

SIMULAÇÃO DA DINÂMICA DE *Araucaria angustifolia* EM FLORESTA NATURAL COM O PROCESSO DE DIFUSÃO

DYNAMIC SIMULATION OF *Araucaria angustifolia* IN NATURAL FOREST WITH THE DIFFUSION METHOD

Luiz Marcelo Brum Rossi¹ Henrique Soares Koehler² Carlos Roberto Sanquetta³

RESUMO

O objetivo deste estudo foi a aplicação do processo de difusão na simulação e na prognose da dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, espécie dominante em floresta ombrófila mista. Os dados utilizados são oriundos do sistema de inventário contínuo do “Programa Ecológico de Longa Duração”, instalado em floresta ombrófila mista (mata de araucária), na Estação Experimental de São José do Triunfo, no Estado do Paraná, Brasil. Os dados foram coletados em quatro parcelas de um hectare cada, com medições realizadas anualmente durante dez anos, de todas as árvores de araucária com DAP ≥ 10 cm. A prognose da dinâmica da espécie foi obtida pelo processo de difusão que é descrito pela integração das variáveis da dinâmica florestal (crescimento, mortalidade e recrutamento) simultaneamente em função do tempo e das dimensões dos indivíduos. Para a modelagem do crescimento das árvores foram testados seis modelos, nos quais o incremento periódico anual em DAP é a variável dependente e, o DAP e o índice de competição de Kohyama são variáveis explicativas. Foram considerados, também, os valores relativos anuais de mortalidade e recrutamento calculados em cada um dos períodos analisados. Os períodos de tempo usados foram de três e quatro anos, totalizando seis conjuntos de dados distintos, a partir dos quais foi projetada a dinâmica da espécie. As projeções simuladas para diferentes períodos foram comparadas estatisticamente com os valores observados de abundância, com o uso do teste de qui-quadrado.

Palavras-chave: modelagem, crescimento, recrutamento, mortalidade

ABSTRACT

The objective of the present paper was to use the diffusion method in simulating the dynamics of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, a dominant species in mixed araucaria-hardwoods forest type. Data were collected from continuous forest inventory permanent plots, part of Long Term Ecological Program, installed in an araucaria-hardwood forest, at the Forest Experimental Station, located at São João do Triunfo, State of Paraná, Brazil. Data were obtained from four one hectare plots, during a ten years period, when all araucaria trees with DBH greater than 10 cm were measured. The dynamics projections for the species were done by the diffusion method, composed by the interaction of forest dynamics variables (growth, mortality and recruitment) simultaneously with time and individuals dimensions. Six models were tested, using DBH current annual increment as a dependent variable and DBH and Kohyama's competition index as dependent variables. Relative values of mortality and recruitment were also used in each analysed period. The time intervals used were three and four years, totalling six sets of distinct data, from which dynamics were projected. The simulated projections were compared statistically with the observed values of abundance by the Chi-Square test.

Keywords: modelling, growth, recruitment, mortality

INTRODUÇÃO

As florestas são sistemas biológicos dinâmicos que estão sempre em contínua mudança e é necessário, muitas vezes projetar estas mudanças a fim de se obter informações importantes para a tomada de decisões, as quais são vitais para o planejamento do manejo, e fundamentalmente baseadas em informações tanto sobre as condições atuais como futuras do povoamento. Na falta de dados de campo de longo prazo, os modelos de simulação florestal, que descrevem a dinâmica (crescimento, mortalidade, sucessão, reprodução), vem sendo utilizados largamente no manejo de florestas pela capacidade de atualizar inventários, prever a produção futura e explorar alternativas de manejo e opções silviculturais, prever a composição de espécies e a estrutura e função do ecossistema sob determinadas condições ambientais. A aplicação de inventários contínuos no Brasil é relativamente recente se comparamos com regiões da Europa e América do Norte. Isto dificulta a obtenção e aplicação de modelos que expliquem a dinâmica da estrutura e do crescimento e produção das florestas naturais. Por isso, há a necessidade de estudos a respeito desta área da ciência florestal. Se por um lado, hoje há maior número de pesquisas dedicadas à modelagem florestal, por outro tem se acompanhado, nos últimos anos, a constante redução das áreas florestais onde estes modelos poderiam ter aplicação.

