

Predição da distribuição diamétrica, mortalidade e recrutamento de floresta natural com matriz Markoviana de potência*

CARLOS ROBERTO SANQUETTA**
 HUMBERTO ANGELO***
 DOÁDI ANTÔNIO BRENA***
 JEFFERSON BUENO MENDES***

RESUMO

A projeção da distribuição diamétrica, mortalidade e recrutamento de uma floresta natural no Japão foi estimada a partir de dados de parcela permanente coletados no período de 1984 a 1993. O método usado foi a matriz de transição Markoviana a partir dos dados do período 1984 a 1987 e as previsões futuras foram feitas sobre as observações de 1984 pela matriz quadrática de transição e pela matriz cúbica, respectivamente para 1990 e 1993. Como resultado verificou-se que as estimativas pelas matrizes quadrática e cúbica não diferem significativamente do número real de árvores por classe diamétrica e para o recrutamento, mas a mortalidade tendeu ser subestimada pelas previsões. Em geral o modelo foi considerado satisfatório. Apesar de algumas deficiências identificadas neste estudo, pôde-se concluir que a matriz Markoviana de potência é uma técnica viável para predição da dinâmica de uma floresta natural e, conseqüentemente, um instrumento útil para auxiliar o manejador.

Palavras-chave: cadeia de Markov, fir-hemlock, classe diamétrica, Japão, predição

ABSTRACT

Predicting diameter distribution, mortality and ingrowth in a natural forest with a power Markov matrix. A model for predicting the future diameter distribution, the number of dead trees and ingrowth in each class was developed using DBH data collected during 1984 to 1993 from a permanent plot of natural forest in Japan. A model based on the Markov transition matrix over date from 1984 and 1987 was constructed. Predictions for 1990 and 1993 were done based on the two and three-step matrices, respectively. The Chi-square test showed that there was no significance between the predicted and observed frequencies per diameter class, as well as for ingrowth. However, there was significant difference between the predicted and observed frequencies of dead trees, resulting in underestimated predictions of mortality over time. In general the predictions given by the model were reliable. Despite some deficiencies, it was concluded that the Markov matrix is a powerful and useful tool for prediction of dynamics of natural forests as well as for its management.

Key words: Markov chain, fir-hemlock, diameter class, Japan, prediction

*Trabalho realizado como avaliação de desempenho de doutorandos no tópico especial sobre Simulação da Produção Florestal, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR

**Engenheiro florestal, M.Sc., Ph.D., professor do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR - Bolsista do CNPq

***Engenheiro florestal, M.Sc., doutorando em Ciências Florestais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR

INTRODUÇÃO

Florestas naturais são muito complexas devido à heterogeneidade na composição de espécies, idades e tamanhos. Essa complexidade e a escassez de metodologias e dados científicos dificultam sobremaneira a atuação do profissional envolvido com o manejo de florestas naturais.

A projeção da estrutura diamétrica no tempo é de real importância para o manejo e a economia das florestas nativas, pois a partir dos diâmetros futuros pode-se estimar as produções e definir as intervenções no povoamento que assegurem a sustentabilidade econômica e ecológica das florestas.

O uso da cadeia de Markov é uma alternativa para os estudos de crescimento de florestas naturais, uma vez que, ao contrário dos modelos clássicos usados em florestas plantadas, não se apóia em variáveis de difícil acesso em florestas nativas tais como a idade e o índice de sítio (HIGUCHI, 1987).

O emprego da cadeia de Markov em problemas florestais tem sido abordado por diversos pesquisadores. Exemplos variam desde casos para fins de prognosticar os parâmetros de um inventário florestal (PEDEN *et al*, 1973), sucessão florestal (BINKLEY, 1980), manejo de florestas quando há incertezas no horizonte de planejamento, tais como taxas de crescimento, mortalidade, recrutamento e volume comercial a ser explorado (LEMBERSKY, 1976; BUONGIORNO & MICHIE, 1980) e na colheita florestal (HASSLER *et al*, 1988).

A projeção da distribuição diamétrica pela cadeia de Markov já foi estudada em várias partes do mundo, por exemplo na Nova Zelândia (ENRIGHT & OGDEN, 1979), nos Estados Unidos (SOLOMON *et al*, 1986) e na Indonésia (MENDOZA & SETYARSO, 1986). No Brasil, especificamente, na Amazônia brasileira, a projeção da distribuição diamétrica de florestas pela cadeia de Markov, foi estudada por HIGUCHI (1987) e FREITAS (1993).

