

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/248305881>

Programação dinâmica e gestão de povoamentos com estrutura regular e composição pura. Aplicação à Mata Nacional de Leiria

Article · January 1999

CITATIONS

10

2 authors

 G. G. Borges
University of Lisbon
272 PUBLICATIONS 2,478 CITATIONS
[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:

-  The Management of Industrial Forest Plantations, Theoretical Foundations and Applications [View project](#)
-  FORESYS [View project](#)

READS

110

 André D. Falcão
University of Lisbon
79 PUBLICATIONS 1,122 CITATIONS
[SEE PROFILE](#)

PROGRAMAÇÃO DINÂMICA E GESTÃO DE POVOAMENTOS FLORESTAIS COM ESTRUTURA REGULAR E COMPOSIÇÃO PURA

APLICAÇÃO À MATA NACIONAL DE LEIRIA

*A programação dinâmica é uma técnica de investigação operacional que conhece larga aplicação em problemas de gestão de povoamentos florestais com estrutura regular e composição pura. O modelo contribui para a solução eficiente do problema da determinação simultânea da idade óptima de corte, da existência óptima em cada idade e da modalidade óptima de regeneração. Neste artigo, introduzem-se conceitos chave para o desenho e solução de modelos de programação dinâmica com o objectivo de determinar a revolução, regime de desbastes e regeneração óptimos em povoamentos regulares de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait). A rede que representa gráficamente o problema de gestão e o método de solução são apresentados com base num exemplo simples. Demonstra-se a utilização de ferramenta informática desenvolvida com vista a aplicar a programação dinâmica à gestão de povoamentos florestais na Mata Nacional de Leiria. No desenho do modelo, o estágio é definido pela idade do povoamento e o estado pela respectiva área basal. Discutem-se soluções para problemas definidos de acordo com a silvicultura praticada na Mata Nacional de Leiria.*

Palavras-chave: *modelos de decisão, gestão de povoamentos florestais com estrutura regular, programação dinâmica.*

JOSÉ GUILHERME BORGES E ANDRÉ FALCÃO

INTRODUÇÃO

O conceito de explorabilidade é utilizado em Portugal para distinguir os objectivos de gestão de povoamentos florestais (ALVES, 1966; MARTINS & HALL, 1995; PÁSCOA, 1997). A classificação das explorabilidades é acompanhada pela definição de indicadores (e.g. acréscimos em volume, rendimento actual líquido) que permitem, em cada um dos casos, determinar o termo de explorabilidade. Este corresponde, no caso dos povoamentos equiénios, à revolução que melhor servirá aqueles objectivos. No entanto, e independentemente do objectivo de gestão, a decisão em povoamentos com estrutura regular e composição pura envolve três opções predominantes. A primeira consiste na definição do

tipo de regeneração a considerar. A segunda envolve a definição da existência do povoamento em cada idade, i.e., do regime de desbastes. Finalmente, a terceira envolve a definição do momento do corte final, i.e., da revolução.

A optimização da gestão de um povoamento florestal consiste na solução simultânea destes três problemas. Esta recorre a critérios operacionais que permitam avaliar a adequação de opções alternativas para alcançar os objectivos de gestão. O volume de lenho e os fluxos de outros bens e serviços florestais, e o rendimento líquido actual (RLA) são exemplos de indicadores úteis que quantificam o impacto de alternativas de regeneração, de desbastes e de revolução sobre aqueles objectivos. Na generalidade dos casos, a oferta de produtos não lenhosos ou de serviços florestais não deverá ser pensada à escala espacial do povoamento. A biodiversidade, os valores estéticos e a susceptibilidade

Departamento de Engenharia Florestal

Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa

joseborges@isa.utl.pt, andrefalcao@isa.utl.pt

a perturbações como o fogo são características ambientais da paisagem florestal (BORGES & HOGANSON, 1999) pelo que importará considerar as interações de decisões nos povoamentos que a integram. No entanto, não existe obstáculo conceptual à utilização de um indicador como o RLA no caso de objectivos ou explorabilidades que não contemplem apenas a produção de lenho. A literatura apresenta exemplos de utilização deste indicador nestas circunstâncias (e.g. KEMPER & DAVIS, 1976; DAVIS & JOHNSON, 1987).

No processo de tomada de decisão em povoamentos florestais, após a definição de objectivos de gestão e a selecção dos critérios ou indicadores a utilizar, há que enumerar opções técnicas adequadas. Estas definem as alternativas de gestão que é comum designar também por prescrições silvícolas. No caso dos povoamentos com estrutura regular, uma prescrição poderá envolver uma modalidade de regeneração, fertilizações, limpezas, um regime de desbastes e uma revolução. Na Mata Nacional de Leiria (MNL), por exemplo, uma prescrição típica incluiria o aproveitamento da regeneração natural, uma limpeza aos 15 anos, desbastes quinquenais no período entre os 20 e os 50 anos de idade e, finalmente, um corte raso aos 80 anos (GOMES, 1990). Em geral, o número de prescrições possíveis, que decorre de combinações adequadas de idades para o corte final, de regimes de desbastes e de tipos de regeneração é muito elevado. Em consequência, a optimização da gestão de um povoamento, i.e., a selecção da prescrição que maximiza o indicador utilizado (e.g. RLA), é computacionalmente intensiva. O esforço computacional exigido evidencia a vantagem de recorrer a um método de solução eficiente. A programação dinâmica (PD) surge como técnica adequada para resolver este tipo de problema.

FORMULAÇÃO DE UM PROBLEMA DE DECISÃO EM POVOAMENTOS PUROS E REGULARES COM RECURSO A PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A PD consiste numa técnica de investigação operacional para a maximização (minimização) de funções lineares ou não lineares que se baseia na decomposição do problema original em subproblemas ou estágios (TAHA, 1992). Pode ser utilizada para resolver problemas que envolvem uma sequência de intervenções ao longo do tempo, o que sugere o potencial para aplicações florestais. AMIDON e AKIN (1968) caracterizaram a vantagem da PD relativamente à análise marginal tradicional para a solução de problemas de gestão em povoamentos equiênicos. Especificamente, evidenciaram a flexibilidade do modelo e a sua eficiência na

análise da sensibilidade da solução óptima a alterações nos preços ou na taxa de actualização. O número de aplicações florestais da PD cresceu desde então de forma substancial (e.g. BRODIE *et al.*, 1978; CHEN *et al.*, 1980; MARTIN & Ek, 1981; RIITERS *et al.*, 1983; HAIGHT *et al.*, 1985; ARTHAUD & KLEMPERER, 1988; FILIUS & DUL, 1992; GUO & PEYRON, 1995; PELKKI, 1997).

O recurso a um exemplo permite uma percepção mais fácil das características da PD e da sua aplicação em gestão de povoamentos com estrutura regular. Considere-se um povoamento na MNL pertencente à classe de qualidade de 20 m. Admita-se uma versão simplificada do modelo DUNAS (FALCÃO, 1998) para a projecção do seu crescimento. Nesta versão, o crescimento em área basal (AB) exprime-se em função de apenas uma das duas equações consideradas no modelo. Admita-se ainda como adequadas para a gestão deste povoamento as seguintes opções técnicas:

- Aproveitamento da regeneração natural.
- Desbastes obrigatórios aos 20 e aos 40 anos removendo no mínimo 1 m²/ha de AB. As áreas basais após um desbaste deverão ser iguais a 18, 21 ou 24 m²/ha.
- Cortes finais aos 40, 60 ou 80 anos.

Esta simplificação da silvicultura praticada na MNL tem por objectivo ilustrar a aplicação da PD. Os fluxos de volume que resultam dos cortes afastam-se dos valores encontrados na MNL visto que o modelo DUNAS foi desenvolvido com base na silvicultura ali praticada.

As prescrições ou alternativas de gestão que resultam destas opções técnicas podem ser representadas em rede (Figura 1). Esta é definida por nós (ou estados) que caracterizam a existência do povoamento em determinada idade, e por arcos que ligam os nós e que correspondem a uma intervenção. Neste caso, a caracterização da existência faz-se em termos de AB, razão pela qual se convencionou designar a AB como variável de estado no modelo de PD.