¹ Eng. Florestal, Embrapa Amazônia Ocidental, Manaus – AM, Brasil, marcelo.rossi@cpaa.embrapa.br

² Eng. Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil, koehler@ufpr.br

³ Eng. Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba – PR, Brasil, sanquetta@ufpr.br

O objetivo deste estudo foi a aplicação do processo de difusão na simulação e na prognose da dinâmica de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, espécie dominante na floresta ombrófila mista avaliada. Neste trabalho as questões que serão respondidas são: 1) é adequado e prático modelar a dinâmica de uma espécie dominante da floresta nativa utilizando o processo de difusão? 2) As projeções em curto prazo obtidas pelo processo de difusão são semelhantes estatisticamente aos dados observados?

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os modelos não espaciais para classes de povoamento expressam o desenvolvimento deste pela descrição da evolução das distribuições diamétricas ou de outra variável que expresse as classes. Existem três tipos fundamentais de processos para esta modelagem: funções probabilísticas, as matrizes de transição e processos de difusão (Sanquetta, 1996). O processo de difusão é um processo estocástico para a estrutura e crescimento de povoamentos, representado pela equação *forward* Kolmogorov ou equações de Fokker-Planck. Estas equações estocásticas foram estudadas e aplicadas a um problema biológico por Kolmogorov et al. (1937) baseado nas equações integrais estudadas por Smolukhovskii em 1931 e as equações diferenciais introduzidas independentemente por Fokker em 1914 e Planck em 1917 (Kolmogorov, 1933).

Um das primeiras aplicações da equação de difusão em populações de plantas foi o trabalho de Suzuki e Umemura (1974). O modelo, por eles empregado, para mudanças na variância do incremento médio do DAP da árvore foi uma analogia à difusão. As equações (frequentemente equações diferenciais parciais) que são usadas para modelos de difusão em física ou engenharia foram modificadas para serem aplicadas às mudanças na distribuição de diâmetros de florestas. Os autores desenvolveram o trabalho para mudanças na média (crescimento de uma árvore individual), sua variância (um processo de difusão sobre o movimento da média) e uma equação diferencial parcial para a probabilidade de mortalidade das árvores, em função do tamanho (diâmetro) e do tempo. Mais tarde Hara (1984) propôs um modelo estocástico usando como equação básica a equação de difusão:

$$\frac{\partial}{\partial t} f(t, x) = \frac{1}{2} \frac{\partial^2}{\partial x^2} [D(t, x) f(t, x)] - \frac{\partial}{\partial x} [G(t, x) f(t, x)] - M(t, x) f(t, x) \quad (1)$$

onde: $f(t, x)$ é a densidade da distribuição do tamanho x e de idade t ; $G(t, x)$ é o coeficiente *drift* ou média infinitesimal e equivale ao crescimento médio instantâneo do tamanho x e de idade t por unidade de tempo; $D(t, x)$ é o coeficiente de difusão ou variância infinitesimal; equivale a variância instantânea do crescimento do tamanho x e da idade t por unidade de tempo; $M(t, x)$ é o coeficiente *termination*; representa a mortalidade instantânea do tamanho x e de idade t por unidade de tempo. Tendo, então, o autor determinado os coeficientes envolvidos a partir dos dados experimentais e simulando a dinâmica do padrão de distribuição do tamanho das plantas.