Neste estudo, os autores desenvolveram um modelo de predição da dinâmica de floresta natural através do cômputo da evolução da distribuição diamétrica das árvores, incluindo também a prognose da mortalidade e do recrutamento de novos indivíduos nas classes diamétricas. O modelo é fundamentado na matriz Markoviana de potência, aplicada aos dados da primeira medição efetuada na floresta em 1984.

MATERIAL E MÉTODOS

DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Os dados utilizados no presente estudo foram extraídos de SANQUETTA (1994), na Ehime University Forest, em Komenono, Província de Ehime, Shikoku (132° 52' E e 33° 33' N), a menor das 4 principais

ilhas do Japão. Esta área foi submetida a intensa atividade humana no passado, especialmente com a exploração de carvão vegetal.

A área está localizada entre 3 zonas climáticas: temperada quente, nas partes mais baixas do relevo; temperada fria, nas partes mais elevadas; e zona intermediária. A altitude varia de 760 m a 855 m. A precipitação média anual é de 1.740 mm, com valores mínimo e máximo mensais de 73 mm em fevereiro e 216 mm em julho, respectivamente. As temperaturas mínima, média e máxima do ar registradas foram de -6,2 °C, 12,3 °C e 35,5 °C, respectivamente (TOKUI & SAKAUE, 1964; NINOMIYA *et al*, 1985).

Os solos são classificados como solos florestais marrons, dos tipos B_B (drenado), B_C (levemente drenado), B_D (moderadamente úmido), e B_{D(d)} (moderadamente úmido subtipo drenado), segundo a classificação padrão dos solos florestais japoneses (TSUJITA *et al*, 1986).

A vegetação natural potencial da área foi classificada como pertencendo à aliança *Hidrangeo-Abietetum firmae*, da classe *Camellietea japonicae* (MIYAWAKI **citado por** SANQUETTA, 1994). É uma área de transição entre a zona temperada quente mais baixa, dominada pelas espécies folhosas sempre-verdes ou perenes, e a zona temperada fria, mais elevada, dominada por espécies folhosas caducifólias (YAMANAKA, 1961).

COLETA DOS DADOS

Em dezembro de 1984, foi instalada uma parcela permanente, com área de 0,89 ha, em uma floresta secundária de fir-hemlock, no compartimento nº 2, ao norte da Ehime University Forest. A área foi mantida em sucessão natural desde o último corte raso ocorrido há, aproximadamente, 70 anos atrás. Esta parcela foi dividida em 112 subunidades.

A parcela tem sido remeida sistematicamente desde sua instalação. Os inventários foram realizados em 1984, 1986, 1987, 1988, 1989, 1990, 1991, 1992 e 1993, sempre no mês de dezembro, levantando-se todas as árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) maior ou igual a 4 cm. No primeiro inventário (1984), todas as árvores enumeradas foram identificadas, etiquetadas e medidas no DAP.

Nos inventários sucessivos, todas as árvores etiquetadas foram remeidas, as novas árvores recrutadas que atingiam o DAP mínimo também foram etiquetadas e incluídas nas medições, e as árvores mortas foram registradas como tal.

Em 1985, foi elaborado um mapa de projeção de copas, incluindo todas as árvores do dossel superior (árvores com copas expostas diretamente ao sol), o qual foi revisado em 1990 (SANQUETTA *et al*, 1991).

MÉTODO

Adotou-se a cadeia de Markov como método de projeção da dinâmica da floresta. A cadeia de Markov é um processo estocástico utilizado para estudar fenômenos naturais ou não, que passam, a partir de um estado inicial, por uma seqüência de estados, onde a transição entre os estados ocorre

segundo uma certa probabilidade (FERNANDEZ, 1975). O mesmo autor define a matriz Markoviana P como um conjunto enumerável, ou finito, de estados, composto de elementos $p_{i,j}$, tais que $\sum p_{i,j} = 1$, onde $p_{i,j}$ é a probabilidade de transição do estado i para o estado j .

PARZEN (1976) demonstrou que a cadeia de Markov é um processo estocástico que possui a seguinte propriedade-chave: a probabilidade condicional de qualquer evento futuro, dado qualquer evento passado e o estado presente, é independente do evento passado, e depende somente do estado presente do processo. Os elementos da matriz de transição são chamados de probabilidades de transição e são estacionárias. Portanto, as probabilidades de transição estacionárias implicam que elas não mudam com o tempo.

Para utilizar o processo de Markov, as propriedades estacionárias do processo devem ser satisfeitas. Primeiro, para estimar qualquer evento futuro, dado qualquer evento passado e o estado presente, deve-se considerar que ele é independente do evento passado e depende somente do estado presente do processo. Segundo, as probabilidades de transição entre dois estados específicos devem permanecer constantes no tempo.