No desenho da rede está implícita a especificação de um intervalo de 3 m²/ha entre os valores de AB em cada idade. Aos 20 anos, por exemplo, de acordo com o modelo de crescimento e as opções técnicas especificadas, o povoamento poderá ter uma AB de 18 ou de 21 m²/ha. Neste último caso, é possível realizar um desbaste aos 40 anos que deixa uma AB residual de 24 m²/ha. Esta intervenção é representada pelo arco a tracejado na Figura 1. Os resultados das intervenções associam-se aos arcos. O desbaste representado pelo arco a tracejado, por exemplo, remove um volume

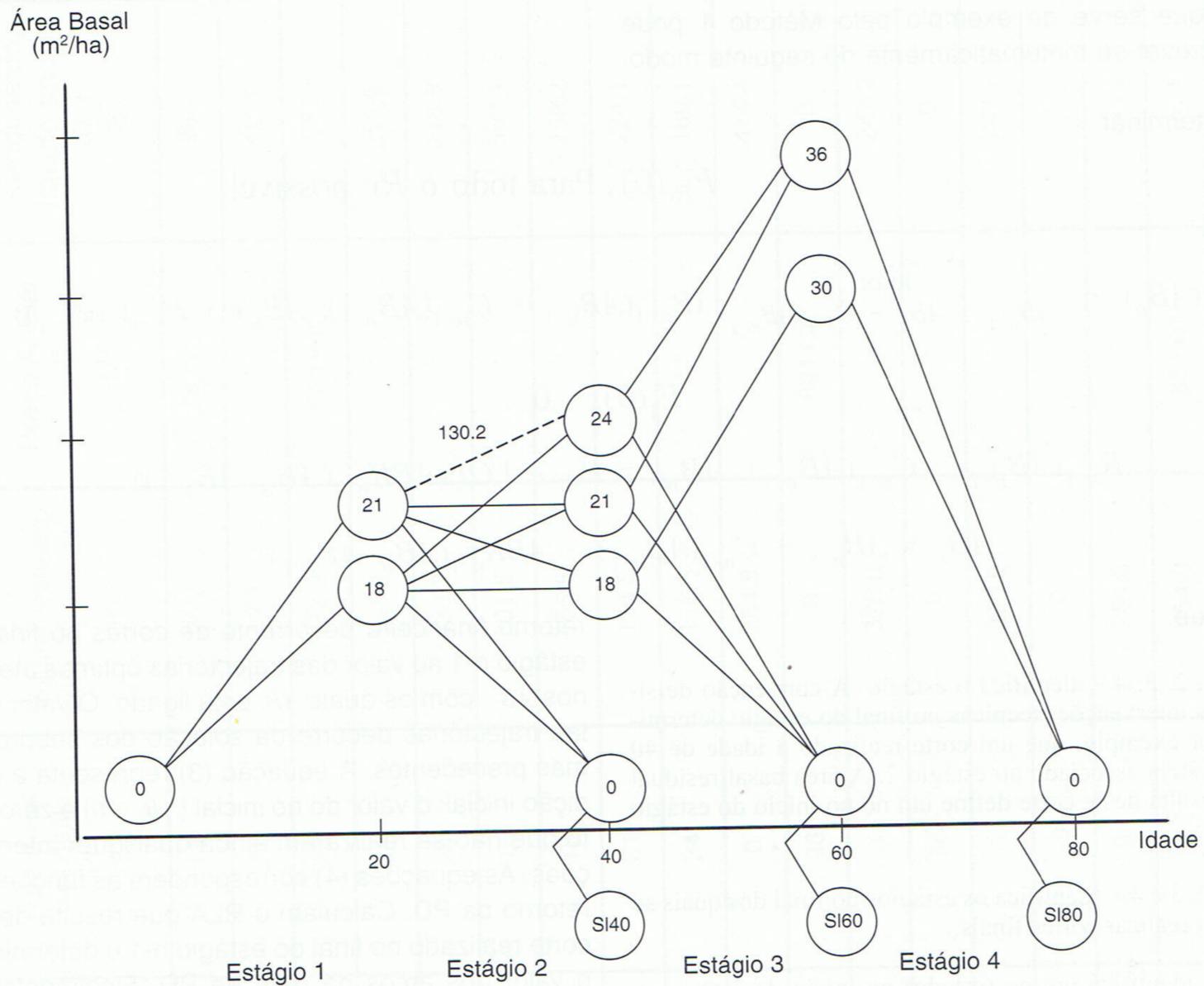


Figura 1 - Rede de PD que desenha alternativas de gestão para um povoamento com estrutura regular. As intervenções técnicas, representadas por arcos, ocorrem em idades que definem os estágios. Representa-se um arco a tracejado por forma a ilustrar a correspondência entre um arco e uma intervenção técnica. Os nós acima do eixo das abscissas identificam a AB do povoamento nestes estágios. Os nós artificiais abaixo do eixo das abscissas (nós "solo") são utilizados por forma a considerar revoluções à perpetuidade.

de 130.2 m³/ha (Figura 1). O valor associado ao arco poderia também corresponder ao resultado económico da intervenção.

Neste exemplo, os estágios ou subproblemas são definidos pela idades de 0, 20, 40, 60 e 80 anos, que correspondem aos momentos em que se realizam intervenções técnicas. O intervalo que define o estágio é de 20 anos. Convenciona-se que as intervenções ocorrem no final do estágio a que se referem. Os desbastes realizados no segundo estágio, por exemplo, ocorrerão aos 40 anos. Caso não se considerem revoluções à perpetuidade, a alternativa de gestão óptima para este povoamento corresponde a um trajecto na rede com início no nó na idade 0 (o nó inicial) e com final num dos nós caracterizado por AB igual a zero nas idades de 40, 60 ou 80 anos. Note-se que os arcos que terminam em qualquer destes três nós representam um corte

final. Importa identificar aquele trajecto de um modo eficiente.

O trajecto óptimo com início em qualquer nó na rede é independente do modo como este foi alcançado. Esta propriedade, é conhecida como princípio de optimalidade (TAHA, 1992). Ela permite tirar partido do carácter sequencial no tempo das intervenções sobre o povoamento e em consequência, contribui para a solução eficiente do problema da determinação da alternativa óptima de gestão (trajecto óptimo na rede). O modelo de PD pode ser resolvido com recurso a dois métodos. No primeiro, o processo de solução inicia-se no primeiro estágio (idade 0) - Método 1. No segundo, este processo inicia-se no último estágio (idade de 80 anos, no exemplo) - Método 2. Caso se selecione o RLA como indicador para avaliar alternativas de gestão e não se considere um horizonte de

planeamento à perpetuidade, a solução do problema que serve de exemplo pelo Método 1 pode descrever-se matematicamente do seguinte modo:

determinar:

$$F_{Rv}^*(0), \text{ Para todo o } Rv \text{ possível} \quad (1)$$

com,

$$F_n^*(AB_n) = \max_{AB_{n-1} \geq AB_n - C_{n-1}(AB_{n-1})} (R_{n-1}(AB_{n-1} + C_{n-1}(AB_{n-1}), AB_n) + F_{n-1}^*(AB_{n-1})) \quad (2)$$

$$F_1(0) = 0 \quad (3)$$

$$R_{n-1}(AB_{n-1} + C_{n-1}(AB_{n-1}), AB_n) = P_A * VOL(ABR_{n-1}(AB_n, AB_{n-1})) \quad (4)$$

$$AB_n = AB_{n-1} + C_{n-1}(AB_{n-1}) - ABR_{n-1}(AB_n, AB_{n-1}) \quad (5)$$

em que,

$n = 1, 2, 3, 4$ - identifica o estágio. A convenção de situar as intervenções técnicas no final do estágio determina, por exemplo, que um corte realizado à idade de 40 anos esteja associado ao estágio 2. A área basal residual que resulta deste corte define um nó no início do estágio 3.

$Rv = 2, 3$ e 4 - identifica os estágios no final dos quais se podem realizar cortes finais.

AB_n = identifica um nó (estado) no início do estágio n . Corresponde à área basal/ha do povoamento no início deste estágio. No exemplo, e no caso do estágio 2, AB_2 toma os valores 18 e 21 m^2/ha (Figura 1).

$C_n(AB_n)$ = crescimento em AB do povoamento ao longo do estágio n quando no início deste a área basal/ha era igual a AB_n . No exemplo, ao longo do estágio 1, a AB cresce até atingir aos 20 anos, antes de qualquer corte, o valor de 24 m^2/ha .