Hara (1985) propôs um modelo de mortalidade ($M(t, x)$) para plantios de *Abies sachaliensis* monitorados a cada cinco anos com idades entre 20 e 50 anos. O modelo foi baseado na equação de difusão utilizando o DAP como classes de tamanho e relacionando o tamanho relativo (DAP) com a mortalidade. Kohyama (1987) aplicou a equação de difusão para estudar a dinâmica de clareiras em uma floresta primária sob dois pontos de vista contrastantes: a mudança na distribuição de diâmetros em povoamentos com dossel fechado e em clareiras, e a dinâmica da distribuição de frequência da área basal do povoamento. Kohyama (1989) simulou a mudança na distribuição de diâmetros usando dados de povoamentos secundários com diferentes idades utilizando um índice de efeito de densidade que regula primariamente a taxa de crescimento e a mortalidade da árvore. O índice é formado pela área basal cumulativa de todas as árvores maiores do que um dado DAP x . No Brasil ainda são poucos os trabalhos que empregaram o processo de difusão para simulação e modelagem. Podem ser citados os trabalhos de Arce et al. (1998), Sanquetta et al. (1998) e Eisfeld (2004) nos quais foi avaliado e simulado o crescimento de povoamentos jovens e equiâneos de *Pinus taeda* no Estado do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho foram originados do sistema de inventário contínuo do “Programa Ecológico de Longa Duração” (PELD) instalado na Estação Experimental de São José do Triunfo, pertencente à Universidade Federal do Paraná. A Estação está situada no Segundo Planalto Paranaense, no município de São João do Triunfo, distante 125 km a sudoeste de Curitiba, no Estado do Paraná. As coordenadas são 25°34'18” de Latitude Sul e 50°05'56” de Longitude Oeste, com altitude média de 780 m s.n.m.m. A região, de acordo com a classificação climática de Köppen, apresenta clima do tipo *Cfb* (subtropical) caracterizado por ser mesotérmico, com chuvas bem distribuídas, verões brandos e sempre úmidos (Longhi, 1980; Durigan, 1999).

A área experimental está dividida em parcelas quadradas de um hectare, sendo cada uma dividida em subparcelas de 10 m x 10 m. Anualmente é executado o inventário contínuo em quatro destas parcelas, nas quais são medidas todas as árvores com DAP ≥ 10 cm. A implantação das unidades amostrais foi realizada em 1995 e desde então as parcelas tem sido remeidas anualmente. Os dados de inventário de *Araucaria angustifolia* coletados em dez ocasiões (1995 a 2004) das quatro parcelas foram armazenados em planilhas do programa Microsoft Excell® e posteriormente importados e processados no *software* SISDIN (Koehler, 2002), para obtenção das variáveis de

dinâmica da floresta (incremento periódico anual em DAP, mortalidade e ingresso) e o índice de competição de Kohyama.

A prognose da dinâmica da espécie *Araucaria angustifolia* (estrutura e crescimento) foi obtida pelo uso do processo de difusão que é descrito pela integração das variáveis da dinâmica florestal (recrutamento, crescimento e mortalidade) simultaneamente em função do tempo e das dimensões dos indivíduos (classes de DAP). Esta integração foi obtida pela aplicação do modelo composto por equações diferenciais, baseadas em equações da continuidade empregadas em hidráulica. A equação de difusão tem a forma geral definida por Suzuki e Umemura (1974) e Hara (1984) e é representada na forma do modelo (1). Esta equação de difusão geralmente não possui solução analítica, podendo somente ser resolvida numericamente. Para isto, os coeficientes $G(t, x)$, $M(t, x)$ e $D(t, x)$ são obtidos empiricamente por meio de dados experimentais. No caso deste estudo o valor $D(t, x)$ foi considerado igual a zero, conforme sugestão de Kohyama (1989), que ignorou a equação diferencial de segunda ordem no lado esquerdo da equação (1), considerando que a variância da taxa de crescimento dependente do tamanho da árvore é igual a zero.

Além dos coeficientes componentes da equação de difusão, também foi utilizado o índice de competição descrito por Kohyama (1989). Este índice de competição é obtido pela área basal cumulativa das árvores maiores do que o diâmetro x considerado, no tempo t e é representado por:

$$B(t, x) = \frac{\pi}{4} \int_x^{x_{\max}} y^2 f(t, y) dy = \frac{\pi}{4} \sum_i \int_x^{x_{\max}} y^2 f_i(t, y) dy, \quad (2)$$

onde: $B(t, x)$ é o índice de competição, isto é, o efeito de “sombreamento” das árvores maiores sobre uma árvore menor de tamanho x ; $f(t, x)$ é a função de densidade da distribuição de todas as árvores no povoamento de tamanho x no tempo t ; $f_i(t, x)$ é a função de densidade da distribuição das árvores da espécie i de tamanho x no tempo t ; x_{\max} significa o diâmetro máximo no povoamento.

