

## 5 Modelo e Resultados

Esse capítulo apresenta o modelo empregado nesse trabalho, os parâmetros utilizados e os resultados obtidos.

As simulações foram realizadas com o programa Matlab.

### 5.1. Modelos Florestais

A análise em questão se concentra sobre dois produtos: a madeira e o carbono, esse sob a forma de CO<sub>2</sub>. De maneira a se determinar o valor total da floresta, torna-se necessário saber o valor da madeira e o valor do carbono armazenado pela biomassa florestal. O valor da madeira é dado pelo produto entre o volume de madeira produzida e seu preço de mercado. Já o valor do carbono armazenado será dado pelo produto entre o volume de CO<sub>2</sub>-equivalente seqüestrado pela floresta e seu preço no comércio internacional de emissões.

Supondo uma floresta uniforme, o volume da biomassa florestal ao longo do tempo é determinístico e pode ser representado pela curva de crescimento de Schumacher, conforme apresentada por Rodriguez, Bueno e Rodrigues (1997):

$$Y_j = \alpha \cdot e^{\frac{-\beta}{t}} \quad (47)$$

onde  $Y_j$  é o volume (m<sup>3</sup>/ha) de madeira comercializável de uma floresta com idade  $j$  no instante  $t$ . Os autores supracitados obtiveram os valores de  $\alpha=751,336$  e  $\beta=6,0777$  para este modelo em seu estudo de eucaliptais no interior do estado de São Paulo.

A quantidade de carbono seqüestrada,  $Q_{j,C}$  (ton/ha), é calculada a partir do volume  $Y_j$  através da relação proposta por Adger e Brown, conforme citada por Ariste e Lasserre (2001):

$$Q_{j,C} = Y_j \cdot \gamma \cdot D \cdot \rho \quad (48)$$

onde  $\gamma$  é um fator de correção para o fato de o volume total da biomassa ser superior ao volume que será comercializado como madeira. Esse fator fornece a razão entre a biomassa total (raízes, tronco, ramos e folhas) e o volume de madeira utilizável.  $D$  é a densidade da madeira ( $\text{ton/m}^3$ ) e  $\rho$  é o percentual de carbono nela presente.

Ariste e Lasserre (2001) utilizam um fator  $\gamma$  de 1,6 para o caso canadense.

Carvalho (2000) argumenta que valores para  $D$  próximos de  $0,500 \text{ g/cm}^3$  (ou  $\text{ton/m}^3$ ) estão dentro de uma faixa aceita para a produção de celulose de eucalipto.

Segundo o Australian Greenhouse Office (AGO, 2002), aproximadamente 50% da biomassa seca do eucalipto é composta por carbono. Isso corresponde a um fator  $\rho$  de 0,50, se supusermos que esta proporção é uniforme para todas as partes da árvore.

O valor de uma tonelada de carbono armazenado será dado pelo valor de mercado de um Certificado de Emissões Reduzidas (CER) para o equivalente em  $\text{CO}_2$  seqüestrado. Para se chegar à quantidade equivalente de  $\text{CO}_2$  ( $\text{ton/ha}$ ) a partir do carbono presente na biomassa ( $Q_{j,C}$ ) usa-se a expressão:

$$Q_{j,\text{CO}_2} = Q_{j,C} \cdot 3,664 \quad (49)$$

onde o fator 3,664 corresponde à razão entre as massas de 1 mol de  $\text{CO}_2$  (44,01088g) e de 1 mol de carbono (12,011g).

## 5.2. Modelo Teórico

O problema de exploração florestal possui três características importantes. A primeira é o fato de as decisões serem parcialmente irreversíveis. Esta irreversibilidade é devida ao fato de uma floresta, uma vez derrubada, levar alguns anos para se regenerar e atingir a maturidade (no caso do eucalipto pode levar 7 ou 14 anos, dependendo do uso a ser feito da madeira). Em segundo lugar, trata-se de um problema estocástico. A receita que será obtida com a extração da madeira não é conhecida uma vez que o preço desse produto oscila estocasticamente ao longo do tempo. Paralelamente, existe também o fato de o problema de exploração florestal ser um problema dinâmico, pois se desejam estudar as idades ótimas de corte ao longo do tempo. Estas três características justificam o uso da Teoria das Opções Reais para avaliar o cultivo florestal e determinar a duração ótima das rotações.

A modelagem do problema segue aquela adotada por Ariste e Lasserre (2001), a qual foi inspirada na de Thomson (1992). Este modelo pressupõe válidas as seguintes hipóteses:

- A floresta gera uma externalidade climática, isto é, o armazenamento de  $\text{CO}_2$  pela floresta dá a ela um potencial de diminuir o nível de GEE na atmosfera. A intensidade desta externalidade é função do volume da biomassa florestal e, portanto, da idade das árvores;
- O valor do benefício social da redução de  $\text{CO}_2$  da atmosfera é exógeno e é refletido no valor de mercado dos CERs;
- O crescimento das árvores não é afetado por elementos aleatórios;
- O preço da madeira é estocástico e segue um movimento geométrico browniano;
- A floresta é explorada por sua madeira e por sua capacidade de absorver  $\text{CO}_2$ . De outra forma a exploração florestal seria abandonada após o corte das árvores e o terreno nu seria aproveitado para um melhor uso alternativo;
- O horizonte de planejamento é infinito; e
- O objeto da análise é uma floresta uniforme, isto é, um conjunto de árvores todas da mesma espécie e com a mesma idade.

O processo estocástico do preço da madeira é dado por um movimento geométrico browniano:

$$dP = \mu P dt + \sigma P dz \quad (50)$$

onde  $P$  é o preço do ativo no instante  $t$ ;  $\mu$  é a taxa de crescimento esperado de  $P$  (parâmetro de *drift*);  $\sigma$  representa a volatilidade de  $P$  (desvio-padrão instantâneo); e  $dz$  é o incremento de um processo de Wiener.

Para a solução do problema será utilizado o modelo binomial de Cox, Ross e Rubinstein (1979). Neste modelo, o processo estocástico contínuo do preço do ativo descrito pela eq. (50) é substituído por um caminho aleatório discreto com dois estados,  $u$  (*up*) e  $d$  (*down*), que correspondem a uma alta e uma baixa do preço, respectivamente. Supondo que o preço inicial do ativo é  $P$ , no instante seguinte ele poderá aumentar até o nível  $u \cdot P$  (estado de alta) ou cair até  $d \cdot P$  (estado de baixa). A probabilidade de um movimento de alta é  $\pi$  e, portanto, a probabilidade de um movimento de baixa é  $1 - \pi$ .

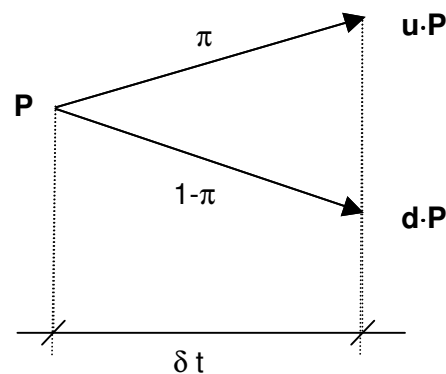


Figura 6: Árvore binomial com 1 passo

Quando o intervalo de tempo  $\delta t$  tende a zero, o processo binomial converge para o MGB contínuo dado pela eq. (50) e os parâmetros  $u$ ,  $d$  e  $\pi$  são

dados pelas expressões  $u = e^{\sigma\sqrt{\delta t}}$ ,  $d = u^{-1}$  e  $\pi = \frac{e^{\mu\delta t} - d}{u - d}$ .