Indiferente à dinâmica da distribuição diamétrica, estas propriedades implicam que: (1) a distribuição diamétrica no futuro depende somente da distribuição atual e não da distribuição passada; e (2) a probabilidade de uma árvore mudar-se, por exemplo, da classe i para a j em algum período específico deve permanecer a mesma todo o tempo, indiferente das condições do povoamento.

Neste estudo o modelo de Markov foi construído com base nos dados de transição da floresta durante o período de tempo 1984-1987. O modelo foi estruturado em 10 estados: e_1 [recrutamento= R], e_2 a e_9 [classes diamétricas] e e_{10} [mortalidade= M].

A dinâmica do sistema no intervalo de tempo considerado, de 3 anos, pode ser representada como segue: recrutamento - mudança do estado e_1 para qualquer dos estados e_2 a e_9 ; mortalidade - mudança de qualquer estado para o estado e_{10} ; classe diamétrica - mudança para as classes diamétricas superiores pelo incremento diamétrico, permanência na mesma classe quando o incremento diamétrico não foi suficiente para uma mudança de classe.

Após o cálculo das transições do ano 1984 para 1987 a matriz de transição P pôde ser construída como especificado abaixo. Um processo de 10 estados pode ser representado como:

$$P = (p_{i,j}) = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,10} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,10} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ p_{10,1} & p_{10,2} & \dots & p_{10,10} \end{bmatrix}$$

Sendo p_{ij} calculado pela equação [1], abaixo:

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{N_j} \tag{1}$$

p_{ij} = é a probabilidade de ocorrência de indivíduos na classe j , no tempo $(t + 1)$, dado a classe i no tempo t ;

n_{ij} = número de indivíduos na classe i no tempo $(t + 1)$, dado a classe i no tempo t ;

N_j = número total de árvores no estado i no tempo t .

Para efeito de projetar a distribuição diamétrica da floresta construiu-se a matriz de transição para o período de tempo 1984-1987 e, de posse da matriz de transição probabilística P , a projeção do n -ésimo período ou etapa pôde ser efetuada pela equação [2] abaixo:

$$P^{(n)} = p_{ij}^{(n)} \tag{2}$$

conforme mencionam BRUNER & MOSER (1973) e HIGUCHI (1987).

PREDIÇÃO COM O MODELO

Seja $E = [e1, e2, \dots, e10]$ o vetor de estados em 1984, no qual os elementos ei correspondem ao número inicial de árvores em cada estado, então a matriz de probabilidades de transição P elevada à potência n pode ser usada para prever a disposição daquelas árvores iniciais após n estações de crescimento.

As predições para 1990, ou seja $(t + 2)$ etapas de crescimento e para 1993, ou seja, $(t + 3)$ etapas podem ser calculadas pela equação [1]. Sendo P a matriz de probabilidades de transição, n o número de períodos a serem prognosticados, $n=2$ para 1990 e $n=3$ para 1993, tem-se que, como indicado pela equação [1], as probabilidades de transições quadrática $(p_{ij})^2$ e cúbica $(p_{ij})^3$ são obtidas pelo quadrado e a potência cúbica da matriz de transição inicial (P).

Predição da mortalidade

Seja $E^{(0)} = [E7^{(0)}, E15^{(0)}, \dots, E75^{(0)}, Em^{(0)}]$ um vetor, no qual os elementos correspondem ao X número inicial de árvores em cada estado, então as matrizes de probabilidades de transição de grau 2 e 3 podem ser usadas para prever a disposição daquelas árvores iniciais após 6 e 9 estações de crescimento. Os números $p_{i,m}^{(2)}$ e $p_{i,m}^{(3)}$ para $i = R, 7, 15, \dots, 75$, são as probabilidades de mortalidade para uma dada árvore que estava inicialmente na i -nésima classe de diâmetro. Os números estimados de árvores mortas, m_i , são determinados de acordo com a equação [3] para 1990 e equação [4] para 1993.