Para a obtenção dos coeficientes anteriormente descritos, foram ajustados modelos de regressão para o crescimento a partir de dados experimentais obtidos no inventário contínuo. As variáveis obtidas a partir dos dados observados no inventário contínuo foram compatibilizadas com os coeficientes com o seguinte relacionamento: a) $G(t, x)$ é a média dos valores de incremento periódico por classe de DAP para os períodos de tempo considerados, calculada pela equação de regressão selecionada; b) $M(t, x)$ é a taxa média anual de mortalidade na classe de DAP em que ocorreu, calculada a partir dos períodos de tempo considerados; c) $B(t, x)$ é o valor cumulativo de área basal das árvores pertencentes às classes diamétricas maiores do que a classe diamétrica considerada (x) referente ao período de tempo considerado; e d) $R(t)$ é a taxa média anual de recrutamento para a classe de DAP em que ocorreu, calculada a partir dos períodos de tempo considerados.

A validação das projeções efetuadas pela simulação foi feita em relação à exatidão, pela comparação dos valores estimados com os valores observados. Para comparar estatisticamente estes conjuntos de valores foi empregado o teste de qui-quadrado (χ^2). Para a validação foram comparadas as projeções baseadas em dados obtidos em três e quatro anos de medição. As projeções e ajustes foram feitos conforme indicado na Tabela 1. Optou-se em usar partes dos períodos de medição para ajuste dos modelos de crescimento e obtenção das taxas de recrutamento e mortalidade, deixando-se outra parte para comparação estatística dos resultados da simulação. Isto evitou que os mesmos dados fossem usados como base para o ajuste dos modelos e para comparação dos valores observados e estimados.

Foram testados seis modelos lineares e não lineares (Tabela 2) para a modelagem do crescimento usando o incremento periódico anual em DAP como variável dependente e o DAP e o índice de competição de Kohyama como variáveis independentes. As equações foram ajustadas com o auxílio do programa *SPSS 14.0 for Windows (Demo version)*.

TABELA 1: Demonstrativo dos períodos de anos dos dados usados para obtenção dos componentes da modelagem (crescimento, recrutamento e mortalidade) e para comparação dos valores estimados e observados.

Intervalo de anos entre medições	Período para obtenção do ajuste e taxas de mortalidade e recrutamento	Período para comparação com os valores projetados	Ano final da projeção
4 anos	1995-1999	1999-2003	2003
4 anos	1996-2000	2000-2004	2004
3 anos	1995-1998	1998-2001	2001
3 anos	1996-1999	1999-2002	2002
3 anos	1997-2000	2000-2003	2003
3 anos	1998-2001	2001-2004	2004

Recrutamento e Mortalidade

Os valores de recrutamento e mortalidade em cada um dos seis períodos analisados foram obtidos a partir dos relatórios do programa SISDIN e recalculados em termos de taxa percentual anual (Tabela 3) e, então, aplicados na simulação dos dados de abundância da *Araucaria*. Dado que os valores de mortalidade e recrutamento são relativamente escassos optou-se, então, em inserir os valores como taxas anuais durante o processo de simulação, em suas respectivas classes diamétricas, que ocorreram no período dos dados tomados como base para o ajuste dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ajuste e Seleção dos Modelos

Os seis modelos apresentados na Tabela 2 foram ajustados para os seis conjuntos de dados formados por diferentes períodos de cálculos da dinâmica (incremento periódico anual do DAP, mortalidade e recrutamento). Os resultados obtidos no ajuste são apresentados na Tabela 4. Em cada período analisado foi selecionado o modelo com menor valor de erro padrão da estimativa percentual ($S_{xy}\%$) e maior valor de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}). Estes modelos selecionados, indicados em negrito na Tabela 4, foram usados para simular o número de árvores, projetando para igual número de anos a partir dos quais foi ajustado o modelo.

TABELA 2 : Modelos de crescimento testados para *Araucaria angustifolia*.