$ABR_n(AB_{n-1}, AB_n)$ = área basal/ha removida em corte realizado no final do estágio n por forma a deixar uma área basal/ha residual AB_{n-1} , quando no início deste estágio a área basal/ha era igual a AB_n . No exemplo, no final do estágio 1 a área basal/ha removida em desbaste é de 6 e 3 m^2 no caso, respectivamente, dos nós com AB_2 igual a 18 e 21 m^2/ha .

$VOL(ABR_n(AB_{n-1}, AB_n))$ = Volume (m^3/ha) que resulta de corte realizado no final do estágio n .

P_A = Preço actualizado do material lenhoso, referido ao m^3 .

A equação (1) formaliza o objectivo de otimizar a gestão do povoamento. No exemplo, pretende-se encontrar a alternativa de gestão que maximiza o RLA. As equações (2) correspondem à relação recursiva da PD. Expressam a decomposição do problema de gestão. Calculam o valor do nó AB_n no final do estágio $n-1$ e encontram a solução para o subproblema $n-1$. Este cálculo envolve a soma do

retorno financeiro decorrente de cortes no final do estágio $n-1$ ao valor das trajectórias óptimas até aos nós AB_{n-1} com os quais AB_n está ligado. O valor destas trajectórias decorre da solução dos subproblemas precedentes. A equação (3) representa a condição inicial: o valor do nó inicial ($AB_1 = 0$) é zero visto que não se realizaram ainda quaisquer intervenções. As equações (4) correspondem às funções de retorno da PD. Calculam o RLA que resulta de um corte realizado no final do estágio $n-1$ e determinam o valor dos arcos na rede de PD. Finalmente, as equações (5) correspondem à função de transição da PD. Definem as relações entre nós em estágios consecutivos, i.e., exprimem a possibilidade de alcançar um nó AB_n a partir de nós AB_{n-1} . Apresenta-se em seguida os cálculos que resultam da aplicação deste método de solução (Quadros 1 e 2). Nos cálculos considerou-se um preço constante para o material lenhoso ($8 \times 10^3 \text{ esc}/m^3$) e uma taxa de actualização $i = .04$. Não se considerou qualquer custo de regeneração.

O Quadro 1 apresenta os dados necessários para o cálculo do rendimento financeiro que resulta de uma intervenção (e.g. desbaste, corte final) sobre o povoamento. A coluna (2) apresenta os dados relativos à AB no início de um período de 20 anos, período que define o estágio. A coluna (3) resulta da aplicação do modelo de crescimento aos valores na coluna (2) e apresenta os dados relativos à AB no final do período de 20 anos, antes de qualquer intervenção. A coluna (4) resulta da aplicação das opções técnicas adequadas para a gestão do povoamento aos dados na coluna (3). Elas permitem calcular as AB a remover por forma a atingir as existências desejadas em cada idade (coluna (5)). Os dados nesta coluna calculam-se fazendo a diferença entre os dados nas colunas (3) e (4). Os dados na coluna (6) decorrem da aplicação do modelo de

Quadro 1 - Cálculo do retorno financeiro que resulta de uma intervenção sobre o povoamento (valores dos arcos na rede de PD) (*)

Estágio <i>n</i> (1)	Área Basal Inicial AB_n (2)	Área Basal antes do corte $AB_n + C_n(AB_n)$ (3)	Área Basal removida $ABR_n(AB_{n+1}, AB_n)$ (4)	Área Basal residual AB_{n+1} (5)	VOLUME realizado $VOL(ABR_n(AB_{n+1}, AB_n))$ (6)	Preço Actual P_a (7)	Rendimento líquido anual RLA (8)
1	0	24	6	18	25.3	$8/(1+i)^{20}$	95.2
1	0	24	3	21	12.7	"	46.3
2	21	42.7	24.7	18	172.2	$8/(1+i)^{40}$	287
2	21	42.7	21.7	21	151.2	"	251.9
2	21	42.7	18.7	24	130.2	"	216.9
2	18	40.3	42.7	0	301.5	"	502.4
2	18	40.3	22.3	18	155.5	"	259.2
2	18	40.3	19.3	21	134.5	"	224.1
2	18	40.3	16.3	24	113.5	"	189.1
2	18	40.3	40.3	0	284.8	"	474.4
3	24	36	0	36	0	$8/(1+i)^{60}$	0
3	24	36	36	0	325.0	"	247.2
3	21	36	0	36	0	"	0
3	21	36	36	0	325.0	"	247.2
3	18	30	0	30	0	"	0
3	18	30	30	0	284.8	"	216.6
4	36	43.7	43.7	0	454.0	$8/(1+i)^{80}$	157.6
4	30	39.1	39.1	0	406.9	"	141.2

(*) A área basal, o volume e os rendimentos financeiros exprimem-se, respectivamente, em m^2/ha , m^3/ha e 10^3 esc/ha .

CADERNOS FLORESTAIS

GESTÃO DE RECURSOS FLORESTAIS

Quadro 2 - Solução do modelo de PD para o problema de gestão do povoamento florestal com recurso ao Método 1. A rede de PD está representada na Figura 1. O cálculo dos valores dos arcos na rede é apresentado no Quadro 1. O sombreado indica o trajecto óptimo no caso de uma revolução de 80 anos.

Estágio n (1)	AB_n (2)	AB_{n+1} (3)	$F_n^*(AB_n)$ (4)	Intervenção (5)	$R_n(AB_n + C_n)$ (AB_n, AB_{n+1}) (6)	$F_{n+1}^*(AB_{n+1})$ (7)
1	0	18	0	Desbaste	95.2	92.5
1	0	21	0	Desbaste	46.3	46.3
2	18	24	92.5	Desbaste	189.1	281.6
	21	24	46.3	Desbaste	216.9	
2	18	21	92.5	Desbaste	224.1	316.6
	21	21	46.3	Desbaste	251.9	
2	18	18	92.5	Desbaste	259.2	351.7
	21	18	46.3	Desbaste	287	
2	18	0	92.5	Corte Final	474.4	566.9
	21	0	46.3	Corte Final	502.4	
3	21	36	316.6	-	0	316.6
	24	36	281.6	-	0	
3	18	30	351.7	-	0	351.7
3	18	0	351.7	Corte Final	216.6	568.3
	21	0	316.6	Corte Final	247.2	
	24	0	381.6	Corte Final	247.2	
4	30	0	351.7	Corte Final	141.2	492.9
	36	0	316.6	Corte Final	157.6	

(2) e (3): m²/ha; (4), (6) e (7): 10³ esc/ha.

crescimento aos dados na coluna (4). O modelo calcula o volume realizado em função da AB removida. A coluna (7) apresenta o preço actualizado em cada idade. Finalmente, os dados na coluna

(8) resultam do produto entre os valores nas colunas (6) e (7). Correspondem ao valor da função de retorno do modelo de PD - Equação (5) - e determinam o valor do arco na rede de PD. Note-se que

cada uma das 18 linhas no Quadro 1 está associada a um dos 18 arcos nesta rede (Figura 1). Para além disso, os dados na coluna (2) identificam os nós de onde partem os arcos, enquanto que os dados na coluna (5) caracterizam os nós onde estes terminam. Esta informação serve de base à solução do problema de gestão do povoamento.

O Quadro 2 ilustra a aplicação do Método 1. As colunas (2) e (3) identificam, respectivamente, os nós de partida e de chegada de cada um dos arcos na rede de PD. A coluna (5) identifica a intervenção associada ao arco correspondente enquanto que a coluna (6) representa o valor desse mesmo arco como calculado no Quadro 1. O método desenvolve-se do modo que se caracteriza em seguida. A condição inicial - Equação (3) - determina o valor do primeiro nó na rede (idade 0). O valor dos nós no final do estágio 1 (18 e 21) é calculado adicionando o valor do primeiro nó na rede (zero, na coluna (4)) ao valor dos arcos que neles terminam (92.5 e 46.3, respectivamente, na coluna (6)). A solução do primeiro subproblema termina com este cálculo. Note-se que existe apenas um arco ligando o nó inicial a cada um dos nós no final do estágio 1. No segundo estágio, pelo contrário, os nós de chegada podem ser alcançados por mais de um arco (Figura 1). O nó 24, por exemplo, é alcançado por dois arcos. O primeiro parte do nó 18, o segundo parte do nó 21, ambos os nós referentes à idade de 20 anos. Neste caso, a relação recursiva - Equação (2) - determina o valor do nó 24, escolhendo a maior de entre as somas dos valores dos nós de partida (92.5 e 46.3 para, respectivamente, os nós 18 e 21) e os valores dos arcos que os ligam ao nó 24 (189.1 e 216.9 ainda para, respectivamente, os nós 18 e 21). Esse valor é registado na coluna (7): 281.6. Os valores dos nós 21, 18 e 0 no final do estágio 2 (idade de 40 anos) são calculados de modo idêntico. Com este cálculo termina a solução do segundo subproblema.