A partir desta estrutura básica, pode-se construir uma árvore que mostre as possíveis evoluções do preço ao longo do tempo e suas respectivas probabilidades.

Quando se consideram os benefícios relativos ao carbono seqüestrado, torna-se relevante, além da área florestal, saber a quantidade de CO<sub>2</sub> liberada quando a floresta é derrubada, fator que dependerá do uso dado à madeira pois diferentes usos terão impactos distintos na liberação de CO<sub>2</sub> após o corte. Para se levar esse fato em consideração, o modelo faz uso de um coeficiente  $\lambda$ , tal que  $0 \leq \lambda \leq 1$ , definido como sendo a fração do carbono que retorna à atmosfera durante e após o corte das árvores, na forma de CO<sub>2</sub> (queima) ou de CH<sub>4</sub> (decomposição). Caso a madeira seja utilizada na construção civil ou na indústria moveleira ela permanecerá integralmente conservada e o carbono restará seqüestrado, tendo o coeficiente neste caso o valor  $\lambda=0$ . Por outro lado, o benefício ecológico do seqüestro do carbono será parcial se a madeira for utilizada para a indústria de papel e celulose ou de outros materiais recicláveis, onde o coeficiente assumirá valores intermediários ( $0 < \lambda < 1$ ). No outro extremo temos o caso no qual a madeira é transformada em lenha ou carvão, situação na qual ela será queimada e todo o carbono armazenado retornará para a atmosfera, o que corresponderia a um benefício ecológico nulo e teríamos então  $\lambda=1$ .

Qualquer que seja o cenário em questão ( $\lambda=0$ ,  $0 < \lambda < 1$  ou  $\lambda=1$ ), se a floresta fosse derrubada hoje a sociedade receberia o valor do terreno, o valor da madeira e o valor correspondente ao benefício ecológico líquido, sendo esse último dado pelo valor capitalizado dos fluxos de benefícios correspondentes à manutenção de uma fração  $(1-\lambda)$  da massa total de carbono armazenada na madeira. Caso a decisão seja a de esperar mais um período, o valor da floresta incluirá o valor social do carbono armazenado nas árvores. Durante essa espera, a sociedade ainda colhe o benefício do CO<sub>2</sub> absorvido pela floresta, benefício este cujo valor será refletido nos CERs gerados.

O critério de maximização do fluxo de caixa impõe que, qualquer que seja a decisão tomada pelo administrador florestal, o valor total da floresta para a sociedade será o maior dentre dois valores: o valor alcançado pelo corte imediato das árvores e a esperança daquele que será obtido ao se aguardar mais um período. Essa relação pode ser expressa como uma equação de Bellman:

$$V(P_t, Y_{t,j}, Z) = \text{Max} \left\{ P_t Y_{t,j} + (1-\lambda) \left( \frac{Z}{r} \right) Q_{t,j} + V(P_t, Y_{t,0}, Z); \right. \\ \left. \frac{E[V(P_{t+1}, Y_{t+1,j+1}, Z)] - C + ZQ_{t,j}}{(1+r)} \right\} \quad (51)$$

onde  $P_t$  é o preço da madeira no instante  $t$ ;  $Y_{t,j}$  é o volume de madeira no instante  $t$  para uma floresta com idade  $j$ ;  $Z$  é o valor de mercado de um CER;  $Q_{t,j}$  é a quantidade de CO<sub>2</sub> armazenada no instante  $t$  para uma floresta de idade  $j$ ;  $C$  representa os custos necessários para a gestão da floresta durante o período de espera;  $r$  é a taxa de desconto apropriada.

O valor total da floresta caso haja corte imediato das árvores é dado pela soma de três termos:  $P_t Y_{t,j}$ , que representa a receita obtida com a venda da madeira no instante  $t$  da floresta com idade  $j$ ; o termo  $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$ , que representa o valor do terreno de uma floresta de idade  $j=0$  (antes do plantio das mudas) no instante  $t$ ; e o termo  $(1-\lambda)(Z/r)Q_{t,j}$ , que representa o estoque de benefício ecológico líquido dado que uma fração  $\lambda$  do CO<sub>2</sub> seqüestrado retorna à atmosfera. Este valor total é comparado com aquele que é esperado caso se opte por aguardar mais um período. Esse valor, por sua vez, é dado pela soma do valor da floresta no instante seguinte,  $V(P_{t+1} Y_{t+1,j+1}, Z)$ , com o fluxo do benefício ecológico obtido durante a espera,  $ZQ_{t,j}$ , subtraído o custo de gestão  $C$  incorrido durante a espera.

Sendo o preço  $P_t$  uma variável que segue um processo estocástico, só se pode calcular com exatidão o valor da floresta no caso de ela ser derrubada imediatamente, visto que nesse caso tanto  $P_t$  como  $Y_t$  são conhecidos. Os valores  $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$  e  $V(P_{t+1} Y_{t+1,j+1}, Z)$  dependem da realização de preços incertos ao longo do tempo.

Em qualquer instante  $t$ , o processo estocástico pode ser descrito por dois estados: o preço  $P_t$  e o volume  $Y_t$ . O modelo binomial determina o processo seguido pela variável preço, de modo que os valores  $V(P_t, Y_{t,0}, Z)$  e  $V(P_{t+1}, Y_{t+1,j+1}, Z)$  podem ser determinados explicitamente em cada nó da árvore binomial dado que a função de crescimento das árvores é conhecida. Substituindo  $E[V(P_{t+1}, Y_{t+1,j+1}, Z)]$  por seu valor em  $t$ , calculado a partir das probabilidades  $\pi$  e  $1-\pi$ .

$$V(P_t, Y_{t,j}, Z) = \text{Max} \left\{ P_t Y_{t,j} + (1 - \lambda) \left( \frac{Z}{r} \right) Q_{t,j} + V(P_t, Y_{t,0}, Z); \right. \\ \left. \frac{\pi V(uP_t, Y_{t+1,j+1}, Z) + (1 - \pi) V(dP_t, Y_{t+1,j+1}, Z) - C + ZQ_{t,j}}{(1 + r)} \right\} \quad (52)$$

onde  $V(uP_t, Y_{t+1,j+1}, Z)$  e  $V(dP_t, Y_{t+1,j+1}, Z)$  representam o valor da floresta um período à frente nos caso de elevação e queda do preço, respectivamente.

O mesmo raciocínio pode ser aplicado em relação ao valor do terreno nu. Uma vez derrubada, a floresta pode ser regenerada para um novo ciclo de cultivo ou convertida para um uso alternativo caso a primeira alternativa não seja economicamente atrativa. O mesmo critério de maximização do fluxo de caixa nos fornece o valor do terreno descampado:

$$V(P_t, Y_{t,0}, Z) = \text{Max} \left\{ \frac{\pi V(uP_t, Y_{t+1,1}, Z) + (1 - \pi) V(dP_t, Y_{t+1,1}, Z) - C}{(1 + r)} - R; Alt \right\} \quad (53)$$

onde  $V(uP_t, Y_{t+1,1}, Z)$  e  $V(dP_t, Y_{t+1,1}, Z)$  representam respectivamente o valor da floresta com um ano de idade um período à frente nos caso de elevação e queda do preço.

Caso a decisão seguinte ao corte seja a de reiniciar imediatamente o cultivo, incorrer-se-á num custo de regeneração  $R$  e no período seguinte a floresta será composta por um uma plantação de mudas com idade  $j=1$ , mantidas a um custo  $C$ . Caso a decisão seja a de alienar o terreno para um uso alternativo, esse será vendido pelo valor  $Alt$  ou, caso não haja nenhum outro uso para o terreno, simplesmente abandonado ( $Alt=0$ ).