Modelos	
$y = \beta_0 * (x^{\beta_1}) * e^{(\beta_2 * x) + (\beta_3 * bk)}$	$y = \beta_0 * \left(1 - (e^{-\beta_1 * x})\right)^3$
$y = x * (\beta_0 - (\beta_1 * \ln x) - (\beta_2 * bk))$	$y = x * (\beta_0 - (\beta_1 * \ln x))$
$y = x * \beta_0 * e^{-\beta_1 * bk - \beta_2 * \ln x}$	$y = e^{\beta_0 + \left(\beta_1 * \left(\frac{1}{x}\right)\right)}$

Onde: y : incremento periódico anual médio do DAP (cm ano⁻¹); x : centro de classe de DAP (cm); bk : índice de competição de Kohyama (m² ha⁻¹); \ln : logaritmo neperiano; e : base do logaritmo neperiano; $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 : coeficientes do modelo.

TABELA 3: Dados de recrutamento e mortalidade recalculados a partir do programa SISDIN.

Intervalo (anos)	Período	Mortalidade anual (%)			Recrutamento anual (%)	
		Classe 1 (10,0 - 19,9 cm)	Classe 2 (20,0 - 29,9 cm)	Classe 1 (10,0 - 19,9 cm)	Classe 2 (20,0 - 29,9 cm)	Classe 1 (10,0 - 19,9 cm)
4	1995-1999	0,27	-	0,89	-	-
4	1996-2000	0,18	-	1,25	-	-
3	1995-1998	0,27	-	0,54	-	-
3	1996-1999	0,18	-	0,63	-	-
3	1997-2000	0,09	-	1,07	-	-
3	1998-2001	0,09	0,09	1,07	0,09	-

De maneira geral os valores de erro padrão da estimativa foram relativamente altos para a maioria dos períodos e dos modelos analisados. Os valores chegaram a 40% para alguns dos períodos analisados, embora foi possível obter valores menores que 10% para dois dos períodos estudados. Para o período de dados 1996-1999 não foi possível obter equações com erro menor do que 36%. Estes valores ocorrem pela grande variação anual do crescimento em DAP entre as classes diamétricas e provavelmente também pelo relativo pouco tempo entre os intervalos de medições considerados (três e quatro anos). O mesmo comportamento pode ser considerado em relação aos valores do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}). Grande parte dos modelos apresentou valores de R^2_{aj} inferiores a 0,5. Para a seleção dos modelos utilizados na simulação optou-se por escolher os modelos com menor erro padrão da estimativa percentual, independente se haviam outros modelos com maior R^2_{aj} , já que nem sempre os modelos com menor valor de erro apresentam maior valor de R^2_{aj} . Alguns períodos de dados apresentaram maiores dificuldades de ajuste, originando valores mais elevados de erros para todos os modelos testados. Isto parece mostrar que, independentemente do tipo de modelo testado, os erros estão mais relacionados com o comportamento irregular dos dados de crescimento em DAP das árvores.

Simulação da Dinâmica de *Araucaria angustifolia*

Na Tabela 5 são apresentados os valores obtidos pela simulação do número de árvores de *Araucaria angustifolia* em cada classe diamétrica, em cada um dos seis períodos de dados analisados. Também são mostrados os valores do desvio percentual entre os valores estimados e observados para cada classe diamétrica e para o total, e os

valores calculados do teste de qui-quadrado (χ^2). Em relação ao desvio relativo entre os valores totais projetados e observados, observou-se que foram bem reduzidos variando de 0,22% a 3,10%, o menor valor (-0,22%) foi obtido para a projeção para o ano 2002, com base em dados do período 1996-1999 (3 anos). O maior, com superestimativa de 3,1% nos valores de abundância foi alcançado na projeção para o ano 2004, baseado no período de 1996-2000 (4 anos). Apesar da pouca diferença entre os valores observados e estimados obtidos para o total do número de árvores por hectare, dentro das classes diamétricas as diferenças são bem mais marcantes, apresentando desvio relativo maior que 100% (alcançando até 320%), principalmente na última classe de DAP (árvores maiores que 80 cm). Isto foi causado pela acumulação do número de árvores na última classe diamétrica ao longo do tempo e foi também pelo fato de que nesta floresta as árvores de *Araucaria* somente morrem (para o período analisado) nas classes menores, principalmente na classe diamétrica de 10 a 19,9 cm, sendo de fato extremamente raro a ocorrência de mortalidade nas classes de árvores de maior tamanho, principalmente em períodos curtos de observação, como é o caso.