$$m_i = E_i^{(0)} \cdot p_{i,m}^{(2)} \tag{3}$$

$$m_i = E_i^{(0)} \cdot p_{i,m}^{(3)} \tag{4}$$

para

$$i = R, 7, 15, \dots, 75$$

Predição das árvores sobreviventes

As equações [3] e [4] estimam a mortalidade, implicando que o número de árvores sobreviventes a partir de cada classe de diâmetro inicial possa ser calculado como:

$$S_i = E_i^{(0)} (1 - p_{i,m}^{(n)}) \quad [5]$$

para

$$i = R, 7, 15, \dots, 75$$

sendo $n=2$ para 1990 e $n=3$ para 1993. A equação [5] estima o número de árvores na n -ésima classe diamétrica que se espera sobreviver. Isto não indica a distribuição diamétrica das árvores vivas. S_i pode também ser calculado pela equação [6]:

$$S_i = E_i^{(0)} (p_{i,j} - p_{i,m}^{(n)})^{(n)} \quad [6]$$

para

$$i = 1, 2, \dots$$

Predição da distribuição diamétrica

Para determinar a distribuição diamétrica para as árvores sobreviventes é necessário somar todos os caminhos que a árvore pode entrar em uma classe de diâmetro, indiferente de sua classe inicial. Esta soma é calculada pela equação [7]:

$$E_i^{(n)} = E_i^{(0)} \cdot p_{i,j}^{(n)} \quad [7]$$

onde $E_i^{(n)}$ é o número de árvores no estado j após n transições, indiferente do estado inicial. Se os valores obtidos a partir da equação [5] são definidos na forma vetorial como $E^{(n)} = [E_R^{(n)}, E_7^{(n)}, E_{15}^{(n)}, \dots, E_{75}^{(n)}, E_m^{(n)}]$ então a equação

$$E^{(n)} = E^{(0)} \cdot P^{(n)} \quad [8]$$

pode ser usada para obter os elementos individuais.

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DA PREDIÇÕES

Com base nos dados coletados em 1984-1987 foram feitas predições para 1990 e 1993 a partir das freqüências por classe diamétrica de 1984. A avaliação dessas projeções foi feita pelo teste de qui-quadrado ao nível de 5% de probabilidade.

O desenvolvimento deste suporte teórico baseou-se em BRUNER & MOSER (1973), HIGUCHI (1986), MENDOZA & STYARSO (1986) e FREITAS (1993).

RESULTADOS

OBTENÇÃO DAS MATRIZES DE TRANSIÇÃO

O Tabela 1 mostra a matriz de progressão de todas as árvores do povoamento, por classe diamétrica, no período de transição 1984-87. Na horizontal, estão os estados no ano 1987, e na vertical, os estados no ano 1984. Isto quer dizer que durante o período de tempo de 3 anos (1984-1987) 192 árvores foram recrutadas na primeira classe diamétrica, 1.657 árvores da primeira classe diamétrica permaneceram na mesma classe e 36 cresceram de tal forma que passaram para uma classe diamétrica acima, e 91 árvores daquela classe morreram.

Tabela 1 - Matriz de progressão de todas as árvores de um povoamento (0,89 ha) de fir-hemlock, Japão, por classe diamétrica (cm), no período de transição 1984-87

Table 1 - Matrix of diameter class (cm) dynamics during 1984-1987 of a fir-hemlock stand (0,89 ha) in Japan

| estado/state 1984 ↓ 1987 → | R ^a | 7 cm | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | M ^b | Total |
|----------------------------------|----------------|-------|-----|-----|----|----|----|----|----|----------------|-------|
| | e1 | e2 | e3 | e4 | e5 | e6 | e7 | e8 | e9 | e10 | |
| R ^a | | 192 | 2 | | | | | | | 0 | 194 |
| 7 | | 1.657 | 36 | | | | | | | 91 | 1.784 |
| 15 | | | 516 | 16 | | | | | | 26 | 558 |
| 25 | | | | 182 | 11 | | | | | 10 | 203 |
| 35 | | | | | 48 | 3 | | | | 3 | 54 |
| 45 | | | | | | 16 | 3 | | | 0 | 19 |
| 55 | | | | | | | 7 | 0 | | 1 | 8 |
| 65 | | | | | | | | 6 | 2 | 0 | 8 |
| 75 | | | | | | | | | 3 | 0 | 3 |
| total | | 1.849 | 554 | 198 | 59 | 19 | 10 | 6 | 5 | 131 | 2.831 |

^a recrutamento/recruitment

^b mortalidade/mortality

Com o auxílio da Tabela 1, e aplicando-se a equação [1], pode-se obter a matriz inicial de probabilidades P , cujos elementos p_{ij} são mostrados na Tabela 2. Por exemplo, a probabilidade que uma árvore da classe diamétrica 7 permaneça na mesma classe após 3 anos é de 0,9288, ou seja, 1.657/1.784;

a probabilidade que uma árvore da classe diamétrica 7 cresça e atinja a classe 15 cm em 3 anos é 0,0202, ou seja, 36/1.784; a probabilidade que uma árvore da classe diamétrica 7 morra em 3 anos é 0,0510, ou seja, 91/1.784; a probabilidade de recrutamento na primeira classe diamétrica durante 3 anos é dada por $192/194=0,9897$.