### 5.3. Resolução

As eq. (52) e (53) mostram que o valor esperado de adiar o corte e o valor do terreno dependem dos respectivos valores no instante seguinte; portanto, valores futuros devem ser avaliados em primeiro lugar. Problemas desta natureza são resolvidos através de programação dinâmica. Além disso, trata-se de um problema de horizonte infinito. Isso impõe uma dificuldade, que será contornada substituindo-se o horizonte infinito por um horizonte finito tal que  $t=1,2,3,\dots,T$ , onde  $T$  é um período final para o qual somos obrigados a abandonar a atividade florestal, cortando as árvores independentemente da idade e preço da madeira e vendendo o terreno para um uso alternativo. Se escolhermos um período  $T$  suficientemente grande o erro de aproximação torna-se desprezível.

O processo recursivo inicia-se em  $t=T$  e avalia, para cada nó de preço e volume, se a decisão ótima é derrubar a floresta ou esperar mais um período, ou seja, se o valor imediato do corte, dos benefícios externos e do terreno são maiores do que o valor presente do valor esperado da decisão ótima do período seguinte, assim até o instante presente ( $t=0$ ).

A condição de fronteira é o valor da floresta no estágio final  $t=T$ , isto é, a soma dos valores da madeira, do benefício ecológico líquido e do terreno para cada nó terminal da árvore. Neste instante o valor do terreno é considerado como sendo exógeno e dado por  $V(P_T, Y_{T,0}, Z)=Alt$ , ficando o valor da floresta neste instante como sendo:

$$V(P_{T,i}, Y_{T,j}, Z) = P_{T,i} Y_{T,j} + (1 - \lambda) \left( \frac{Z}{r} \right) Q_{T,j} + Alt \quad (54)$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, I \quad j = 1, 2, 3, \dots, J$$

onde  $I$  é o número total de nós terminais da árvore binomial ( $I = 2T-1$ ) e  $J$  é a idade máxima (em períodos) alcançada pelas árvores permitida no modelo de maneira que, caso a floresta atinja a idade  $J$ , a decisão deve ser derrubá-la independente do preço.

Em seguida, as eq. (52) e (53) são aplicadas para cada nó da árvore no instante  $t=T-1$  de maneira a determinar  $V(P_{T-1}, Y_{T-1,j}, Z)$  e o valor do terreno nu



$V(P_{T-1}, Y_{T-1,0}, Z)$ . A escolha da estratégia de maior valor para cada instante traz embutida a decisão ótima de derrubar as árvores ou de esperar e, uma vez que se optou por derrubá-las, de regenerar ou abandonar o terreno. Este procedimento continua retroativamente até o nó inicial, em  $t=0$ .

O modelo binomial avalia a decisão de corte para cada nó da árvore, ou seja, para cada preço considerado o modelo determina a idade na qual a maturidade financeira do investimento florestal é atingida. Se a idade real da floresta for maior que a idade de maturação calculada deve-se derrubá-la; caso contrário, deve-se deixá-la desenvolver-se aguardando um período. No período seguinte, aplica-se o modelo mais uma vez para o preço de mercado observado e outra decisão gerencial pode ser tomada com base nos resultados.

A relação entre idade ótima de corte e preço da madeira é calculada com base num modelo determinístico. Isso pode ser feito fixando-se os parâmetros de *drift* e volatilidade do MGB da eq. (50) em zero, o que torna  $P$  constante. Outra maneira seria analiticamente, pela maximização do valor presente líquido do investimento florestal em função da idade de corte  $A$ . Considerando-se o caso de uma única rotação, o VPL da floresta é dado por:

$$V_1(A) = e^{-rA}PY(A) - R + e^{-rA}(1-\lambda)\left(\frac{Z}{r}\right)Q(A) + \int_0^A e^{-rt}ZQ(t)dt \quad (55)$$

Isto é, no momento do corte a floresta de idade  $A$  retorna a seu administrador o valor líquido da madeira,  $PY(A)$ , o valor do carbono seqüestrado líquido das perdas ecológicas,  $(1-\lambda)(Z/r)Q(A)$ , e o fluxo de dividendos graças ao serviço de seqüestro de carbono pela floresta, dado pela integral na eq. (55).

Após o corte das árvores a terra está pronta para ser novamente cultivada e receber as mudas para a próxima rotação. Sendo o preço constante nesse modelo, as rotações subseqüentes terão igual duração ( $A_1 = A_2 = \dots = A$ ). O VPL da floresta levando-se em consideração todas as infinitas rotações futuras será dado por:

$$V(A) = \sum_{\omega=0}^{\infty} e^{-r\omega A} \left[ e^{-rA}PY(A) - R + e^{-rA}(1-\lambda)\left(\frac{Z}{r}\right)Q(A) + \int_0^A e^{-rt}ZQ(t)dt \right] \quad (56)$$

onde  $\omega$  representa a rotação, isto é, a duração do intervalo de tempo entre a regeneração e o corte das árvores.

A condição de primeira ordem para o valor ótimo de  $A$  requer que o benefício obtido por se manter a floresta de pé seja igual ao custo de oportunidade por não se dar início ao corte<sup>10</sup>.

$$P \frac{\partial Y(A)}{\partial A} + \lambda ZQ(A) + (1 - \lambda) \left( \frac{Z}{r} \right) \frac{\partial Q(A)}{\partial A} = rV(A) + rPY(A) \quad (57)$$

O lado esquerdo da eq. (57) representa o benefício de se conservar a floresta de pé. O termo  $P \frac{\partial Y(A)}{\partial A}$  é o incremento da receita líquida obtida com a madeira por unidade de tempo;  $\lambda ZQ(A)$  corresponde à diferença entre o fluxo de benefício ecológico fornecido pela floresta viva,  $ZQ(A)$ , e o fluxo de benefício uma vez derrubada a floresta,  $(1-\lambda)ZQ(A)$ . Numa situação na qual todo o carbono permanece armazenado ( $\lambda=0$ ), o dividendo ecológico será o mesmo havendo ou não o corte das árvores. No caso de haver alguma perda ecológica ( $0 < \lambda < 1$ ), parte desse dividendo desaparece durante ou após o corte; nesse caso, adiar o momento do desbaste prolonga o recebimento desses dividendos e o aumento temporal no valor do carbono seqüestrado é dado por  $\left( \frac{Z}{r} \right) \frac{\partial Q(A)}{\partial A}$ . Se houver perda total após o corte ( $\lambda=1$ ) esse dividendo desaparece.

Do lado direito da eq. (57), o termo  $rPY(A)$  é o custo de oportunidade de se manter a floresta de pé e corresponde ao rendimento ganho aplicando-se a receita líquida obtida com a venda da madeira a uma taxa de juros  $r$ . Além disso, o fato de se adiar o corte das árvores implica outro custo de oportunidade, que é o custo de se retardar o desbaste das plantações futuras. Esse custo é medido como um custo de oportunidade do terreno nu e é dado por  $rV(A)$ . Conforme mostra a eq. (56), este custo inclui o valor da madeira de futuras plantações e o valor do carbono que será armazenado futuramente.

A condição de primeira ordem dada pela eq. (57) traduz-se na condição de que a floresta deve ser desbastada quando a soma do valor marginal da madeira, do valor líquido do carbono seqüestrado e do dividendo incremental obtido for igual à soma do custo de oportunidade de investir o capital que seria obtido com a venda da madeira e com o custo de oportunidade do terreno. Esse,

---

<sup>10</sup> Demonstração no Apêndice A.

por sua vez, já inclui os valores do carbono seqüestrado e da madeira nos ciclos de cultivo futuros.