TABELA 4: Resultado do ajuste dos modelos de crescimento para cada período considerado*.

Modelo	Período	Coeficientes				S _{yx} %	R ² _{aj.}
		β_0	β_1	β_2	β_3		
$y = \beta_0 (x^{\beta_1}) e^{(\beta_2 x) + (\beta_3 bk)}$	1995-1999	0,5604	1,1708	-0,0644	-0,2230	29,41	0,758
	1996-2000	0,0842	0,9806	-0,0348	-0,0932	35,68	0,467
	1995-1998	0,6489	0,9158	-0,0539	-0,1981	30,37	0,695
	1996-1999	0,5427	1,5818	-0,0878	-0,2687	36,33	0,629
	1997-2000	0,0115	0,8833	-0,0069	0,0227	12,66	0,831
	1998-2001	0,0298	0,6429	-0,0023	0,0022	18,09	0,808
$y = x(\beta_0 - (\beta_1 \ln x) - (\beta_2 bk))$	1995-1999	0,0392	0,0076	0,0004		31,94	0,633
	1996-2000	0,0338	0,0066	0,0002		32,52	0,447
	1995-1998	0,0449	0,0090	0,0005		31,01	0,603
	1996-1999	0,0383	0,0076	0,0003		40,51	0,425
	1997-2000	0,0194	0,0035	-0,0001		11,69	0,820
	1998-2001	0,0272	0,0050	0,0001		15,97	0,813
$y = x\beta_0 e^{-\beta_1 bk - \beta_2 \ln x}$	1995-1999	0,036	0,011	0,007		32,21	0,626
	1996-2000	-1,217	7,899	-0,001		34,47	0,378
	1995-1998	0,421	7,935	-0,002		27,29	0,693
	1996-1999	0,034	0,008	0,007		40,72	0,419
	1997-2000	-0,011	0,077	-0,003		22,77	0,317
	1998-2001	-0,008	0,078	-0,003		24,62	0,555
$y = \beta_0 \left(1 - (e^{-\beta_1 x})\right)^3$	1995-1999	0,4132	0,0545			33,07	0,527
	1996-2000	0,3192	0,0877			31,30	0,385
	1995-1998	0,3673	0,0628			33,42	0,446
	1996-1999	0,3525	0,0689			39,15	0,355
	1997-2000	0,3234	0,0983			9,59	0,855
	1998-2001	0,3854	0,0767			17,31	0,736
$y = x(\beta_0 - (\beta_1 \ln x))$	1995-1999	0,0151	0,0022			30,69	0,592
	1996-2000	0,0202	0,0036			30,25	0,425
	1995-1998	0,0164	0,0026			30,62	0,535
	1996-1999	0,0189	0,0033			37,86	0,397
	1997-2000	0,0239	0,0045			10,83	0,814
	1998-2001	0,0201	0,0034			14,81	0,806
$y = e^{\beta_0 + \left(\beta_1 \left(\frac{1}{x}\right)\right)}$	1995-1999	-0,600	-25,64			31,87	0,561
	1996-2000	-0,903	-15,54			30,34	0,422
	1995-1998	-0,738	-21,49			31,74	0,501
	1996-1999	-0,789	-19,45			38,30	0,383
	1997-2000	-0,924	-12,95			16,61	0,829
	1998-2001	-0,680	-18,86			9,33	0,804

* em negrito são destacados os modelos selecionados para a simulação.

Conforme apresentado na Tabela 5, a aplicação do teste de qui-quadrado resultou que em cinco dos seis períodos analisados, os valores de abundância observados e estimados pela projeção não diferiram estatisticamente entre si ao nível de significância de 5%. A única projeção que apresentou diferença estatística foi a calculada para o ano de 2004, com base nos dados de 4 anos (1996-2000), ou seja, a que também apresentou o maior desvio relativo entre os valores.