Tabela 2 - Matriz inicial de probabilidades de transição por classe diamétrica (cm) para o período 1984-87, para um povoamento (0,89 ha) de fir-hemlock, Japão
 Table 2 - Initial transition matrix by diameter class (cm) for 1984-1987 of a fir-hemlock stand (0,89 ha) in Japan

| estado/state 1984 ↓ 1987 → | R ^a | 7 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | M ^b |
|----------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----|----------------|
| R ^a | 0,9897 | 0,0103 | | | | | | | | |
| 7 | 0,9288 | 0,0202 | | | | | | | | 0,0510 |
| 15 | | 0,9247 | 0,0286 | | | | | | | 0,0466 |
| 25 | | | 0,8966 | 0,0541 | | | | | | 0,0492 |
| 35 | | | | 0,8889 | 0,0556 | | | | | 0,0560 |
| 45 | | | | | 0,8420 | 0,1580 | | | | 0,0000 |
| 55 | | | | | | 0,8750 | | | | 0,1250 |
| 65 | | | | | | | 0,7500 | 0,2500 | | 0,0000 |
| 75 | | | | | | | | 1,0000 | | 0,0000 |
| M | | | | | | | | | | 1,0000 |

^a recrutamento/recruitment

^b mortalidade/mortality

A Tabela 3 contém os valores obtidos elevando-se os valores da Tabela 2 ao quadrado, isto é, a matriz quadrática. Os números $p_{ij}^{(2)}$ para i e $j = 7... 65, 75$ e M , mostrados na Tabela 3 representam as probabilidades de uma árvore começar no estado j dado que ela estava no estado i dois passos atrás. O mesmo procedimento pode ser aplicado sucessivamente, obtendo-se as demais matrizes cúbica, à quarta potência e assim por diante. A matriz cúbica é mostrada na Tabela 4, onde se identifica a probabilidade de uma árvore começar no estado j dado que ela estava no estado i 3 passos atrás.

Tabela 3 - Matriz quadrática de transição por classe diamétrica (cm) para um povoamento (0,89 ha) de fir-hemlock, Japão

Table 3 - Quadratic transition matrix by diameter class (cm) of a fir-hemlock stand (0,89 ha) in Japan

| estado/state 1984 ↓ 1987 → | R ^a | 7 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | M ^b |
|----------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| R ^a | 0,9192 | 0,0295 | 0,0003 | | | | | | | 0,0509 |
| 7 | 0,8626 | 0,0374 | 0,0006 | | | | | | | 0,0993 |
| 15 | | 0,8551 | 0,0521 | 0,0015 | | | | | | 0,0911 |
| 25 | | | 0,8040 | 0,0960 | 0,0030 | | | | | 0,0963 |
| 35 | | | | 0,7901 | 0,0962 | 0,0088 | | | | 0,1057 |
| 45 | | | | | 0,7089 | 0,2713 | | | | 0,0196 |
| 55 | | | | | | 0,7656 | | | | 0,2344 |
| 65 | | | | | | | 0,5625 | 0,4375 | 0,0000 | |
| 75 | | | | | | | | 1,0000 | 0,0000 | |
| M | | | | | | | | | | 1,0000 |

^a recrutamento/recruitment

^b mortalidade/mortality

AVALIAÇÃO DAS PREDIÇÕES FEITAS PARA O ANO DE 1990

Os resultados das predições elaboradas para o ano de 1990, com base na matriz quadrática de transição, mostraram que, ao nível de 5% de probabilidade, não houve diferença significativa entre as frequências estimadas e observadas por classe diamétrica, para os estados de árvores sobreviventes, recrutamento e mortalidade, como mostrado na Tabela 5.

Notou-se algumas discrepâncias, embora não significativas, na classe de 4-10 cm para o número de árvores e o recrutamento. Quanto ao número de árvores, observou-se o mesmo problema nas classes de 30-40 e 60-70 cm. Contudo, o número total de árvores foi superestimado em apenas 24 indivíduos. Para a mortalidade e recrutamento, o modelo quadrático estimou 12 e 27 árvores a mais, respectivamente.