Fazendo  $Z=0$  na eq. (57) obtemos o modelo de Faustmann<sup>11</sup>. Nele, o valor do crescimento marginal da madeira cobre por si só os custos de oportunidade associados à madeira e ao terreno, o que implica, *ceteris paribus*, um maior aumento de volume.

---

<sup>11</sup> Demonstração no Apêndice B.

#### 5.4. Parâmetros

Os valores dos parâmetros  $C$ ,  $D$ ,  $R$  e  $Alt$  serão baseados nos dados fornecidos por Levi (1996). Em seu trabalho, desenvolvido sobre projetos de exploração de eucaliptais na região Sudeste do Brasil, o custo do solo apropriado para o cultivo de eucalipto situa-se entre US\$ 400 e US\$ 500 por hectare. O valor médio dessa faixa, US\$ 450/ha, será tomado como valor de revenda do terreno para uso alternativo, subentendendo-se que não se está considerando nenhuma valorização ou desvalorização do terreno devido à atividade de cultivo de eucaliptos. Essa premissa é discutível, visto que a atividade em questão normalmente se instala em áreas com economia pouco desenvolvida e, com o passar do tempo, promove o desenvolvimento e o progresso da região e, conseqüentemente, a valorização das terras. Porém, para simplificar o modelo, o valor do terreno será considerado constante e exógeno.

O custo de regeneração da floresta,  $D$ , é igual a US\$ 500/ha nas melhores condições. O custo de manutenção  $C$ , relativo às despesas incorridas com a prevenção de pragas e incêndios e também à competição das árvores pela luz solar, é tido como decrescente ao longo do período de rotação. Levi utiliza a seguinte relação custo-idade:

Tabela 2: Custo de manutenção ao longo da rotação

<b>Idade</b>	<b>Custo de manutenção (US\$/ha)</b>
2º ano	100
3º ano	60
4º ao 7º ano	40

Por simplicidade, considerou-se o custo de manutenção como constante e igual à média ponderada dos valores da tabela 2, isto é,  $C = \text{US\$ } 45,7/\text{ha}$  por ano. Outra simplificação do modelo é quanto aos custos de extração e transporte da madeira. Segundo Levi, os custos de extração são função do volume da madeira extraída. Os custos de transporte, por sua vez, são função do peso da madeira extraída, que é proporcional ao volume se supusermos constante a densidade. Para todos os efeitos, o modelo considerará os custos de extração

contidos nos custos de regeneração e os custos de transporte desprezíveis, como seria o caso se as indústrias se encontrassem nas redondezas da área de cultivo.

A idade máxima das árvores,  $J$ , foi fixada em 30 anos. A partir dessa idade supõe-se que as árvores começam a morrer. O intervalo de tempo considerado no modelo também foi fixado em 30 anos. Apesar de, teoricamente, estarmos considerando um horizonte de planejamento infinito, a fixação de um horizonte de 30 anos conduz a resultados que se alteram muito pouco se estendermos o horizonte de tempo. A taxa de juros livre de risco foi fixada em 14% ao ano. O valor da tonelada da redução de emissão de CO<sub>2</sub> equivalente (preço do carbono) será considerado como igual a \$1, valor próximo do negociado na Chicago Climate Exchange (CCX) durante a confecção desse trabalho. Todos os valores estão expressos em dólares.

## 5.5. Resultados

Basicamente, o modelo utilizado mostra que a duração da rotação, isto é, a idade ótima de corte das árvores, aumenta consideravelmente em situações de baixa no preço da madeira em comparação com o modelo de Faustmann, que não leva em consideração o seqüestro de carbono. O gráfico da Fig. 7 mostra a relação entre o preço de mercado da madeira de eucalipto,  $P$ , e a duração ótima da rotação de acordo com os modelos de Faustmann (VET), Ariste-Lasserre (A-L) para os casos de seqüestro integral ( $\lambda=0$ ) e liberação total ( $\lambda=1$ ) com  $Z=1$  e com o critério volumétrico exposto por Rodriguez, Bueno e Rodrigues (1997).

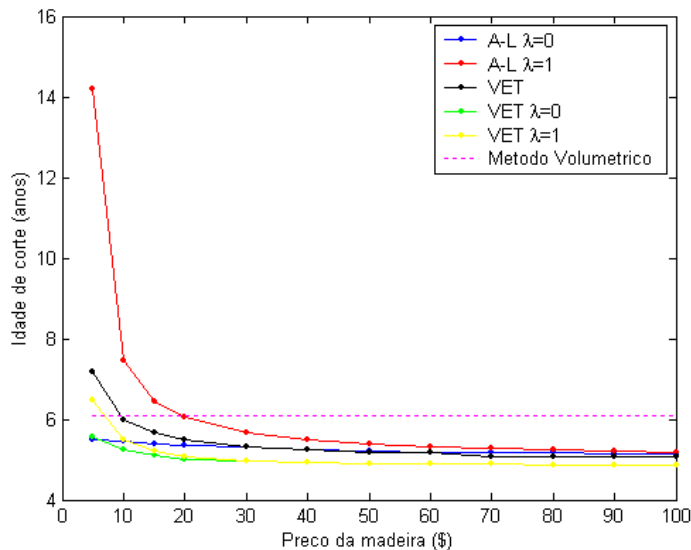


Figura 7: Relação entre o preço da madeira e a idade de corte

A diferença entre os casos de liberação total ( $\lambda=1$ ) e de seqüestro integral ( $\lambda=0$ ) é visível, tanto no modelo de Ariste-Lasserre como no de Faustmann com carbono. Enquanto no primeiro caso a idade de corte é bastante sensível a situações de baixa no preço da madeira, no segundo caso essa idade é pouco afetada pelo preço, ocorrendo uma leve tendência de se abreviar a rotação com o aumento do preço da madeira. Essa diferença pode ser explicada levando-se em consideração que, para  $\lambda=1$ , após o corte das árvores todo o carbono será devolvido à atmosfera, resultando num saldo de carbono igual a zero, fazendo desaparecer assim os CERs que haviam sido alocados ao empreendimento. Por

outro lado, mantendo-se a floresta de pé, o estoque de carbono seqüestrado é conservado e continua-se a receber os benefícios oriundos desse fluxo, levando a uma postergação do corte das árvores e, portanto, a um prolongamento da idade de corte, que será tanto maior quanto menor for o preço da madeira praticado no mercado. Já para um  $\lambda=0$ , o carbono permanecerá seqüestrado após o corte das árvores e o administrador não terá incentivos para adiar o corte de modo a compensar uma suposta perda com a liberação. Torna-se mais vantajoso, nesse caso, cortar logo as árvores e replantar a floresta para tirar proveito da venda da madeira e do carbono que será absorvido pela rotação seguinte. Nota-se também na figura 7 que, para  $\lambda=0$ , a rotação é somente ligeiramente abreviada com o aumento do preço da madeira. Observa-se também que o modelo A-L conduz sempre a rotações mais longas que o modelo VET nos dois casos ( $\lambda=0$  e  $\lambda=1$ )

O modelo de Faustmann sem carbono, por sua vez, tomou uma posição intermediária entre os modelos de A-L e Faustmann com carbono. Se considerarmos o seqüestro de carbono nesse modelo, o efeito também será o de abreviar a rotação, conforme mostram as curvas VET  $\lambda=0$  e  $\lambda=1$ . Contudo, para preços elevados, o ganho obtido pela venda da madeira suplanta os ganhos e perdas com o carbono, fazendo as diferenças entre os modelos diminuírem e as respectivas idades ótimas de corte convergirem para valores próximos e independentes do preço. A rotação ótima encontrada pelo método volumétrico, por sua vez, independe de  $P$  pois é calculada usando-se apenas considerações acerca do crescimento volumétrico da floresta.