TABELA 5: Resultado da simulação da projeção do número de árvores de *Araucaria angustifolia* obtidos para os seis períodos de dados analisados.

Intervalo de medição	Período	Número de árvores (árv ha ⁻¹)	Ano	Classes de DAP (cm)								Total
				10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	> 80	
4 anos	1995-1999	Observado	2003	39,00	27,25	26,25	22,75	15,75	7,00	3,75	1,25	143,00
		Estimado	2003	32,30	29,53	26,20	21,97	14,86	9,50	6,41	4,17	144,95
		Desvio (%)		-17,18	8,37	-0,19	-3,43	-5,65	35,71	70,93	233,60	1,36
		χ^2 calculado		1,390	0,176	0,000	0,028	0,053	0,658	1,104	2,045	5,453 ^{ns}
4 anos	1996-2000	Observado	2004	39,50	26,00	27,00	22,50	16,00	7,00	3,75	1,25	143,00
		Estimado	2004	26,53	25,47	23,79	22,33	19,64	14,89	9,50	5,29	147,43
		Desvio (%)		-32,84	-2,04	-11,89	-0,76	22,75	112,71	153,33	323,20	3,10
		χ^2 calculado		6,341	0,011	0,433	0,001	0,675	4,181	3,480	3,085	18,21*
3 anos	1995-1998	Observado	2001	39,50	28,00	27,00	22,50	14,75	6,00	3,75	1,25	142,75
		Estimado	2001	36,06	25,05	21,94	20,02	15,96	10,88	6,60	3,69	140,21
		Desvio (%)		-8,71	-10,54	-18,74	-11,02	8,20	81,33	76,00	195,20	-1,78
		χ^2 calculado		0,328	0,347	1,167	0,307	0,092	2,189	1,231	1,613	7,27 ^{ns}
3 anos	1996-1999	Observado	2002	40,25	27,00	26,75	23,00	15,00	6,50	3,75	1,25	143,50
		Estimado	2002	31,86	29,14	26,46	22,27	14,69	9,15	6,08	3,54	143,19
		Desvio (%)		-20,84	7,93	-1,08	-3,17	-2,07	40,77	62,13	183,20	-0,22
		χ^2 calculado		2,209	0,157	0,003	0,024	0,007	0,767	0,893	1,481	5,54 ^{ns}
3 anos	1997-2000	Observado	2003	39,00	27,25	26,25	22,75	15,75	7,00	3,75	1,25	143,00
		Estimado	2003	29,33	24,09	23,81	23,59	20,24	13,71	7,57	3,73	146,08
		Desvio (%)		-24,79	-11,60	-9,30	3,69	28,51	95,86	101,87	198,40	2,15
		χ^2 calculado		3,188	0,41	0,25	0,03	0,99	3,28	1,92	1,64	11,74 ^{ns}
3 anos	1998-2001	Observado	2004	39,50	26,00	27,00	22,50	16,00	7,00	3,75	1,25	143,00
		Estimado	2004	29,09	23,89	23,33	22,53	19,49	13,92	8,18	4,28	144,69
		Desvio (%)		-26,35	-8,12	-13,59	0,13	21,81	98,86	118,13	242,40	1,18
		χ^2 calculado		3,725	0,18	0,57	0,00	0,62	3,44	2,39	2,14	13,10 ^{ns}

^{ns}: os valores observados e estimados não diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de χ^2 . *: os valores observados e estimados diferem estatisticamente entre si ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de