O processo de solução que se ilustrou continua até se concluir o cálculo de todos os valores dos nós na rede na coluna (7) do Quadro 2. Estes representam o valor (RLA) do trajecto óptimo para alcançar estes nós e permitem identificar esse mesmo percurso. No caso do nó 0 à idade de 80 anos, por exemplo, o valor desse trajecto é de 492.9×10^3 esc/ha. Corresponde ao valor da Equação (1) para R_v igual a 4 e ao RLA associado a uma revolução de 80 anos. A leitura do Quadro 2 permite identificar esse trajecto, a sombreado, que corresponde à alternativa de gestão óptima para esta revolução:

- Desbaste aos 20 anos deixando uma AB residual de $18 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $25.3 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Quadro 1) e o rendimento actualizado é

- de $92.5 \times 10^3/\text{esc/ha}$.
- Desbaste aos 40 anos deixando uma AB residual de $18 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $155.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Quadro 1) e o rendimento actualizado é de $259.2 \times 10^3/\text{esc/ha}$.
- Não intervenção aos 60 anos permitindo o crescimento da AB até $30 \text{ m}^2/\text{ha}$.
- Corte final aos 80 anos. O volume a remover é de $406.9 \text{ m}^3/\text{ha}$ (Quadro 1) e o rendimento actualizado é de $141.2 \times 10^3/\text{esc/ha}$.

A identificação dos trajectos óptimos na rede correspondentes às revoluções de 40 e 60 anos faz-se de modo idêntico. Os valores da Equação (1) para R_v igual a 2 (revolução de 40 anos) e 3 (revolução de 60 anos) são, respectivamente, $F_2^*(0) = 566.9 \times 10^3 \text{ esc/ha}$ e $F_3^*(0) = 568.3 \times 10^3 \text{ esc/ha}$ (Quadro 2). Entretanto, estes valores de RLA não permitem ainda seleccionar a alternativa de gestão óptima, visto ser necessária a normalização dos horizontes de planeamento (Davis e Johnson 1987). Essa normalização faz-se considerando a repetição de revoluções à perpetuidade com valor calculado com recurso à equação (6):

$$F_{R_v}^*(0) \frac{(1+i)^{R_v \times 20}}{(1+i)^{R_v \times 20} - 1}$$

com,

$(1+i)^{R_v \times 20}$ = factor que capitaliza o RLA, referindo-o à idade da revolução.

$(1+i)^{R_v \times 20} - 1$ = factor que actualiza a série de rendimentos capitalizados que se repetem à perpetuidade de $R_v \times 20$ em $R_v \times 20$ anos.

A equação (6) corresponde à fórmula de Faustmann. A sua aplicação ao exemplo considerado permite determinar o valor das revoluções à perpetuidade: 716.2, 628.0 e 514.9×10^3 esc/ha no caso, respectivamente, das idades de 40, 60 e 80 anos. A comparabilidade destes valores determina que o corte final se deva realizar aos 40 anos. Note-se como o custo de oportunidade que decorre de atrasar as revoluções que se seguem à primeira leva a que se inverta a relação de desigualdade entre os RLA associados às idades de corte de 40 e de 60 anos. A aplicação da equação (6) é possível no âmbito da solução pela PD. Para o efeito, considera-se a ligação dos nós que resultam de cortes finais a nós artificiais que se convencionam designar por "solo" (Figura 1). Neste caso, o Método 1 termina com o cálculo do valor dos nós "solo". No exemplo, haveria que adicionar ao valor dos nós que resultam de cortes finais, os valores de 149.3, 59.7 e 22.0×10^3 esc/ha (o RLA associado às revoluções que se repetem à perpetuidade após a primeira) para obter, respectivamente, os valores dos nós SI40, SI60 e SI80.

A aplicação do Método 2 determina uma solução

idêntica à do Método 1. No entanto, a informação oferecida por aquele tem características específicas que justificam a descrição que se apresenta em seguida. Nesta descrição ilustra-se a utilização dos nós "solo" na solução do modelo. No caso do problema que serve de exemplo, a formulação matemática do modelo é a seguinte:

Determinar

$$F_i^*(0) \text{ , Para todos os estados finais SIRv possíveis} \quad (7)$$

com,

$$F_n^*(AB_n) = \max_{AB_{n+1} \leq AB_n + C_n(AB_n)} (R_n(AB_n + C_n(AB_n), AB_{n+1}) + F_{n+1}^*(AB_{n+1})) \quad (8)$$

$$F_i^*(0) \text{ , é conhecido para todo o } Rv \quad (9)$$

$$R_n(AB_n + C_n(AB_n), AB_{n+1}) = P_A * VOL(ABR_n(AB_{n+1}, AB_n)) \quad (10)$$

$$AB_n = AB_{n+1} - C_n(AB_n) + ABR_n(AB_{n+1}, AB_n) \quad (11)$$

e ainda,

$SIRv = SI40, SI60, SI80$ identifica os nós "solo" no final de cada revolução.

$n, Rv, AB_n, C_n(AB_n), ABR_n(AB_{n+1}, AB_n), VOL(ABR_n(AB_{n+1}, AB_n))$ e P_A

com significado idêntico ao descrito para o Método 1.

A equação (7) formaliza o objectivo de otimizar a gestão do povoamento. No caso do Método 2, o valor do nó inicial na rede corresponde ao RLA associado à alternativa óptima de gestão. As equações (8) correspondem à relação recursiva da PD. Expressam de novo a decomposição do problema de gestão. Calculam o valor do nó AB_n no início do estágio n e encontram a solução para o subproblema n . Este cálculo envolve a soma do retorno financeiro decorrente de cortes no final do estágio n ao valor das trajectórias óptimas a partir dos nós AB_{n+1} com os quais AB_n está ligado. O valor destas trajectórias decorre da solução dos subproblemas precedentes. A equação (9) representa a condição inicial: o valor dos nós "solo" (SIRv) deve ser conhecido para que se possa iniciar o processo de solução. As equações (10) correspondem às funções de retorno da PD. Calculam o RLA que resulta de um corte realizado no final do estágio n e determinam o valor dos arcos na rede de PD. Finalmente, as equações (11) correspondem à função de transição da PD. Definem as relações entre nós em estágios consecutivos, i.e., exprimem, no caso do Método 2, a possibilidade de nós AB_{n+1} serem alcançados a partir de um nó AB_n .

O Quadro 3 ilustra a aplicação do Método 2. As colunas (2) e (3) identificam, respectivamente, os

nós de chegada e de partida de cada um dos arcos na rede de PD acima do eixo das abcissas na Figura 1. A coluna (4) identifica os três nós "solo" alcançados por arcos que partem dos nós que decorrem de cortes finais. A coluna (6) identifica as intervenções associadas aos arcos enquanto que a coluna (7) apresenta os RLA que resultam destas intervenções como calculado no Quadro 1. O método de solução desenvolve-se do modo que se caracteriza em seguida.