Outro fator que influencia a duração da rotação é o valor do benefício ecológico,  $Z$ , refletido no preço do certificado de redução de emissão de carbono e cuja influência é ilustrada pelas Fig. 8 e 9. A mesma tendência de diminuição da rotação com o aumento no preço é observada conforme  $Z$  aumenta. Para  $\lambda=1$ , após o corte das árvores, todo o carbono será devolvido à atmosfera, resultando num saldo de carbono nulo. Mantendo-se a floresta de pé, o estoque de carbono seqüestrado é mantido, continuando o administrador florestal a receber os benefícios oriundos do fluxo do  $\text{CO}_2$  absorvido, levando a um adiamento do corte das árvores e, portanto, a um prolongamento da idade de corte, que será tanto maior quanto maior for a perda pela liberação imediata do carbono, ou seja, quanto maior for  $Z$ . A sensibilidade em relação ao preço  $Z$  é maior para baixos valores de  $P$ . Isso ocorre porque a importância relativa do

carbono seqüestrado nesse caso é maior que a importância de  $P$  na determinação da rotação ótima.

Para  $\lambda=0$ , a tendência da rotação também é de se abreviar com o aumento no preço da madeira, porém a influência de  $Z$  se dá de maneira peculiar. Para valores baixos de  $P$ , a tendência é de que baixos valores de  $Z$  aumentem a idade de corte das árvores. Aumentando-se  $P$ , atinge-se um valor onde a idade ótima de corte independe de  $Z$  e a partir do qual a situação se inverte, tendo então altos valores de  $Z$  o efeito de aumentar a idade de corte. Outra diferença está na variação na idade de corte, que é muito menor no caso  $\lambda=0$  para uma mesma faixa de  $P$ .

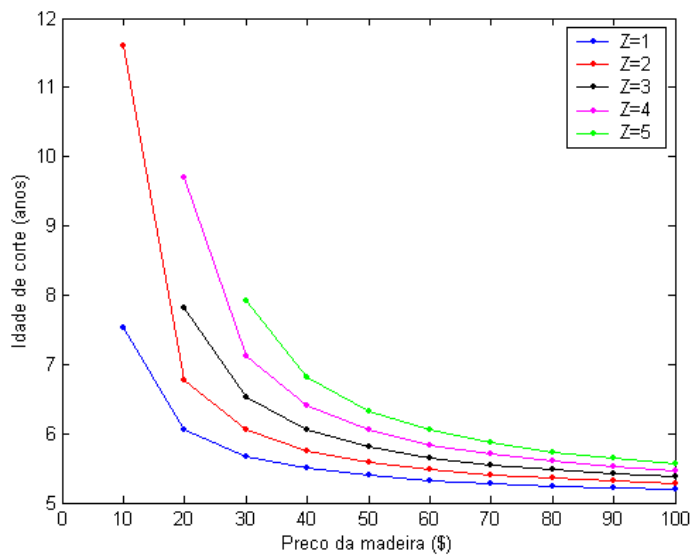


Figura 8: Relação entre  $P$  e a idade de corte para vários valores de  $Z$  e  $\lambda=1$  (modelo A-L)



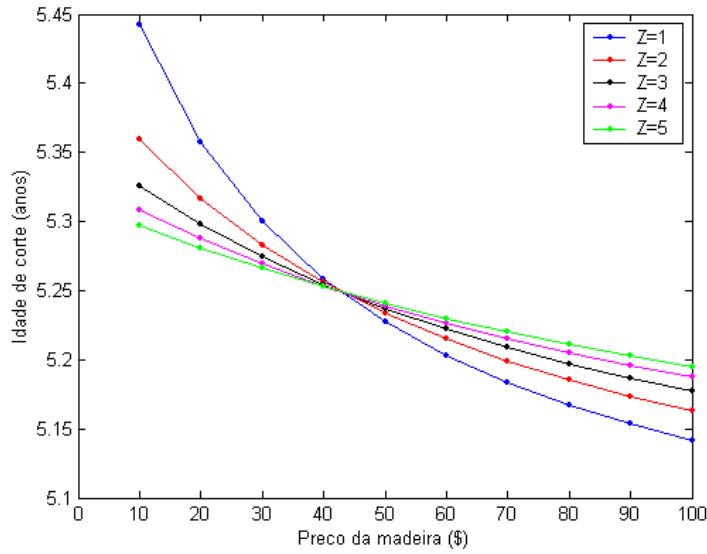


Figura 9: Relação entre  $P$  e a idade de corte para vários valores de  $Z$  e  $\lambda=0$  (modelo A-L)

O uso que será feito da madeira, e portanto o percentual do carbono efetivamente seqüestrado  $(1-\lambda)$ , também influencia a duração da rotação, no sentido de prolongá-la para valores de  $\lambda$  próximos de 1. O efeito desse percentual sobre a rotação, no entanto, ocorre de maneira desigual de acordo com o preço da madeira. Para valores baixos de  $P$ , a influência de  $Z$  sobre a rotação é bastante sentida, conduzindo a um aumento de até 33% na duração da rotação (caso  $Z=5$ ) variando-se  $\lambda$  de 0 até 1. Para valores altos de  $P$ , por outro lado, a influência de  $Z$  é pequena, provocando um aumento de 1% na rotação nessa mesma escala de variação de  $\lambda$  (também caso  $Z=5$ ). Os gráficos das figuras 10, 11 e 12 ilustram essa relação.