Tabela 4 - Matriz cúbica de transição por classe diamétrica (cm) para um povoamento (0,89 ha) de fir-hemlock, Japão

Table 4 - Cubic transition matrix by diameter class (cm) for a fir-hemlock stand (0,89 ha) in Japan

| estado/state 1984 ↓ 1987 → | R ^a | 7 | 15 | 25 | 35 | 45 | 55 | 65 | 75 | M ^b |
|----------------------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------|
| R ^a | 0,8538 | 0,0459 | 0,0011 | 0,0001 | | | | | | 0,0990 |
| 7 | 0,8012 | 0,0520 | 0,0016 | 0,0001 | | | | | | 0,1451 |
| 15 | | 0,7906 | 0,0712 | 0,0042 | 0,0001 | | | | | 0,1336 |
| 25 | | | 0,7208 | 0,1294 | 0,0079 | 0,0005 | | | | 0,1413 |
| 35 | | | | 0,7024 | 0,1250 | 0,0229 | | | | 0,1511 |
| 45 | | | | | 0,5969 | 0,3494 | | | | 0,0537 |
| 55 | | | | | | 0,6699 | | | | 0,3300 |
| 65 | | | | | | | 0,4219 | 0,5781 | 0,0000 | |
| 75 | | | | | | | | 1,0000 | 0,0000 | |
| M | | | | | | | | | | 1,0000 |

^a recrutamento/recruitment^b mortalidade/mortality

AValiação das Predições Feitas para o ano de 1993

Com a matriz cúbica foram feitas as predições para o ano de 1993 ($t+3$). A Tabela 5 mostra os valores observados e estimados para o número de árvores, recrutamento e mortalidade para cada classe de diâmetro. Verificou-se que as projeções estimadas não são estatisticamente significativas das observadas, ao nível de 5% de probabilidade, para o número de árvores e para a distribuição diamétrica. No entanto, diferenças significativas para as projeções da mortalidade por classe diamétrica foram percebidas. Observou-se que a matriz de transição cúbica tendeu a subestimar a mortalidade, sendo o teste de qui-quadrado significativo ao nível de 5% de probabilidade. Quanto ao número de árvores sobreviventes total, o modelo estimou 118 árvores a mais, ou seja, 4,67%, valor este não estatisticamente significativo.

Avaliando as predições efetuadas pela matriz Markoviana de potência, constatou-se que as maiores diferenças foram verificadas para o recrutamento e a mortalidade nas menores classes de diâmetro. No entanto, para fins práticos de manejo florestal o impacto nas predições de curto prazo não seriam grandes. É interessante ainda lembrar que na maioria dos trabalhos

Tabela 5 - Predições do número de árvores, recrutamento e mortalidade por classe diamétrica (cm), para os anos de 1990 e 1993 com base na matriz de transição inicial de um povoamento (0,89 ha) de fir-hemlock, Japão
 Table 5 - Predicted number of trees, recruitment and mortality by diameter (cm) class for 1990 and 1993, based on the initial transition matrix of a fir-hemlock stand (0,89 ha) in Japan

| classe DAP DBH class | árvores sobreviventes/classe DAP surviving trees/DBH class | | | | mortalidade mortality | | | | distribuição de DAP DBH distribution | | | |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | OBS. ^a 1990 | EST. ^b 1990 | OBS. ^a 1993 | EST. ^b 1993 | OBS. ^a 1990 | EST. ^b 1990 | OBS. ^a 1993 | EST. ^b 1993 | OBS. ^a 1990 | EST. ^b 1990 | OBS. ^a 1993 | EST. ^b 1993 |
| R ^d | 157 | 184 | 136 | 175 | c | 10 | c | 19 | | | | |
| 4-10 | 1599 | 1607 | 1453 | 1525 | 185 | 177 | 331 | 259 | 1694 | 1717 | 1483 | 1595 |
| 10-20 | 512 | 507 | 483 | 483 | 46 | 51 | 75 | 74 | 542 | 550 | 541 | 5429 |
| 20-30 | 185 | 183 | 165 | 174 | 18 | 20 | 38 | 29 | 192 | 193 | 177 | 189 |
| 30-40 | 51 | 48 | 47 | 46 | 3 | 6 | 7 | 8 | 71 | 63 | 70 | 67 |
| 40-50 | 19 | 19 | 18 | 18 | 0 | 0 | 1 | 1 | 19 | 19 | 24 | 20 |
| 50-60 | 7 | 6 | 7 | 5 | 1 | 2 | 1 | 3 | 10 | 12 | 10 | 13 |
| 60-70 | 8 | 8 | 8 | 8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7 | 5 | 7 | 3 |
| > 70 | 3 | 3 | 2 | 3 | 0 | 0 | 1 | 0 | 6 | 6 | 7 | 8 |
| total | 2541 | 2565 | 2319 | 2438 | 253 | 265 | 454 | 374 | 2541 | 2381 | 2319 | 2438 |
| qui-quadrado chi-squared | 4,38 n. s. | | 13,38 n. s. | | 3,00 n. s. | | 24,33* | | 3,10 n. s. | | 14,23 n. s. | |