Em primeiro lugar, é necessário identificar o valor dos nós "solo" visto que é a partir destes que se inicia a solução pelo Método 2 - Equação (9). O valor destes nós corresponde ao valor das revoluções que se seguem à primeira repetindo-se à perpetuidade. A determinação deste valor exige o cálculo prévio do valor da primeira revolução pelo que, à primeira vista, não parece possível a aplicação do Método 2 : este valor não é conhecido quando se inicia a solução. No entanto, a utilização de uma estimativa, ainda que grosseira, do valor das revoluções que se seguem à primeira permite obter uma solução, ainda que não óptima, para o problema. Esta solução permite, por sua vez, verificar se a estimativa utilizada é incorrecta. Em caso afirmativo, a informação oferecida pela solução é utilizada para corrigir a estimativa. Este processo

CADERNOS FLORESTAIS

GESTÃO DE RECURSOS FLORESTAIS

Quadro 3 - Solução do modelo de PD para o problema de gestão do povoamento florestal com recurso ao Método 2. A rede de PD está representada na Figura 1. O cálculo dos valores dos arcos na rede é apresentado no Quadro 1. A inicialização da solução considerou um valor do solo igual a 716.2×10^3 eschoa. O sombreado indica o trajecto correspondente à alternativa óptima de gestão.

Estágio n (1)	AB_{n+1} (2)	AB_n (3)	Solo (4)	$F_{n+1}(x)$ (5)	Intervenção (6)	$R_n(AB_n + C_n(AB_n, AB_{n+1}))$ (7)	$F_n^*(AB_n)$ (8)
1	18	0	-	623.7	Desbaste	92.5	716.2
	21	0	-	651.7	Desbaste	46.3	
2	18	18	-	284.7	Desbaste	259.2	
	21	18	-	315.3	Desbaste	224.1	
	24	18	-	315.3	Desbaste	189.1	
	0	18	-	149.3	Corte final	474.4	623.7
2	18	21	-	284.7	Desbaste	287	
	21	21	-	315.3	Desbaste	251.9	
	24	21	-	315.3	Desbaste	216.9	
	0	21	-	149.3	Corte final	502.4	651.7
2	0	-	SI40	149.3 (a)	2ª, 3ª, ... revoluções	-	-
3	30	18	-	172.3	-	0	
	0	18	-	68.1	Corte final	216.6	284.7
3	36	21	-	188.7	-	0	
	0	21	-	68.1	Corte final	247.2	315.3
3	36	24	-	188.7	-	0	
	0	24	-	68.1	Corte final	247.2	315.3
3	0	-	SI60	68.1 (b)	2ª, 3ª, ... revoluções	-	-
4	0	30	-	31.1	Corte final	141.2	172.3
4	0	36	-	31.1	Corte final	157.6	188.7
4	0	-	SI80	31.1 (c)	2ª, 3ª, ... revoluções	-	-

(2) e (3): m^2 / ha ; (4), (6) e (7): $10^3 esc / ha$; (5) $x = AB_{n+1}$ ou $SI Rv$ no caso, respectivamente de nós que caracterizam a existência do povoamento em cada idade (nós acima do eixo das abcissas na Figura 1) e de nós "solo"; (a) $149.3 = 716.2 / (1 + i)^{40}$; (b) $68.1 = 716.2 / (1 + i)^{60}$; (c) $31.1 = 716.2 / (1 + i)^{80}$.

iterativo prossegue até se encontrar o valor exacto. Na aplicação que se ilustra no Quadro 3, considerou-se o valor de 716.2×10^3 esc/ha, o valor do solo de acordo com o Método 1, para determinar os

valores dos nós "solo" a utilizar pelo Método 2: 149.3, 68.1 e 31.1 $\times 10^3$ esc/ha no caso, respectivamente, dos nós SI40, SI60 e SI80 (coluna (5)). O valor dos nós que decorrem de cortes finais é idên-

tico ao valor dos nós "solo" a que estão ligados por um arco visto que estes arcos não estão associados a qualquer intervenção. O valor dos nós no início do estágio 4 (30 e 36 na coluna (3)) é calculado adicionando o valor do nó que alcançam (31.1 na coluna (5)) ao valor do arco que neles se inicia (141.2 e 157.6 na coluna (7)) para, respectivamente, os nós 30 e 36). A solução do primeiro subproblema é apresentada na coluna (8): 172.3 e 188.7. No estágio 3, que define o segundo subproblema de acordo com o Método 2, o valor dos nós 18, 21 e 24 é calculado seleccionando a maior de entre as somas dos valores dos arcos que neles se iniciam (coluna (7)) e dos valores dos nós que alcançam (coluna (5)), de acordo com a Equação (8). Estes valores registam-se na coluna (8). No caso, por exemplo, do nó 24, o valor 315.3 na coluna (8) corresponde ao maior valor de entre as somas ($0 + 188.7$) e ($247.2 + 68.1$).

O método de solução prossegue até se concluir o cálculo de todos os valores de nós na rede (coluna (8)). O valor do nó inicial (716.2 na coluna (8)) corresponde ao valor da alternativa óptima de gestão que se identifica a sombreado no Quadro 3:

- Desbaste aos 20 anos deixando uma AB residual de $18\text{m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $25.3\text{m}^3/\text{ha}$ (Quadro 1) e o rendimento actualizado é de $92.4 \times 10^3 \text{ esc}/\text{ha}$.
- Corte final aos 40 anos. O volume a remover é de $284.8 \times \text{m}^3 / \text{ha}$ (Quadro 1) e o rendimento actualizado é de $474.4 \times 10^3 \text{ esc}/\text{ha}$.
- Revoluções de 40 anos à perpetuidade após a primeira cujo RLA é de $149.3 \times 10^3 \text{ esc}/\text{ha}$.

A solução encontrada é idêntica à oferecida pelo Método 1 porque se utilizou uma estimativa exacta do valor do solo. No entanto, o significado do valor dos nós é diferente. O Método 1 indica o trajecto óptimo para alcançar um nó, i.e., as intervenções óptimas para conseguir um povoamento com determinada AB em determinada idade. O Método 2, pelo contrário indica o trajecto óptimo a partir de um nó, i.e. identifica as intervenções óptimas a partir de qualquer situação em que se encontre o povoamento. No caso, por exemplo, do nó caracterizado por $AB = 21\text{m}^2/\text{ha}$ aos 40 anos, o valor calculado pelo Método 1 é de $316.6 \times 10^3 \text{ esc}/\text{ha}$ e corresponde ao RLA associado aos desbastes óptimos que se realizam para o alcançar (Quadro 2). O mesmo valor calculado pelo Método 2 é de $651.7 \times 10^3 \text{ esc}/\text{ha}$ e corresponde ao RLA que decorre da realização do corte final aos 60 anos seguido de revoluções de 40 anos à perpetuidade (Quadro 3).

○ A opção por um ou outro método de solução depende do problema de gestão e de conside-

rações computacionais. O exemplo que se utilizou para ilustrar a aplicação dos dois métodos evidencia que o Método 1 não oferece informação relativa ao trajecto óptimo a partir de nós na rede não situados ao longo do percurso óptimo determinado pela solução, i.e., não dá indicação relativa às intervenções técnicas que optimizam a gestão do povoamento em idades e AB diferentes das que caracterizam aquele percurso. No caso, por exemplo, da AB do povoamento ser de $21 \text{ m}^2/\text{ha}$ aos 40 anos, a solução pelo Método 1 não permite identificar as intervenções que optimizam a sua gestão. O Método 2, como se observou acima, oferece esta informação. A possibilidade de acontecimentos catastróficos (eg. fogo) que afastem o povoamento das situações (nós) que definem o percurso óptimo na rede evidencia a utilidade desta informação. Neste caso, a solução pelo Método 2 permite identificar de imediato as intervenções que optimizam a gestão com base na nova situação. A utilização do Método 1 exige a solução de novo problema em que o nó inicial é definido pelas condições (AB) que decorrem do acontecimento catastrófico.