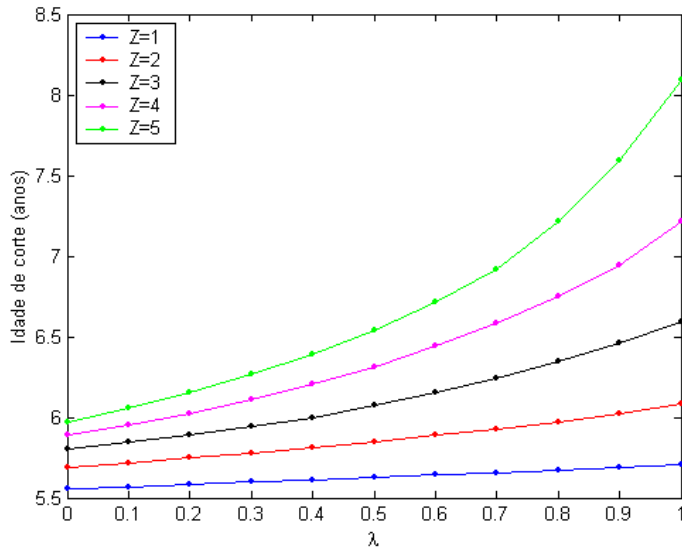


Figura 10: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $Z$  e  $P=15$

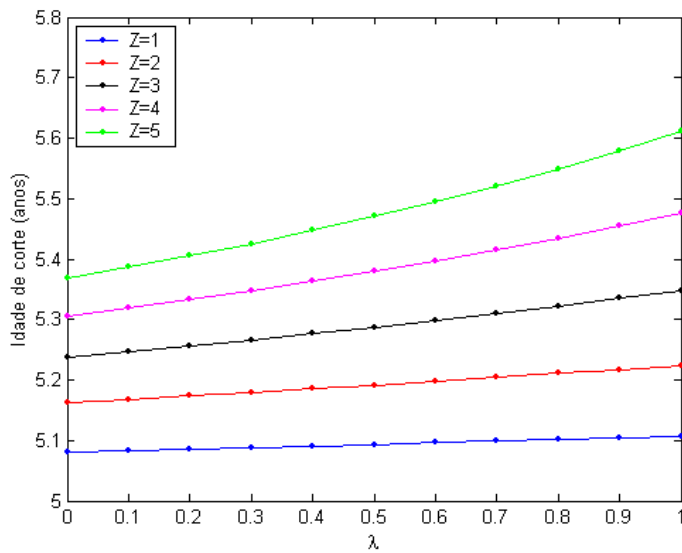


Figura 11: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $Z$  e  $P=40$

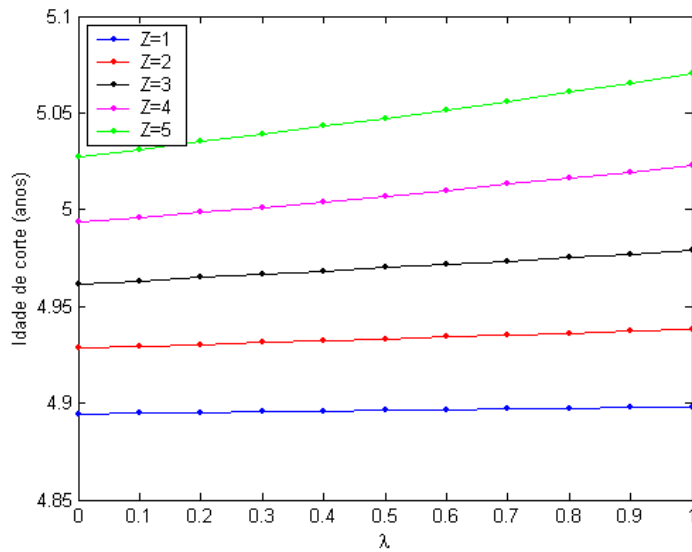


Figura 12: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $Z$  e  $P=100$

Nos três gráficos o efeito de  $Z$  sobre a duração da rotação ocorre no sentido de prolongá-la, sendo mais intenso esse efeito quanto menor o percentual de carbono retido ( $1-\lambda$ ). Esse resultado é intuitivo, pois havendo um percentual menor de carbono sendo mantido após o corte existirá maior interesse por parte dos administradores de retardar o corte das árvores e assim se beneficiarem dos fluxos de dividendos gerados pela absorção do carbono, interesse que será tanto maior quanto mais valiosos forem os dividendos ganhos. A influência do preço da madeira, por outro lado, ocorre no sentido contrário. Quanto maior  $P$ , menor a variação na duração da rotação para um dado aumento em  $\lambda$  pois menor será o interesse de se adiar o corte.

Essa mesma análise, feita variando-se o preço da madeira para três situações possíveis para  $Z$ , mostra a mesma tendência de prolongamento das rotações, tendência essa que se acentua conforme diminui o preço da madeira e conforme se aumenta  $Z$  ou  $\lambda$ , como se vê nas figuras 13, 14 e 15.

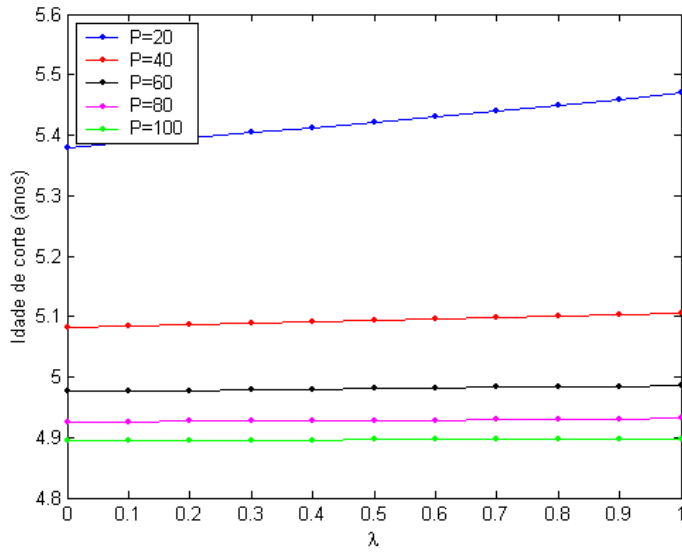


Figura 13: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $P$  e  $Z=1$

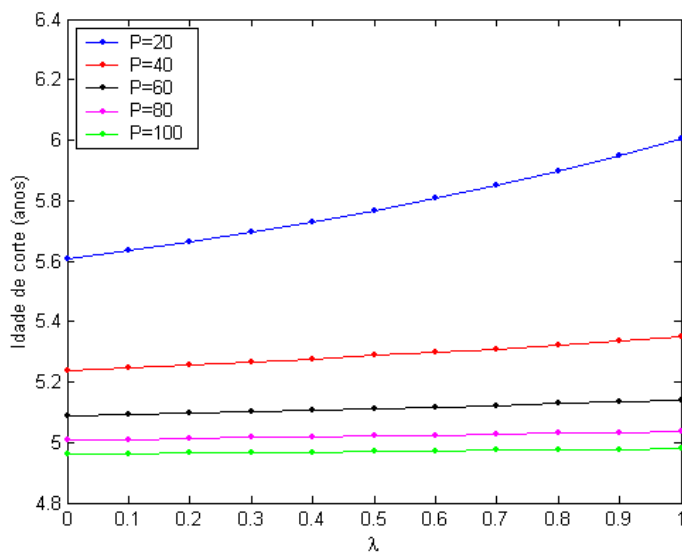


Figura 14: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $P$  e  $Z=3$

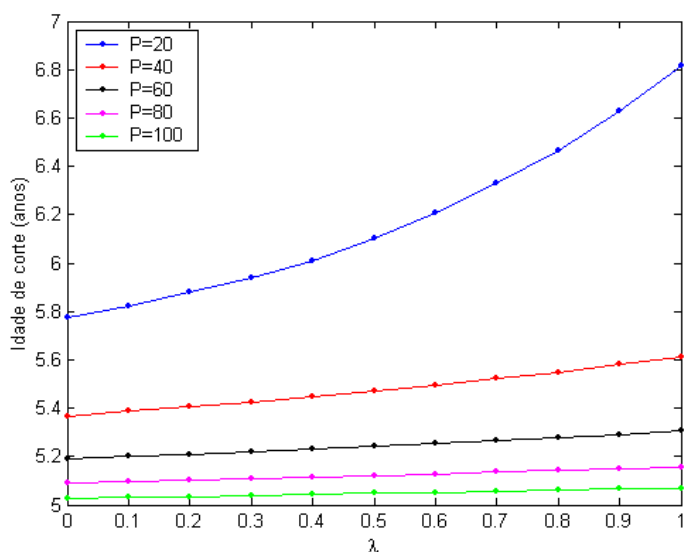


Figura 15: Relação entre  $\lambda$  e a idade de corte para vários valores de  $P$  e  $Z=5$

Um aumento no preço da madeira se traduz em um aumento no custo de oportunidade de se manter a floresta intacta, contribuindo para a abreviação da rotação. Aumentos em  $\lambda$  ou  $Z$ , por outro lado, tornam a espera mais atrativa, levando ao prolongamento da rotação.

As tabelas 3, 4 e 5 mostram a evolução do valor da floresta e da idade de corte (em negrito) das árvores de acordo com o preço da madeira conforme os modelos de Faustmann e de Ariste-Lasserre com liberação total ( $\lambda=1$ ) e seqüestro integral ( $\lambda=0$ ), respectivamente.

Tabela 3: Valor da floresta e idade de corte de acordo com  $P$  para o modelo de Faustmann.