^a observado/measured

^b estimado/predicted

^c estado não considerado para o teste de qui-quadrado/ state not considered for chi-squared test

^d recrutamento/recruitment

n. s. não significante ao nível de 5%/not significant at 5%

* significante ao nível de 5%/significant at 5%

mede-se convencionalmente apenas as árvores acima de 10 cm de DAP. HIGUCHI (1987) e FREITAS (1993), em seus estudos na Amazônia brasileira, utilizando a cadeia de Markov para predição diamétrica, trabalharam com árvores de DAP acima de 25 cm, valor mínimo diamétrico que tende a evitar estas discrepâncias acentuadas, principalmente para os estados de mortalidade e recrutamento. Porém, vale mencionar, que tal procedimento poderia acarretar estimativas inconsistentes da produção a longo prazo, uma vez que haveria subestimativas sistemáticas ocasionadas pela negligência das árvores pequenas que ocorrem em grande número na floresta.

DISCUSSÃO

CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE MARKOV

Predições do desenvolvimento e da dinâmica de florestas com cadeias de Markov têm aspectos positivos e negativos (BRUNER & MOSER, 1973). Esse tipo de representação assume probabilidades que dependem somente do estado presente da floresta e cujas transições são mantidas constantes ao longo do tempo. Isso mostra alguma inflexibilidade do método, uma vez que possíveis diferenças no padrão do crescimento das árvores, devidas a competição por exemplo, não podem ser expressas por valores fixos. De mesma forma, os agentes causadores do recrutamento e mortalidade não podem ser incorporados ao modelo. Outra limitação se refere ao período de projeção, que só pode ser múltiplo do período em que a matriz P foi construída.

Apesar de certas restrições inerentes ao método, alguns pontos podem ser aperfeiçoados para tornar o modelo mais mecanístico e realístico. Um bom exemplo disso é apresentado por SOLOMON *et al* (1986), que expressaram as probabilidades de transição não como constantes, mas como funções da estrutura da floresta representada pelo tamanho das árvores, densidade do povoamento, fatores externos, cortes artificiais, etc.. Disso resultou um modelo mais flexível e interessante de ser explorado com os dados deste trabalho no futuro.

Facilidade de construção e aplicação são as principais vantagens do método aqui apresentado. Além disso, matrizes de transição podem ser facilmente construídas com pouca informação sobre a floresta com que se trabalha, isto é, apenas com dados convencionais de inventários florestais. Qualquer engenheiro florestal ou outro profissional envolvido com manejo florestal poderá, sem muito esforço, e com algum conhecimento de aritmética e álgebra de matrizes, desenvolver um modelo como o aqui proposto.

REFINAMENTOS NO PRESENTE MODELO

Vários refinamentos são necessários para aperfeiçoar a presente versão de nosso modelo. O primeiro refere-se à construção de matrizes de transição que contemplem as diferentes espécies que compõem a floresta, não as considerando num só conjunto. O segundo refere-se à necessidade de avaliar mais profundamente as amplitudes diamétricas mais adequadas para se construir as

matrizes; no presente modelo classes arbitrárias foram utilizadas para efeito de demonstração do modelo e por facilidade operacional. A definição das classes diamétricas pode ser mais apropriadamente feita baseando-se nas taxas de crescimento das árvores. Uma quarta melhoria diz respeito ao uso prévio de uma função de frequência (do tipo Weibull, por exemplo) para alisar a distribuição irregular de árvores em certas classes diamétricas, evitando-se assim a passagem exagerada de árvores para outras classes ou o impedimento de tal passagem, caso os dados originais estivessem com problemas de amostragem em algumas classes. Outro refinamento concerne à melhoria dos dados sobre recrutamento e mortalidade. Recrutamento e mortalidade são eventos extremamente variáveis e difíceis de quantificar durante poucos anos de coleta de dados. Remedições prolongadas são necessárias para desenvolver equações correlacionando o recrutamento com características do povoamento e, assim, assegurar confiabilidade na estimativa desses eventos.

CONCLUSÕES

A boa qualidade das estimativas feitas neste estudo mostraram que o uso da matriz de potência de Markov pode ser um valioso instrumento ao manejador florestal. Verificou-se que tal modelo pode produzir estimativas satisfatórias da distribuição diamétrica. Neste estudo os erros das estimativas do número total de árvores para o período de 1990 ($t + 2$) e 1993 ($t + 3$) além de não serem estatisticamente significativos ao nível de 5% de probabilidade, são perfeitamente aceitáveis na prática diária do manejador.