CONCLUSÕES

O uso do processo de difusão mostrou-se bastante adequado para simulação e projeção do número de árvores de *Araucaria angustifolia* em floresta natural. O desvio relativo entre os valores totais observados e estimados pelo processo foi pequeno, subestimando os valores observados em um dos períodos e superestimando em até 3,1% nos demais casos. O teste de qui-quadrado revelou que em somente um dos períodos analisados os valores projetados diferiram significativamente dos valores observados em campo. O processo é relativamente simples de ser aplicado, apresentando uma maior complexidade apenas na obtenção de modelos mais adequados para a descrição dos componentes: crescimento, recrutamento e mortalidade, os quais necessitam de uma maior busca e adequação de modelos mais acurados. Também é adequado que estes modelos sejam obtidos a partir de uma base maior de informações, com maior número de árvores e de observações ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARCE, J.E.; GOMES, F.S.; SANQUETTA, C.R.; CRUZ, E.C. Utilização dos processos de difusão na avaliação e simulação precoces do crescimento de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Cerne**, v. 4, n. 1, p. 154-170, 1998.
- DURIGAN, M.E. **Florística, dinâmica e análise protéica de uma floresta ombrófila mista em São João do Triunfo – PR**. Curitiba: UFPR, 1999. 124 p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal).
- EISFELD, R.L. **Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio da função probabilística e processo de difusão**. Curitiba: UFPR, 2004. 67p. (Dissertação - Mestrado em Engenharia Florestal).
- FELFILI, J.M. Growth, recruitment and mortality in the Gama gallery forest in central Brazil over a six-year period (1985-1991). **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 11, n. 1, p. 67-83, 1995.

- HARA, T. A stochastic model and the moment dynamics of the growth and size distribution in plant populations. **Journal of Theoretical Biology**, v. 109, p. 173-190, 1984.
- HARA, T. A model for mortality in a self-thinning plant population. **Annals of Botany**, v. 55, p. 667-674, 1985.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: IBGE, 1992. 92p. (Série Manuais Técnicos em Geociências, 1)
- KEEN, R.E.; SPAIN, J.D. **Computer Simulation in Biology: a Basic introduction**. New York: Wiley-Liss, 1992. 498p.
- KOEHLER, H.S. **Sistema computacional de dinâmica para florestas naturais**. Curitiba: UFPR, 2002. 192 p. (Tese – Doutorado em Engenharia Florestal).
- KOHYAMA, T. Stand dynamics in a primary warm-temperate rain forest analyzed by the diffusion equation. **Botanical Magazine (Tokyo)**, v. 100, p. 305-317, 1987.
- KOHYAMA, T. Simulation of the structural development of warm-temperate rain forest stands. **Annals of Botany**, v. 63, p. 625-634, 1989.
- KOLMOGOROV, A.N. Zur theorie der stetigen zufälligen prozesse. **Mathematische Annalen**, v.108, p.149-160. 1933 (English translation: On the theory of continuous random process).
- KOLMOGOROV, A.N.; PETROVSKII, I.G.; PISKUNOV, N.S. Étude de l'équation de la diffusion avec croissance de la quantité de matière et son application à un problème biologique. **Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya I. Matematika, Mekhanika**. v.1, n.6, p.1-26, 1937.(English translation: A study of the diffusion equation with increase in the amount of substance, and its application to a biological problem)
- LONGHI, S.J. **A estrutura de uma floresta natural de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze., no sul do Brasil**. Curitiba: UFPR, 1980. 198 p. (Dissertação – Mestrado em Engenharia Florestal).
- PORTÉ, A.; BARTELINK, H.H. Modelling mixed forest growth: a review of models for forest management. **Ecological Modelling**, v.150, p.141-188, 2002.
- SANQUETTA, C.R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. Curitiba: FUPEF, 1996. 49p. (Série Didática, 8).
- SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E.; GOMES, F.S.; PIZATTO, W. Evaluación y simulación precoces Del crecimiento de rodales de *Pinus taeda* con procesos de difusión. **Quebracho** n. 8, p. 5-16, 1998.
- STEEL, R.G.D.; TORRIE, J.H. **Principles and procedures of statistics**. New York: McGraw-Hill, 1980. 633p.
- SUZUKI, T.; UMEMURA, T. Forest transition as a stochastic process II. *In.*: FRIES, J. (ed.) **Growth models for tree and stand simulation**. Stockolm: Royal College of Forestry, 1974, p.358-379. (Research Notes, 30).
- VANCLAY, J.R. **Techniques for modelling timber yield from indigenous forests with special reference to Queensland**. Oxford: Oxford University, 1983. 194 p. (Dissertação – Mestrado em Silvicultura).