Idade (anos)	Preço (\$)									
	P=10	P=20	P=30	P=40	P=50	P=60	P=70	P=80	P=90	P=100
5	3.140	5.830	8.519	11.209	13.899	16.596	19.306	22.024	24.748	27.475
5 1/12	3.178	5.907	8.635	11.364	14.092	16.821	<b>19.561</b>	<b>22.308</b>	<b>25.061</b>	<b>27.818</b>
5 2/12	3.217	5.983	8.750	11.516	<b>14.283</b>	<b>17.049</b>	19.819	22.596	25.379	28.165
5 3/12	3.254	6.058	8.863	<b>11.667</b>	14.471	17.275	20.079	22.886	25.699	28.516
5 4/12	3.291	6.133	<b>8.974</b>	11.815	14.656	17.498	20.339	23.180	26.023	28.870
5 5/12	3.328	6.206	9.084	11.961	14.839	17.717	20.595	23.473	26.351	29.229
5 6/12	3.364	<b>6.278</b>	9.192	12.106	15.020	17.934	20.848	23.762	26.676	29.589
5 7/12	3.400	6.349	9.299	12.248	15.198	18.147	21.097	24.046	26.996	29.945
5 8/12	3.435	6.419	9.404	12.389	15.373	18.358	21.343	24.327	27.312	30.297
5 9/12	3.469	6.489	9.508	12.527	15.547	18.566	21.585	24.604	27.624	30.643
5 10/12	3.503	6.557	9.610	12.664	15.717	18.771	21.824	24.878	27.931	30.985
5 11/12	3.537	6.624	9.712	12.799	15.886	18.973	22.060	25.148	28.235	31.322
6	<b>3.570</b>	6.691	9.811	12.932	16.052	19.173	22.293	25.414	28.534	31.655

Tabela 4: Valor da floresta e idade de corte de acordo com  $P$  para  $\lambda=1$  e  $Z=1$  no modelo A-L.

Idade (anos)	Preço (\$)									
	P=10	P=20	P=30	P=40	P=50	P=60	P=70	P=80	P=90	P=100
5	3.140	5.830	8.519	11.209	13.899	16.589	19.279	21.968	24.658	27.348
5 1/12	3.178	5.907	8.635	11.364	14.092	16.821	19.549	22.278	25.006	27.734
5 2/12	3.217	5.983	8.750	11.516	14.283	17.049	19.816	22.583	25.349	<b>28.116</b>
5 3/12	3.254	6.058	8.863	11.667	14.471	17.275	<b>20.079</b>	<b>22.883</b>	<b>25.688</b>	28.492
5 4/12	3.291	6.133	8.974	11.815	14.656	<b>17.498</b>	20.339	23.180	26.021	28.863
5 5/12	3.328	6.206	9.084	11.961	<b>14.839</b>	17.717	20.595	23.473	26.351	29.229
5 6/12	3.364	6.278	9.192	<b>12.106</b>	15.020	17.934	20.848	23.762	26.676	29.589
5 7/12	3.400	6.349	9.299	12.248	15.198	18.147	21.097	24.046	26.996	29.945
5 8/12	3.435	6.419	<b>9.404</b>	12.389	15.373	18.358	21.343	24.327	27.312	30.297
5 9/12	3.469	6.489	9.508	12.527	15.547	18.566	21.585	24.604	27.624	30.643
5 10/12	3.503	6.557	9.610	12.664	15.717	18.771	21.824	24.878	27.931	30.985
5 11/12	3.537	6.624	9.712	12.799	15.886	18.973	22.060	25.148	28.235	31.322
6	3.570	6.691	9.811	12.932	16.052	19.173	22.293	25.414	28.534	31.655
6 1/12	3.603	6.757	9.910	13.063	16.216	19.370	22.523	25.676	28.829	31.983
6 2/12	3.636	6.821	10.007	13.193	16.378	19.564	22.750	25.935	29.121	32.306
6 3/12	3.668	6.885	10.103	13.320	16.538	19.756	22.973	26.191	29.408	32.626
6 4/12	3.699	<b>6.948</b>	10.197	13.446	16.696	19.945	23.194	26.443	29.692	32.941
6 5/12	3.730	7.010	10.291	13.571	16.851	20.131	23.411	26.692	29.972	33.252
6 6/12	3.761	7.072	10.383	13.694	17.004	20.315	23.626	26.937	30.248	33.559
6 7/12	3.791	7.132	10.474	13.815	17.156	20.497	23.838	27.179	30.521	33.862
6 8/12	3.821	7.192	10.563	13.934	17.305	20.676	24.047	27.419	30.790	34.161
6 9/12	3.851	7.251	10.652	14.052	17.453	20.853	24.254	27.654	31.055	34.456
6 10/12	3.880	7.309	10.739	14.169	17.598	21.028	24.458	27.887	31.317	34.747
6 11/12	3.908	7.367	10.825	14.284	17.742	21.200	24.659	28.117	31.576	35.034
7	3.937	7.424	10.910	14.397	17.884	21.371	24.857	28.344	31.831	35.318
7 1/12	3.965	7.480	10.994	14.509	18.024	21.539	25.053	28.568	32.083	35.598
7 2/12	3.992	7.535	11.077	14.620	18.162	21.704	25.247	28.789	32.332	35.874
7 3/12	4.020	7.589	11.159	14.729	18.298	21.868	25.438	29.007	32.577	36.147
7 4/12	4.047	7.643	11.240	14.836	18.433	22.030	25.626	29.223	32.819	36.416
7 5/12	<b>4.073</b>	7.696	11.320	14.943	18.566	22.189	25.812	29.436	33.059	36.682
7 6/12	4.099	7.749	11.398	15.048	18.697	22.347	25.996	29.646	33.295	36.945
7 7/12	4.125	7.801	11.476	15.152	18.827	22.502	26.178	29.853	33.529	37.204
7 8/12	4.151	7.852	11.553	15.254	18.955	22.656	26.357	30.058	33.759	37.460
7 9/12	4.176	7.903	11.629	15.355	19.081	22.808	26.534	30.260	33.987	37.713
7 10/12	4.201	7.953	11.704	15.455	19.206	22.957	26.709	30.460	34.211	37.962
7 11/12	4.226	8.002	11.778	15.554	19.330	23.105	26.881	30.657	34.433	38.209
8	4.250	8.051	11.851	15.651	19.451	23.252	27.052	30.852	34.652	38.453

Tabela 5: Valor da floresta e idade de corte de acordo com  $P$  para  $\lambda=0$  e  $Z=1$  no modelo

A-L.