A informação económica adicional oferecida pelo Método 2 sugere a utilização da sua solução. No entanto, considerações de eficiência computacional podem determinar a preferência pelo Método 1. Neste caso, a programação do desenho da rede e a solução podem ser simultâneos visto que esta se inicia com a situação actual do povoamento florestal. No caso do Método 2, isto não é possível porque a solução se inicia no último estágio: é necessário desenhar uma rede com todos os percursos que decorrem do modelo de silvicultura antes de iniciar a solução do problema. A possibilidade de programar a rede em simultâneo com a solução pelo Método 1 permite ainda eliminar erros que resultam de arcos associados a crescimento (erros de arredondamento). Admita-se que, no exemplo apresentado, o crescimento do povoamento com AB igual a $24 \text{ m}^2/\text{ha}$ aos 40 anos era de 13.5 em vez de $12 \text{ m}^2/\text{ha}$ ao longo de um período de 20 anos. A programação da rede no âmbito do Método 1 introduziria na rede um nó caracterizado por $AB = 37.5\text{m}^2/\text{ha}$ aos 60 anos pelo que não se incorreria em qualquer erro. No caso do Método 2, a programação prévia da rede não permite esta introdução. A especificação prévia do valor de $3 \text{ m}^2/\text{ha}$ para definir o intervalo entre estados, necessária para a programação da rede, determinaria que o nó caracterizado por AB mais próxima do valor de $37.5\text{m}^2/\text{ha}$ seria o nó 36 aos 60 anos (Figura 1). Em consequência, o arco com início no nó 24 aos 40 anos terminaria, de acordo com a programação, naquele nó. A solução incorreria num erro de arredondamento de AB igual a $-1.5 \text{ m}^2/\text{ha}$. Note-se que a

convenção de situar as intervenções no final do estágio elimina a possibilidade destes erros no caso de arcos associados a desbastes ou cortes finais.

AUTOMATIZAÇÃO DA SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE GESTÃO DE POVOAMENTOS FLORESTAIS NA MATA NACIONAL DE LEIRIA COM RECURSO A PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

A formulação e a solução de problemas de gestão florestal com recurso à PD foram caracterizadas com base num problema com um número relativamente pequeno de alternativas de gestão. A representação do problema em rede (Figura 1) evidencia graficamente a sua simplicidade. O número de percursos ao longo da rede é apenas de 14. Na generalidade dos casos, o modelo de silvicultura permite definir um número substancialmente mais elevado de prescrições por forma a contribuir para a flexibilidade da gestão. No caso da MNL, a periodicidade quinquenal dos desbastes e a marcação dos cortes finais segundo um plano quinquenal coincidente com o dos desbastes (GOMES, 1990) configura um problema de gestão complexo que sugere o potencial da automatização da solução pela PD. Apresenta-se em seguida o programa concebido para o realizar.

O ficheiro que integra o modelo de PD foi programado em Microsoft Visual Basic 5.0 visto que este oferece a possibilidade de desenvolver com facilidade um interface de manipulação simples pelo utilizador. O modelo descreve-se matematicamente com recurso aos conjuntos de equações (1)-(5) e (7)-(12). Entretanto, o número de estágios (n) e os anos em que é possível realizar cortes finais (Rv) no âmbito do modelo correspondem a parâmetros a especificar pelo utilizador.

A execução do ficheiro dá acesso ao formulário inicial (Figura 2). Este permite seleccionar o método de solução pretendido. A solução pelo Método 1 pode fazer-se em simultâneo com a programação da rede. No entanto, a utilização deste método no âmbito do programa desenvolvido exige a programação prévia da rede. O botão **Parâmetros** (Figura 2) dá acesso ao formulário **Parâmetros** (Figura 3). Este permite que o utilizador especifique os parâmetros do problema de gestão necessários para a programação da rede. O modelo de crescimento e produção para o pinheiro bravo que integra o sistema consiste na versão simplificada do modelo DUNAS (FALCÃO, 1998) referida acima. Este permite caracterizar a existência do povoamento em cada idade apenas em função da AB. Em consequência a programação da rede considera apenas uma variável de estado (AB). O estágio é de novo definido pela idade. O formulário permite que o utilizador especifique as idades mínimas e máxi-

mas para desbastes e cortes finais. Os regimes de desbastes são também caracterizados pelo utilizador mediante a introdução de valores máximo e mínimo para AB residuais após um desbaste. É possível ainda definir um valor mínimo de AB a remover para que se justifique um desbaste.

Os valores registados por omissão no formulário indicam que o intervalo de idades que define o estágio é de 5 anos enquanto que o intervalo entre estados (nós) é de 1 m²/ha. Estes valores emulam a periodicidade quinquenal dos cortes e a monitorização das existências em povoamentos pelo modelo de silvicultura tradicional na MNL que se pretende analisar com recurso à PD. Entretanto, o formulário permite que o utilizador defina outro modelo de silvicultura para posterior comparação com o tradicional

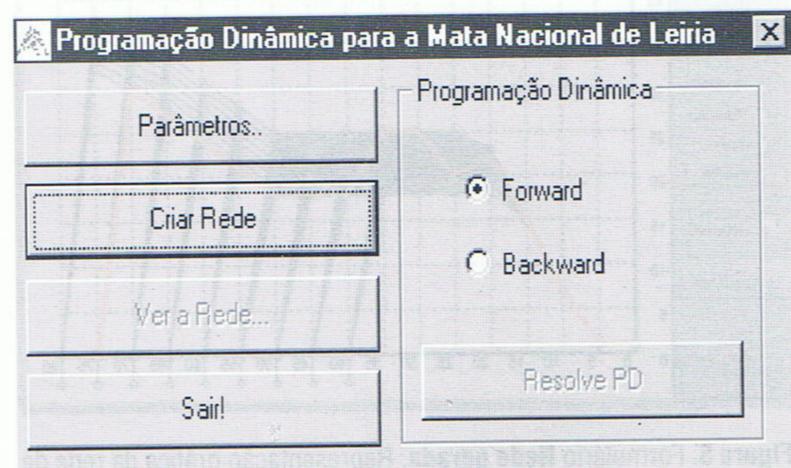


Figura 2. Formulário inicial do programa para a solução pelo Método 1 ("Forward") e pelo Método 2 ("Backward") da PD de problemas de gestão de povoamentos florestais na MNL.

para todas as classe de qualidade presentes na MNL. Finalmente, o utilizador pode recorrer ainda ao formulário para introduzir outros valores relativos aos custos das operações de instalação e de limpeza e à taxa de actualização a considerar para a determinação do RLA de cada alternativa de gestão. A introdução de outros preços para o mate-

Figura 3. Formulário **Parâmetros**. É utilizado para especificar parâmetros do problema de gestão florestal necessários para a programação da rede de PD. Esta é uma exigência prévia para a solução. Os valores registados por omissão no formulário emulam a silvicultura praticada na MNL. A AB exprime-se em m²/ha, os custos em 10³ esc/ha e a classe de qualidade em m

Figura 4. Formulário **Preços da Madeira**. Os valores registados por omissão no formulário resultaram de uma análise sumária de preços praticados em Autos de Marca na MNL

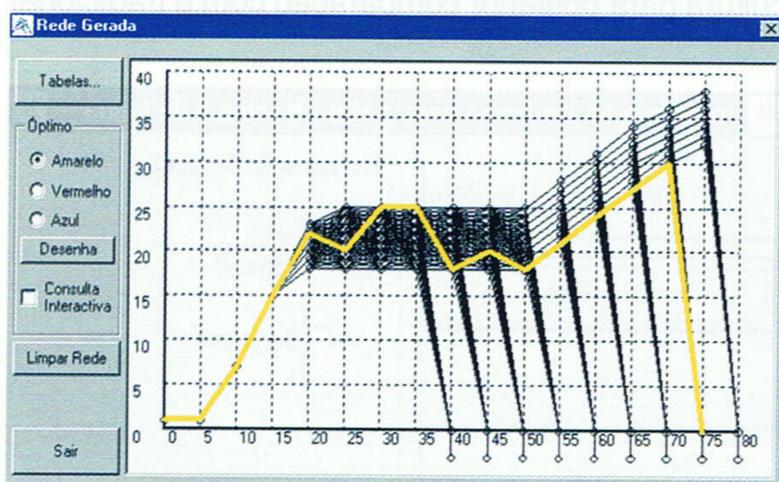


Figura 5. Formulário **Rede gerada**. Representação gráfica da rede de PD programada de acordo com os parâmetros registados por omissão no formulário **Parâmetros** por forma a emular a silvicultura praticada na MNL. O traço mais carregado, a amarelo, representa o percurso óptimo ao longo da rede de acordo com o Método 1.

rial lenhoso em pé é feita premindo o botão **Preços** que permite aceder ao formulário **Preços da Madeira** (Figura 4).