A partir destas projeções de frequência diamétrica da floresta, o manejador florestal estará apto a fazer outras projeções concernentes ao planejamento da produção da floresta natural de sua alçada, sejam elas predições de volume, área basal, etc.. Ainda, o presente modelo poderia ser utilizado para simular as conseqüências de intervenções programadas pelo manejador, auxiliando-o na tomada de decisões visando a otimização da utilização dos recursos florestais.

Finalmente, o presente modelo, se explorado de modo eficiente, poderá se constituir numa ferramenta de grande valia para a busca de soluções relativas ao manejo em regime de rendimento sustentado de florestas naturais.

BIBLIOGRAFIA CITADA

- BINKLEY, C. S. 1980. Is succession in hardwood forests a stationary Markov process? *For. Science*, **26**:566-70.
- BUONGIORNO, J. & MICHIE, B. R. 1980. A matrix model of uneven-aged forest management. *For. Science*, **26**: 609-625.
- BRUNER, H. D. & MOSER Jr., J. W. 1979. A Markov chain approach to the prediction of diameter distributions in uneven-aged forest stands. *Can. J. For. Res.*, **3**: 409-417.

- ENRIGHT, N. & OGDEN, J. 1979. Applications of matrix models in forest dynamics: *Araucaria* in Papua New Guinea and *Nothofagus* in New Zealand. **Australian J. Ecology**, **4**:3-23.
- FERNANDEZ, P. J. 1975. **Introdução aos processos estocásticos**. INPA/CNPq, Rio de Janeiro. 139 p.
- FREITAS, J. V. de & HIGUCHI, N. 1993. Projeções da distribuição diamétrica de uma floresta tropical úmida de terra firme com a utilização da cadeia de Markov. In: **1º Congresso Florestal Panamericano e 7º Congresso Florestal Brasileiro**, p.545-548.
- HASSLER, C. C.; DISNEY, R. L. & SINCLAIR, S. A. 1988. A discrete state, continuous parameter Markov process approach to timber harvesting systems analysis. **For. Science**, **34**(2):276-91.
- HIGUCHI, N. 1987. **Short-term growth of an undisturbed tropical moist forest in the Brazilian Amazon**. Tese de doutorado. Michigan State University. 129 p.
- LEMBERSKY, M. R. 1976. Maximum average annual volume for managed stands. **For. Science**, **22**:69-81.
- MENDOZA, G. A. & SETYARSO, A. 1986. A transition matrix forest growth model for evaluating alternative harvesting schemes in Indonesia. **For. Ecol. Manag.**, **15**:219-28.
- NINOMIYA, I.; TOMITA, E.; TSUJITA, A. & OGINO, K. 1985. Diversity of species composition and stand structure in a natural secondary fir-hemlock forest. **The Bulletin of the Ehime University Forest**, **23**:59-76.
- SOLOMON, D. S.; HOSMER, R. A. & HYSLETT Jr., H. T. 1986. A two-stage matrix model for predicting growth of forest stands in the Northeast. **Can. J. For. Res.**, **16**:521-28.
- PARZEN, E. 1976. **Teoria moderna de probabilidades y sus aplicaciones**. Limusa, Mexico - DC. 509 p.
- PEDEN, L. M.; WILLIAMS, J. S. & FRAYER, W. E. 1973. A Markov model for stand projection. **For. Science**, **19**:303-14.
- SANQUETTA, C. R. 1994. **A model of natural regeneration process of a fir-hemlock forest, southwestern Japan**. Tese de doutorado. Universidade de Ehime, Japão. 136 p.
- SANQUETTA, C. R.; NINOMIYA, I.; TSUJITA, A. & OGINO, K. 1991. Dynamics during a 6-year period in a natural secondary fir-hemlock forest. **The Bulletin of the Ehime University Forest**, **29**:1-14.
- TOKUI, O. & SAKAUE, M. 1964. Notes on the trees and shrubs in the Komenono University Forest. **The Bulletin of the Ehime University Forest**, **2**:27-54.
- TSUJITA, A.; NINOMIYA, I. & OGINO, K. 1986. Relation between the physical and chemical properties of forest soil and slope topography in a natural fir-hemlock forest of the Ehime University Forest. **The Bulletin of the Ehime University Forest**, **24**:59-76.
- YAMANAKA, T. 1961. *Abies firma* and *Tsuga sieboldii* forest in Shikoku (Forest climaxes in Shikoku). Research Reports of Kochi University. **Nature Series**, **10**:1-14.