuntos de dados independentes provenientes de parcelas permanentes. Mais detalhes sobre os processos utilizados na selecção dos modelos candidatos, ajustamento do modelo final e validação podem ser encontrados em Amaro (1997).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para qualquer um dos 7 ajustamentos efectuados, quer considerando o modelo nacional quer o regional, através da análise gráfica dos resíduos associados a cada modelo candidato, não se identificaram padrões de heterogeneidade na variância nem distribuições com padrões muito diferentes do da distribuição Normal. Deste modo foi testada a hipótese de existência de modelos nacionais em detrimento da hipótese de modelos regionais tendo-se rejeitado, em todos os casos, a hipótese nula.

Considerando os modelos regionais é a equação de *Lundqvist-Korf* com o parâmetro livre k que melhor parece ajustar-se aos dados, com coeficiente de determinação igual a 0.9723 e valor médio da soma dos quadrados dos resíduos igual a 0.5755. Considerando os desvios padrão assintóticos das estimativas, em termos do seu valor relativo, é a equação de *Richards* (k) a que apresenta melhores resultados, apresentando, também baixos níveis para a correlação entre parâmetros. Contudo, o valor estimado da assíntota é, do ponto de vista biológico, mais restritivo que o dos restantes três modelos. É ainda ao modelo de *Lundqvist-Korf* (k) que corresponde o menor enviesamento do modelo (RM), sendo o único que produz estimativas não significativamente diferentes de zero. Com o resultado de uma primeira fase seleccionou-se a equação de *Lundqvist-Korf* com parâmetro livre k como a que melhor se ajusta ao conjunto de dados.

Apesar do modelo proposto pela equação de *Lundqvist-Korf* (k) produzir resíduos com comportamento que não se afasta dos pressupostos associados à componente estocástica dos modelos, o facto da área basal ter, teoricamente, relações de dependência com variáveis de

povoamento, como por exemplo o número de árvores vivas por hectare ou ainda a classe de qualidade do local (por ex. Oliver e Larson, 1990), que na prática também se verificaram, levou à tentativa de melhorar o modelo através da relação de(os) parâmetro(s) com aquelas variáveis.

Através do modelo ALDO (Amaro *et al.* em public.) procedeu-se à estimação da classe de qualidade para cada parcela de inventário, considerando a idade de referência de 10 anos. Constatou-se que, para ambas as regiões e povoamentos da mesma idade, a área basal é tanto maior quanto maior a classe de qualidade. Independentemente da idade do povoamento também se observou que, sobretudo nas classes de qualidade superiores, a área basal é tanto maior quanto maior a densidade de plantação. Deste modo, consideraram-se modificações ao nível dos parâmetros com o objectivo de incluir a influência destas variáveis. Estas modificações tiveram sempre em atenção o facto das equações resultantes continuarem a usufruir da propriedade de invariância das estimativas com o intervalo de projecção.

Finalmente, o modelo seleccionado, o modelo ALBA, é dado pela seguinte expressão:

$$Ab_2 = A \left(\frac{Ab_1}{A} \right)^{\left(\frac{t_1}{t_2} \right)^n}$$

sendo Ab_2 e Ab_1 a área basal do povoamento (em m^2ha^{-1}) para as idades t_1 e t_2 , respectivamente, em anos e A e n definidos no Quadro 1.

Pelo facto do modelo ALBA se basear numa função formulada sob a forma de uma equação às diferenças, um dos parâmetros característicos da função, e neste caso o parâmetro k , é determinado para cada observação, em função das condições iniciais (i.e t_1 e Ab_1), classe de qualidade (CQ) e ainda o número de plantas vivas por hectare ($nplv1$), no momento a partir do qual se pretende efectuar a projecção, sendo assim um parâmetro de características locais. O parâmetro k , representa, mantendo constantes a assíntota e o parâmetro n , uma taxa específica de crescimento, sendo o seu valor inversamente proporcional à velocidade com que o povoamento cresce em área basal. A sua determinação é efectuada através da equação:

$$k = -t_1^n \ln \frac{Ab_1}{A}$$

em que A e n estão definidos no Quadro 1 para as diferentes regiões. O ponto de inflexão, ou seja o ponto em que a taxa de crescimento é máxima é dado pelo par de valores:

$$\left(t = \left(\frac{nk}{n+1} \right)^{\frac{1}{n}}, Y = Ae^{-\frac{n+1}{n}} \right)$$

e, para os povoamentos considerados, atinge-se, de uma forma geral, antes dos 7 anos de idade (Fig. 2) Contudo, enquanto que nas regiões mais produtivas o ponto de inflexão é atingido com valores de área basal próximos dos $4-5 m^2ha^{-1}$, nas regiões do interior, menos produtivas, o seu valor tem uma gama de variação maior e é, em geral, inferior a $4 m^2ha^{-1}$.