Os valores que se registam por omissão nos formulários **Parâmetros** e **Preços da Madeira** permitem programar a rede que corresponde ao modelo de silvicultura utilizado na MNL e determinar o valor dos respectivos arcos de acordo com os preços e os custos correntes na MNL. Entretanto, a introdução de outros valores permite a comparação daquele modelo com outras opções técnicas que sejam consideradas pelo modelo de crescimento e produção. Para além disso, é possível realizar a análise de sensibilidade da solução a alterações nos custos, preços e taxa de actualização. Após o preenchimento dos formulários **Parâmetros** e **Preços da Madeira** o utilizador deve premir o botão **Criar Rede** no formulário inicial (Figura 2) para executar o código que programa a rede de PD. A visualização da rede criada é possível com recurso ao botão **Ver Rede** também no formulário inicial (Figura 2). Este botão fica activo após a criação da rede. O formulário **Rede Gerada** (Figura 5) evidencia a complexidade do problema de gestão que decorre do modelo de silvi-

cultura considerado. O número de percursos (alternativas de gestão) possíveis é da ordem das dezenas o que sugere a utilização de um método computacionalmente eficiente como a PD. A possibilidade de realizar a análise de sensibilidade da solução a alterações em parâmetros do problema evidencia ainda mais a importância da eficiência computacional. Após a programação da rede, o utilizador pode resolver o problema de gestão de acordo com o método de solução seleccionado. Deve para isso premir o botão **Resolve PD**, já activo no formulário inicial (Figura 2).

O tempo de solução para o problema representado na Figura 5 foi inferior a 1 segundo num processador Pentium a 200Mhz. Depois de resolver o problema, o utilizador pode recorrer ao botão **Desenha** no formulário **Rede gerada** para visualizar o percurso óptimo ao longo da rede (Figura 5). Para além disso, o utilizador pode observar no formulário os trajectos óptimos para alcançar qualquer nó na rede no caso do Método 1 ou, ainda, os trajectos óptimos a partir de qualquer nó na rede no caso do Método 2. Para tal, deve seleccionar a opção **Consulta interactiva** e premir o nó pretendido. No caso do Método 2, surgirá no formulário o desenho do trajecto óptimo a partir do nó seleccionado e também uma caixa que caracteriza este nó: idade, AB e valor (Figura 6).

O botão Limpar a rede no mesmo formulário permite apagar o traço que identifica o percurso óptimo. A possibilidade de alterar os intervalos entre estágios ou entre estados no formulário **Parâmetros** permite representar em rede qualquer situação característica na MNL. Em consequência, a consulta interactiva permite identificar de forma eficiente, i.e. incorrendo num custo de computação pouco significativo, as alternativas óptimas de gestão para qualquer povoamento florestal característico na MNL, i.e. para povoamentos com idades ou AB comuns nesta mata.

A solução pela PD pode ser analisada também com

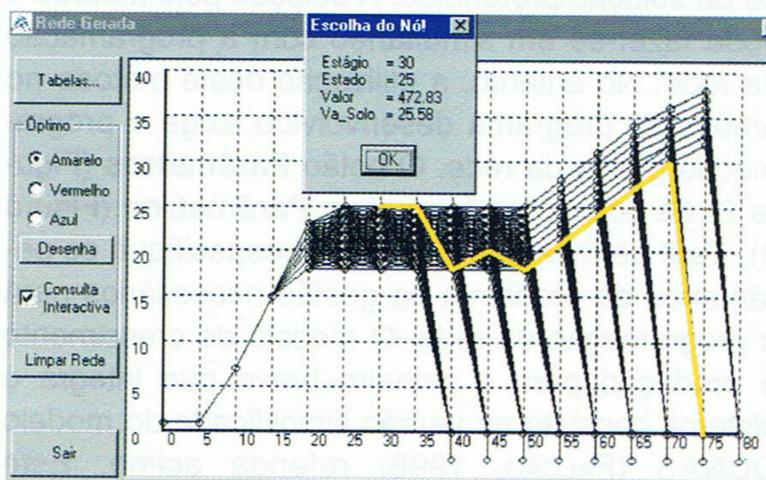


Figura 6. Formulário **Rede gerada**. Representação gráfica da rede de PD programada de acordo com os parâmetros registados por omissão no formulário **Parâmetros** por forma a emular a silvicultura praticada na MNL. O traço mais carregado, a amarelo, representa o percurso óptimo a partir do nó caracterizado por AB igual a 25m²/ha aos 30 anos, de acordo com o Método 2. Apresenta-se em caixa, informação económica relativa ao mesmo nó.

Nós					Arcos						
Num. No	Estado	Estado	Valor	V. Solo	Num. Arc	No. Part	No. Chec	AB. Prem	Vol. Prem	Valor	Ento
0	0	1	499.0	25.58	1	0	1	0.0	0.0	-70.0	0.00
1	5	1	529.0	25.58	2	1	2	0.0	0.0	0.0	0.37
2	10	7	529.0	25.58	3	2	3	0.0	0.0	-38.9	-0.07
3	15	15	567.9	25.58	8	3	8	2.0	8.5	15.4	0.00
8	20	22	552.4	25.58	43	8	12	9.6	48.0	72.0	0.00
12	25	20	480.4	25.58	75	12	25	1.1	6.1	7.6	0.00
25	30	25	472.8	25.58	172	25	33	5.3	33.7	46.9	0.00
33	35	25	425.9	25.58	226	33	34	11.6	81.0	118.0	0.00
34	40	18	307.9	25.58	237	34	45	1.7	13.1	14.0	0.00
45	45	20	293.9	25.58	301	45	52	5.5	43.9	43.3	0.00
52	50	18	250.6	25.58	349	52	61	0.0	0.0	0.0	0.01
61	55	21	250.6	25.58	365	61	70	0.0	0.0	0.0	0.11
70	60	24	250.6	25.58	381	70	79	0.0	0.0	0.0	0.27
79	65	27	250.6	25.58	397	79	88	0.0	0.0	0.0	0.46
88	70	30	250.6	25.58	414	88	97	32.3	327.5	250.6	0.00
97	75	0	0.0	25.58							

Figura 7. Tabelas que apresentam a solução ótima pelo Método 2 do problema de gestão de um povoamento florestal. Os parâmetros utilizados para especificar o problema são apresentados nas Figuras 3 e 4. A rede que representa todas as alternativas de gestão é apresentada na Figura 5. Os arcos e os nós estão identificados nas tabelas pelo número de código.

recurso a tabelas a que o utilizador acede premindo o botão **Tabelas** no formulário **Rede gerada** (Figura 5). A informação relativa à solução é apresentada no formulário **Tabelas de nós e arcos** (Figura 7). Os valores registados na Figura 7 decorrem da solução pelo Método 2 do problema de gestão especificado nos formulários **Parâmetros** e **Preços** nas Figuras 3 e 4 e representado em rede na Figura 5. É também possível observar valores relativos a trajectos óptimos a partir de nós intermédios na rede seleccionados no âmbito da consulta interactiva. O utilizador pode consultar os valores de todos os nós e arcos na rede com recurso ao botão Ver todos os nós no formulário **Tabelas de nós e arcos** (Figura 7). Este permite ainda salvar a rede ou imprimir os resultados. A leitura das tabelas permite identificar a solução ótima do problema de gestão:

- Instalação do povoamento com recurso ao aproveitamento e adensamento da regeneração natural associada a um custo de 70×10^3 esc/ha.
- Limpeza aos 15 anos associada a um custo actualizado de 38.9×10^3 esc/ha.
- Desbaste aos 20 anos por forma a deixar uma AB residual de $22 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $8.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 15.4×10^3 esc/ha.
- Desbaste aos 25 anos por forma a deixar uma AB residual de $20 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $48 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 72×10^3 esc/ha.
- Desbaste aos 30 anos por forma a deixar uma AB residual de $25 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $6.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 7.6×10^2 esc/ha.
- Desbaste aos 35 anos por forma a deixar uma AB residual de $25 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $33.7 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 46.9×10^3 esc/ha.
- Desbaste aos 40 anos por forma a deixar uma AB residual de $18 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $81.0 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 118×10^3 esc/ha.

- Desbaste aos 45 anos por forma a deixar uma AB residual de $20^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $13.1 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 14×10^3 esc/ha.

- Desbaste aos 50 anos por forma a deixar uma AB residual de $18 \text{ m}^2/\text{ha}$. O volume a remover é de $43.9 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 43.3×10^3 esc/ha.

- Corte final aos 75 anos. O volume a remover é de $327.5 \text{ m}^3/\text{ha}$ e o rendimento actualizado é de 250.6×10^3 esc/ha.