Idade (anos)	Preço (\$)									
	P=10	P=20	P=30	P=40	P=50	P=60	P=70	P=80	P=90	P=100
5,01	3.952	6.676	9.400	12.124	14.847	17.571	20.295	23.019	25.743	28.467
5,02	3.958	6.686	9.415	12.143	14.872	17.600	20.329	23.057	25.786	28.514
5,03	3.964	6.697	9.430	12.163	14.896	17.629	20.362	23.095	25.828	28.561
5,04	3.970	6.707	9.445	12.183	14.920	17.658	20.396	23.133	25.871	28.609
5,05	3.976	6.718	9.460	12.202	14.945	17.687	20.429	23.171	25.914	28.656
5,06	3.982	6.728	9.475	12.222	14.969	17.716	20.462	23.209	25.956	28.703
5,07	3.987	6.739	9.490	12.242	14.993	17.744	20.496	23.247	25.999	28.750
5,08	3.993	6.749	9.505	12.261	15.017	17.773	20.529	23.285	26.041	28.797
5,09	3.999	6.760	9.520	12.281	15.041	17.802	20.562	23.323	26.083	28.844
5,10	4.005	6.770	9.535	12.300	15.065	17.830	20.595	23.360	26.126	28.891
5,11	4.011	6.781	9.550	12.320	15.089	17.859	20.629	23.398	26.168	28.937
5,12	4.017	6.791	9.565	12.339	15.113	17.887	20.662	23.436	26.210	28.984
5,13	4.023	6.801	9.580	12.359	15.137	17.916	20.695	23.473	26.252	29.031
5,14	4.028	6.812	9.595	12.378	15.161	17.944	20.727	23.511	26.294	<b>29.077</b>
5,15	4.034	6.822	9.610	12.397	15.185	17.973	20.760	23.548	<b>26.336</b>	29.123
5,16	4.040	6.832	9.624	12.417	15.209	18.001	20.793	<b>23.585</b>	26.378	29.170
5,17	4.046	6.842	9.639	12.436	15.233	18.029	20.826	23.623	26.419	29.216
5,18	4.052	6.853	9.654	12.455	15.256	<b>18.057</b>	<b>20.859</b>	23.660	26.461	29.262
5,19	4.057	6.863	9.669	12.474	15.280	18.086	20.891	23.697	26.503	29.308
5,20	4.063	6.873	9.683	12.493	15.304	18.114	20.924	23.734	26.544	29.354
5,21	4.069	6.883	9.698	12.513	15.327	18.142	20.956	23.771	26.586	29.400
5,22	4.075	6.894	9.713	12.532	<b>15.351</b>	18.170	20.989	23.808	26.627	29.446
5,23	4.080	6.904	9.727	12.551	15.374	18.198	21.021	23.845	26.668	29.492
5,24	4.086	6.914	9.742	12.570	15.398	18.226	21.054	23.882	26.710	29.538
5,25	4.092	6.924	9.757	12.589	15.421	18.254	21.086	23.919	26.751	29.583
5,26	4.097	6.934	9.771	<b>12.608</b>	15.445	18.282	21.118	23.955	26.792	29.629
5,27	4.103	6.944	9.786	12.627	15.468	18.309	21.151	23.992	26.833	29.674
5,28	4.109	6.954	9.800	12.646	15.491	18.337	21.183	24.029	26.874	29.720
5,29	4.114	6.965	9.815	12.665	15.515	18.365	21.215	24.065	26.915	29.765
5,30	4.120	6.975	<b>9.829</b>	12.684	15.538	18.393	21.247	24.102	26.956	29.811
5,31	4.126	6.985	9.844	12.702	15.561	18.420	21.279	24.138	26.997	29.856
5,32	4.131	6.995	9.858	12.721	15.584	18.448	21.311	24.174	27.038	29.901
5,33	4.137	7.005	9.872	12.740	15.608	18.475	21.343	24.211	27.078	29.946
5,34	4.143	7.015	9.887	12.759	15.631	18.503	21.375	24.247	27.119	29.991
5,35	4.148	<b>7.025</b>	9.901	12.777	15.654	18.530	21.407	24.283	27.159	30.036
5,36	4.154	7.035	9.915	12.796	15.677	18.558	21.438	24.319	27.200	30.081
5,37	4.159	7.045	9.930	12.815	15.700	18.585	21.470	24.355	27.240	30.125
5,38	4.165	7.054	9.944	12.833	15.723	18.612	21.502	24.391	27.281	30.170
5,39	4.171	7.064	9.958	12.852	15.746	18.640	21.533	24.427	27.321	30.215
5,40	4.176	7.074	9.972	12.871	15.769	18.667	21.565	24.463	27.361	30.259
5,41	4.182	7.084	9.987	12.889	15.792	18.694	21.596	24.499	27.401	30.304
5,42	4.187	7.094	10.001	12.908	15.814	18.721	21.628	24.535	27.441	30.348
5,43	4.193	7.104	10.015	12.926	15.837	18.748	21.659	24.570	27.481	30.393
5,44	<b>4.198</b>	7.114	10.029	12.944	15.860	18.775	21.691	24.606	27.521	30.437
5,45	4.204	7.124	10.043	12.963	15.883	18.802	21.722	24.642	27.561	30.481
5,46	4.209	7.133	10.057	12.981	15.905	18.829	21.753	24.677	27.601	30.525
5,47	4.215	7.143	10.071	13.000	15.928	18.856	21.784	24.713	27.641	30.569
5,48	4.220	7.153	10.085	13.018	15.950	18.883	21.816	24.748	27.681	30.613
5,49	4.226	7.163	10.099	13.036	15.973	18.910	21.847	24.783	27.720	30.657
5,50	4.231	7.172	10.113	13.054	15.996	18.937	21.878	24.819	27.760	30.701

Pode-se observar nas tabelas 3 e 4 que o valor da floresta calculado segundo os modelos de Faustmann e Ariste-Lasserre com  $\lambda=1$  são idênticos para florestas com idades no intervalo entre 5 e 6 anos, não obstante as diferentes idades de corte. Esse fato se verificou para valores de  $P$  menores que 100. Contudo, para valores de  $P$  mais altos as diferenças entre os modelos se realçam, fato esse que é ilustrado pela tabela 6.

Tabela 6: Valor da floresta com  $P=\$400$  para os modelos de Faustmann e Ariste-Lasserre com  $Z=1$ .

Idade (anos)	P = \$400		
	Faustmann	A-L ( $\lambda=1$ )	A-L ( $\lambda=0$ )
5	109.645	110.860	120.169
5 1/12	110.877	111.999	121.417
5 2/12	112.123	113.149	122.676
5 3/12	113.383	114.310	123.948
5 4/12	114.656	115.482	125.232
5 5/12	115.942	116.664	126.529
5 6/12	117.243	117.858	127.838
5 7/12	118.558	119.064	129.160
5 8/12	119.887	120.281	130.495
5 9/12	121.231	121.510	131.843
5 10/12	122.589	122.751	133.204
5 11/12	123.938	124.003	134.579
6	125.268	125.268	135.967

Nesse conjunto de dados pode-se perceber a diferença no valor calculado pelos modelos. Vê-se que o valor dado pelo modelo de A-L é superior àquele obtido pelo modelo de Faustmann. Também pode ser notado que o seqüestro integral do carbono atmosférico confere maior valor à floresta se comparado com o carbono temporariamente seqüestrado. Por fim, observa-se também a convergência dos modelos de Faustmann e A-L com seqüestro temporário para florestas com idades acima de 6 anos.

Outra característica observada é o preço-limite para a madeira abaixo do qual a opção de abandono é exercida. Com os parâmetros já citados esse preço fica em torno de \$291 para  $\lambda=0$  e \$327 para  $\lambda=1$ . Um dos fatores que influencia a formação desse preço é o custo de regeneração  $R$ . Com o intuito de testar a real influência desse parâmetro na determinação daquele preço-limite, o modelo foi simulado para valores de  $R$  menores que o valor inicialmente considerado de \$500. Os resultados encontrados estão expostos na tabela 7.



Tabela 7: Preço-limite para diferentes custos de regeneração.

<b>Custo de regeneração (\$)</b>	<b>Preço-limite (\$) <math>\lambda=0</math></b>	<b>Preço-limite (\$) <math>\lambda=1</math></b>
500	291	327
400	231	275
300	173	206
200	116	154
100	55	92
0	0	31

A comparação desses dados sugere que no caso de seqüestro integral ( $\lambda=0$ ) o preço da madeira deve estar em um patamar mais baixo que no caso de liberação total ( $\lambda=1$ ) para que seja preferível abandonar o empreendimento.

Outro fator que exerce influência sobre preço-limite é o valor de abandono do terreno,  $Alt$ . As simulações mostraram que, caso o terreno não possuísse valor de mercado, i.e.,  $Alt=0$ , a atividade florestal somente seria a melhor escolha caso o preço da madeira estivesse acima de \$27 (no caso de  $\lambda=1$ ). O modelo mostrou-se bastante robusto em relação ao valor do terreno para uso alternativo.