O processo de validação permitiu concluir que o modelo ALBA se caracteriza por efectuar projecções com um ligeiro enviesamento, que se traduz por estimativas por defeito, se bem que, estatisticamente, não se rejeite a hipótese de modelos não enviesados. O modelo é mais eficiente nas regiões de maior produtividade (96%) correspondendo-lhe 93% de eficiência para as regiões do interior. Ao referenciar a precisão das estimativas à idade inicial dos povoamentos (i.e. a idade a partir da qual se efectuam as projecções), constata-se que para idades inferiores a cinco anos o erro relativo à área basal inicial é, assumindo graus confiança iguais a 95%, da ordem dos 22% e 53% para a região litoral e intervalos de projecção de um e dois anos respectivamente. Para a região interior estas valores são superiores e da ordem do 44% e 85% respectivamente. A relação entre os parâmetros estimados para cada conjunto de situações iniciais analisado, pela sua menor dispersão associa ao sub-modelo do litoral maior robustez que ao da região interior. Este facto pode ser devido à reduzida idade dos povoamentos mais velhos na região interior (a maioria com menos de 8 anos). Em geral, as observações correspondem a povoamentos com menos de 12 anos

de idade. Os resultados obtidos pelo modelo para povoamentos com idades superiores deverá ser analisado com precaução, uma vez que as simulações efectuadas permitem observar uma coincidência possível de valores de área basal para idades inferiores em regiões de produtividade diferente, não sendo isto possível na maioria dos casos para idades superiores (Fig. 3). Para idades iniciais do povoamento superiores a cinco anos, para a região litoral os erros absolutos são inferiores a 16% e aproximadamente constantes com o aumento da idade, enquanto que nas regiões menos produtivas são apenas inferiores a 28%, verificando-se redução com o aumento da idade.

CONCLUSÕES

O sub-modelo ALBA resultou do processamento de um conjunto de dados amostra, representativo do património florestal da empresa. Através da utilização de um conjunto de critérios biológicos e estatísticos seleccionou-se um primeiro modelo, baseado na formulação da equação de *Lundqvist-Korf* como equação às diferenças com o parâmetro livre k . Pelo facto de se observarem, quer teoricamente, quer na prática, relações entre a área basal e variáveis como o número de plantas por hectare e a classe de qualidade do local, procedeu-se à modelação dos parâmetros A e n em função destas variáveis. O modelo ALBA estima o valor da área basal em função das características do povoamento na idade de início da simulação (idade, área basal, classe de qualidade e número de plantas por hectare), para duas regiões de produtividade potencial diferente.

O sub-modelo ALBA parametrizado para a região do litoral é mais fiável que o estimado para a região do interior, devendo este ser utilizado com precaução. Por outro lado, para efectuar previsões para povoamentos com mais de 12 anos a análise dos resultados deverá igualmente ser efectuada com precaução. O enviesamento nas projecções observado no processo de validação pode resultar do facto desta variável ser influenciada pelas condições edafoclimáticas e eventualmente outros factores como as técnicas de condução dos povoamentos, não sendo o modelo ALBA de aplicação directa.

Neste contexto é importante a parametrização de um modelo de nível nacional, mas de âmbito regional, sendo prioritária a utilização de classificações edafoclimáticas do país (por ex. Oliveira, 1997) e a exploração de outros aspectos relevantes para o crescimento em área basal. Será interessante avaliar também o impacte da não existência de observações na fase estacionária da curva, isto é na região da assíntota, na eficiência dos estimadores utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMARO, A. 1997 - *Modelação do crescimento de povoamentos de Eucalyptus globulus Labill em 1ª rotação. O património florestal de uma empresa*. Diss. Dout. Inv. Op. Eng. Sist. IST. UTL.

AMARO, A. THEMIDO, I. & TOMÉ, I. 1994 - A definição de unidades de gestão de informação num sistema de apoio à decisão para a gestão florestal. *III Cong. Flor. Actas 1, Figueira da Foz:74-82*.

AMARO, A, REED, D., TOMÉ, M. & THEMIDO, I. - Modeling Dominant Height Growth: Eucalyptus Plantations in Portugal. *For. Sci.* (em public.)

AMARO, A. & TOMÉ, M. 1996 - The use of GLOBUS and EUSOP stand models in Portugal. Some preliminary results. In Päivinen, R., Roihuvuo, L. & Siitonen M. (Ed.) (1996) - *Large scale forestry scenario models: experiences and requirements*. EFI proceedings 5:193-204.

AMATEIS, R.L., MCDILL, M.E. (1989) - Developing growth and yield models using dimensional analysis. *For. Sci.* 35(2): 329-337.

BORDERS, B.E. 1989 -Systems of equations in forest stand modeling. *For. Sci.* 35(2):548-556.

CARVALHO, A. 1992 - *Modelação Dinâmica do Crescimento em Área Basal de Povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. na Região Centro do País. Selecção e validação de Funções Candidatas*. Relatório do trabalho de fim de curso de Eng. Flor. UTL. ISA.

DRAPER, N.R. & SMITH, H. 1981 - *Applied regression analysis*. NY. Wiley. 2nd ed.

OLIVER, C.D.; LARSON, B.C. 1990 - *Forest Stand Dynamics*. Biol. Res. Manag. Series. McGraw-Hill.

OLIVEIRA, J.P. 1997 - *Classificação blá blá*. Diss Mestre Inv. Op. Eng. Sist. IST. UTL.