A análise da sensibilidade da solução a alterações em parâmetros como a taxa de actualização faz-se com facilidade. O utilizador tem apenas que introduzir valores sucessivos para o parâmetro no formulário **Parâmetros** (Figura 3). O crescimento do valor da taxa de actualização, por exemplo, determina revoluções menores (e.g. revolução de 65 anos para $i = 0.05$ e revoluções de 40 anos para $i > 0.05$). O RLA é negativo para uma taxa $i = 0.1$ pelo que a taxa interna de rentabilidade se situa entre 0.09 e 0.1. A solução pelo Método 1 permite observar ainda e em cada caso qual o período de recuperação do investimento. Estes resultados confirmam que a revolução que maximiza a rentabilidade financeira pode ser mais longa que a revolução associada à explorabilidade absoluta.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As propriedades da PD evidenciadas neste artigo confirmam a sua utilidade como instrumento de apoio à decisão em povoamentos equiênicos. Apresentaram-se exemplos de aplicação da PD à gestão florestal em que se considerou o objectivo de maximizar o RLA. A modificação do programa por forma a permitir que o utilizador considere outros objectivos (e.g. maximização do volume) faz-se com facilidade. O tempo de computação necessário para a identificação das alternativas óptimas de gestão para povoamentos com idades e AB diversos e para o registo do impacte de alterações em parâmetros como os preços, a taxa de actualização, ou os custos da regeneração é da ordem dos segundos. A par da eficiência da computação, a PD contribui para a eficácia do processo de tomada de decisão ao oferecer informação adicional (e.g. valor de percursos subóptimos) para a caracterização do problema de gestão. A eficiência computacional e a eficácia da solução simultânea dos problemas de determinação da revolução, do regime de desbastes e do tipo de regeneração são factores que contribuem para a profissionalização e o aumento de rentabilidade da gestão florestal.

Preocupações relativas ao impacte ambiental de operações florestais (e.g. técnicas de instalação em condições específicas) eventualmente formalizadas

no âmbito de um processo de certificação da gestão florestal podem também ser incorporadas com facilidade no modelo de PD. No caso da ferramenta informática desenvolvida no âmbito deste trabalho, o utilizador teria apenas que alterar parâmetros que especificam os modelos de silvicultura por forma a respeitar eventuais critérios e indicadores de sustentabilidade. A execução do programa com os novos parâmetros permitiria ainda, e em poucos segundos, seleccionar nova alternativa de gestão e observar o impacte das restrições ambientais sobre os objectivos de gestão. Esta informação é útil para profissionais de gestão florestal e, ainda, para responsáveis políticos que pretendam analisar o impacte do estabelecimento de critérios e indicadores de sustentabilidade sobre a rendibilidade da pequena propriedade florestal.

Neste artigo, caracterizou-se a formulação e solução pela PD de problemas de gestão de povoamentos florestais com recurso a informação proveniente da MNL. No entanto, a PD é um modelo de aplicação universal. O programa desenvolvido pode ser modificado com facilidade para resolver problemas de gestão de povoamentos equiênicos de pinheiro bravo com características distintas dos encontrados na MNL ou para a solução de problemas de gestão de povoamentos equiênicos com outra composição específica. Neste caso, haveria apenas que integrar no programa os modelos de silvicultura e de crescimento e produção adequados à nova situação ou à nova espécie florestal. Esta introdução poderia eventualmente determinar um mo-

delo de PD com características diferentes do utilizado nos exemplos apresentados (e.g. maior número de variáveis de estado, variáveis de estado contínuas,...) sem prejuízo para a eficiência e a eficácia da solução.

A PD não resolve todos os problemas de gestão florestal. Não se conhecem aplicações à solução de problemas de gestão de povoamentos com estrutura irregular. Neste caso, é comum o recurso a outras técnicas de investigação operacional. Por outro lado, considerações que decorrem de preocupações socio-económicas e ambientais como a sustentabilidade dos fluxos de material lenhoso, a susceptibilidade a acontecimentos catastróficos como o fogo ou a biodiversidade não fazem sentido à escala espacial do povoamento florestal. Neste caso, deve recorrer-se a instrumentos de apoio à decisão que permitam considerar as interacções no tempo e no espaço de decisões tomadas nos povoamentos florestais. A PD poderá entretanto ser organizada como um módulo componente do sistema desenvolvido para responder àquelas preocupações (BORGES, 1996).

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito dos projectos PBIC/AGR/2334/95 e PAMAF 4043 com o título "Contribuição para a Modelação do Planeamento em Recursos Florestais" e PAMAF 8189 com o título "Sistemas de Apoio à Decisão em Recursos Florestais. Desenvolvimento e Aplicação", financiados pela FCT e pelo INIA.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, A. 1966. *Planeamento da empresa florestal - teoria da exploração*. Anais do Instituto Superior de Agronomia Vol XXIX:

AMIDON, E. L., and G. S. AKIN. 1968. Dynamic programming to determine optimum levels of growing stock. *For. Sci.* **14**:278-291.

ARTHAUD, G. J., and W. D. KLEMPERER. 1988. Optimizing high and low thinnings in loblolly pine with dynamic programming. *Can. J. For. Res.* **18**:1118-1122.

BORGES, J. G. 1996. Sistemas de apoio a decisão em recursos naturais. Aplicações florestais. *Revista Florestal* Vol IX, nº3, pp.37-44

BORGES, J. G. e H. HOGANSON. 1999. Structuring a landscape by forestland classification and harvest scheduling spatial constraints. *Forest Ecology and Management* (aceite para publicação).

BRODIE, J. D., D. M. ADAMS, and C. KAO. 1978. Analysis of economic impacts on thinning and rotation for Douglas-fir, using dynamic programming. *For. Sci.* **24**:513-522.

CHEN, C. M., D. W. ROSE E, and R. A. LEARY. 1980a. Derivation of optimal stand density over time - a discrete stage, continuous state dynamic programming solution. *For. Sci.* **26**:217-227.

DAVIS, L. e K. JOHNSON. 1987. *Forest Management*. Ed. 3, McGraw Hill Publishing Company, New York, 790 p.

FALCÃO, A. 1998. *Dunas - a growth model for the National Forest of Leiria in Proceedings of the IUFRO Workshop Empirical and Process-Based Models for forest tree and stand growth simulation*, Setembro 21-27, 1997, Oeiras.

FILIUS, A. M., and M. T. DUL. 1992. Dependence of rotation

and thinning regime on economic factors and silvicultural constraints: results of an application of dynamic programming. *Forest Ecology and Management*. **48**:345-356.

GOMES, S. 1990. A Mata de Leiria. in *Livro de Comunicações do II Congresso Florestal Nacional*, Novembro 7-10, Porto, pp. 196-203.

GUO, B. e J.-L. PEYRON. 1995. Optimiser la sylviculture à lon terme des peuplements forestiers équiennes grâce au logiciel Sylopt. *Rév. For. Fr.* nº sp.: 120-130.

HAIGHT, R. G., J. D. BRODIE, and W. G. DAHMS. 1985. A dynamic programming algorithm for optimization of Lodgepole pine management. *For. Sci.* **31**:321-330.

KEMPER, R. E., and L. S. DAVIS. 1976. *Costs of environmental constraints on timber harvesting and regeneration*. *J. For.* **74**(11):754-756.

MARTIN, G. L., and A. R. EK. 1981. A dynamic programming analysis of silvicultural alternatives for red pine plantations in Wisconsin. *Can. J. For. Res.* **11**:370-379.

MARTINS, L. D., and A. S. HALL. 1995. *Guia prático de ordenamento das matas*. Instituto Florestal. Estudos e Informação no. 309, 46 p.

PÁSCOA, F. 1997. Optimização da revolução dos povoamentos florestais. *Silva Lusitana* **5**(2): 151-167.

PELKKI, M. 1997. The effects of neighborhood storage size on dynamic programming solutions. *For. Sci.* **43**: 387-395.

RITTERS, K., J. D. BRODIE, and D. W. HANN. 1982. Dynamic programming for optimization of timber production and grazing in ponderosa pine. *For. Sci.* **28**:517-526.

TAHA, H. A. 1992. *Operations Research*. An introduction. Ed. 5. MacMillan Publishing Company, New York, 822 p.