QUICKE, H.E. 1993 - Basal area growth of individual trees in thinned, even-aged stands of Longleaf Pine. In Proc. of the IUFRO S4.01 Conf. *Modelling Stand Response to Silvicultural Practices*. Blacksburg, Virginia, USA.

SPSS Inc. 1993 - SPSS Base System Syntax Reference Guide, Release 6.0.

STATSOFT, INC. 1995 - STATISTICA for Windows (Computer program manual). Tulsa, OK.

TOMÉ, M. 1988 - *Modelação do Crescimento da Árvore Individual em Povoamentos de Eucalyptus globulus Labill. (1ª rotação). Região Centro de Portugal*. Tese de Dout. Eng. Silvícola. UTL. ISA.

TOMÉ, T., FALCÃO, A., CARVALHO, A. & AMARO, A. 1995 - "A global growth model for eucalypt plantations in Portugal". *Lesnictví-Forestry*, 41(4): 197-205.

Figura 1 - Relação entre a área basal dos povoamentos de eucalipto e a sua idade para as regiões do litoral e interior.

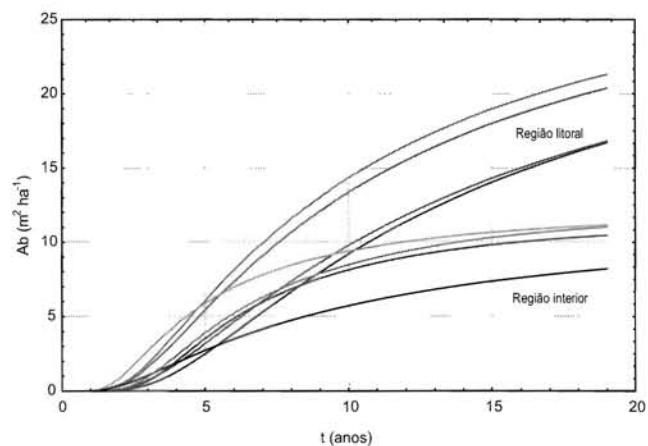
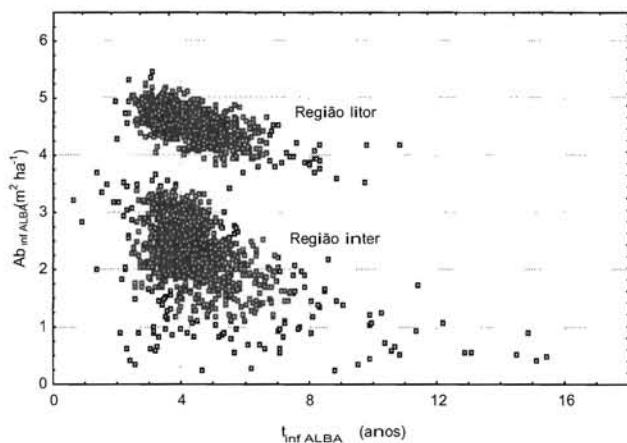
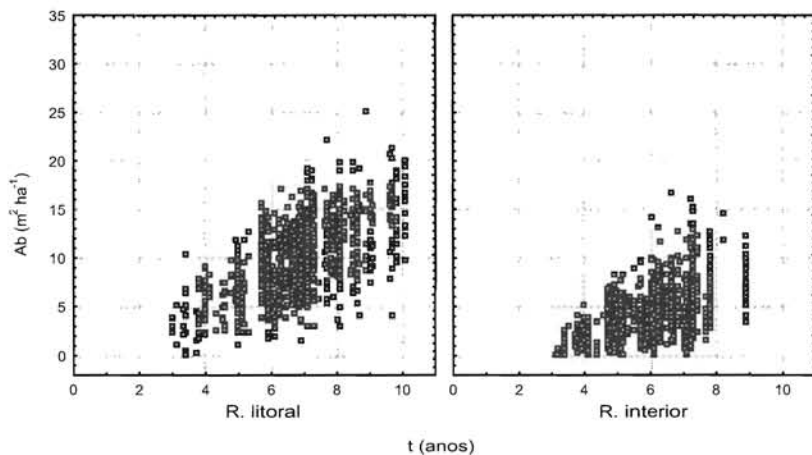


Figura 2 - Localização do ponto de inflexão associado ao modelo ALBA nas regiões do litoral e interior.

Figura 3 - Representação gráfica de simulações do crescimento em área basal, utilizando o modelo ALBA. Os parâmetros foram calculados a partir de observações seleccionadas aleatoriamente da base de dados do conjunto de parametrização.

Região	A	n
Interior	0.815744 CQ	0.222791+0.001723 nplv1
Litoral	23.6672+0.434631 CQ	0.805235+0.000221 nplv1

Quadro 1 - Caracterização dos parâmetros A e n do modelo ALBA para as regiões litoral (UGIs 1, 2, 4 e 6, Amaro *et al.* 1994) e interior (UGIs 3, 5 e 7, Amaro *et al.* 1994). (CQ- classe de qualidade e nplv1 - número de plantas vivas por hectare)