



Simulação da precipitação diária para Parnaíba e Teresina, PI, em planilha eletrônica¹



Aderson S. de Andrade Júnior², José A. Frizzone³ & Paulo C. Sentelhas⁴

¹ Parte da tese de Doutorado do primeiro autor apresentada à ESALQ/USP

² Embrapa Meio Norte, CP 01, CEP 64006-220, Teresina, PI. E-mail: aderson@cpamn.embrapa.br (Foto)

³ DER/ESALQ/USP, CP 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP. E-mail: frizzone@carpa.ciagri.usp.br

⁴ DCE/ESALQ/USP, CP 9, CEP 13418-900, Piracicaba, SP

Protocolo 118 - 13/09/2000

Resumo: Os estudos envolvendo precipitação pluviométrica são bastante dificultados devido ao fato das séries históricas disponíveis serem, na maioria dos casos, muito pequenas para efetua-los. Desta forma, faz-se necessário dispor de uma técnica de simulação estocástica que possibilite a geração de valores diários de precipitação, utilizando-se uma planilha eletrônica. No Estado do Piauí, estudos com esse objetivo são inexistentes, razão por que este trabalho tem o objetivo de simular a precipitação pluviométrica diária para as regiões de Parnaíba e Teresina, PI, através de uma planilha eletrônica. O processo de simulação se baseou no método de Monte Carlo. A ocorrência da precipitação foi determinada através da cadeia de Markov, enquanto a sua magnitude foi estimada pelas funções de distribuição de probabilidades gama e empírica. O modelo utilizado proporcionou estimativas com excelente precisão e exatidão, fato comprovado pelos resultados satisfatórios quanto aos índices de desempenho estatísticos.

Palavras-chave: cadeia de Markov, método de Monte Carlo, distribuição gama

Daily rainfall simulation in Parnaíba and Teresina - Brazil, using a spreadsheet

Abstract: The studies involving rainfall are quite difficult to conduct due to the fact that the available historical series, in most of the cases, are too small to make them. Thus, it is necessary to adjust a stochastic simulation technique that facilitates the generation of daily rainfall values, using a spreadsheet. In Piauí State, studies with this objective are inexistent for its several regions of agricultural importance. This work was executed with the objective of simulating the daily rainfall for the regions of Parnaíba and Teresina - PI, Brazil, using a spreadsheet. The simulation process was based on Monte Carlo's method. The occurrence of the rainfall was determined through a Markov chain, while its magnitude was estimated by gamma and empirical distribution functions. The model used provided estimates with excellent precision and accuracy, checked by satisfactory results of the statistical performance index.

Key words: Markov chain, Monte Carlo's method, gamma distribution

INTRODUÇÃO

A agricultura apresenta grande dependência das condições climáticas, notadamente da precipitação pluviométrica da região. Por isso, é fundamental estudar-se a influência das suas variações sobre as diferentes estratégias de uso do sistema agrícola, de modo a apresentar subsídios para o processo de tomada de decisão, visando otimizar o planejamento das atividades agrícolas, porém os estudos dessa natureza são bastante dificultados devido as séries históricas de precipitações pluviométricas disponíveis serem, na maioria dos casos, muito pequenas para efetua-los. Segundo Genneville & Boock (1983) quanto mais reduzidas forem as séries de precipitação disponíveis, maiores as chances de se ter

resultados tendenciosos para determinada região, tornando-se necessário dispor de uma técnica de simulação estocástica que permita a geração de valores diários de precipitação pluviométrica, especialmente através de uma planilha eletrônica.

Uma técnica de simulação muito utilizada é o método de Monte Carlo, que se baseia na comparação de números randômicos com determinada função estatística (Peres & Mattos, 1990; Sousa, 1999) ou seja, a partir de um número aleatório e, conhecendo-se a distribuição de probabilidades que descreve o evento, o método permite a geração de outros possíveis valores para o referido evento.

Alguns estudos foram conduzidos visando-se à modelagem estocástica da ocorrência de precipitação pluviométrica através da cadeia de Markov (Howell et al., 1975; Genneville & Boock,

1983; Azevedo & Leitão, 1990; Almeida, 1995; Sedyama et al., 1996 e Fietz et al., 1998) e de sua magnitude, associada à distribuição gama (Carey & Haan, 1978; Genovez, 1987; Assis, 1991; Assis & Villa Nova, 1993; Peiter, 1998; Peiter et al., 1999).

Contudo, para o Estado do Piauí inexistem estudos com esse objetivo, o que ensejou a execução do presente trabalho, com o propósito de simular a precipitação pluviométrica diária para as regiões de Parnaíba e Teresina, PI, através de um modelo desenvolvido em planilha eletrônica.

MATERIAL E MÉTODOS

O processo de simulação baseou-se no método de Monte Carlo, o qual se constitui em uma técnica de geração de informações através da simulação, quando os eventos ocorrem de forma aleatória e as variáveis a serem geradas seguem uma função de distribuição de probabilidades.

O modelo de simulação foi dividido em duas etapas, em que a primeira modela a ocorrência da precipitação, e a segunda a quantidade ou magnitude da precipitação, caso esta venha a ocorrer (Genneville & Boock, 1983; Peiter, 1998). As rotinas de cálculo das duas etapas foram implementadas em planilha eletrônica.

Para a modelagem da ocorrência da precipitação diária utilizou-se um processo baseado na cadeia de Markov, admitindo-se a hipótese de persistência em 1ª ordem, ou seja, que o evento do dia atual depende unicamente do evento do dia anterior. Optou-se por esta metodologia devido aos resultados satisfatórios alcançados em outros trabalhos (Carey & Haan, 1978; Genneville & Boock, 1983; Genovez, 1987; Peiter, 1998) e com base no fato de que os modelos que se baseiam na hipótese de que a precipitação diária seja um processo aleatório independente, não apresentam bom desempenho (Genovez, 1987).

Para a utilização desse procedimento definiu-se, inicialmente, a matriz de probabilidade de transição de uma cadeia de Markov de 1ª ordem, da seguinte forma:

Dia atual	Dia anterior	
	Seco	Chuvoso
Seco	$P(S S)$	$P(S C)$
Chuvoso	$P(C S)$	$P(C C)$

em que:

$P(S|S)$ - probabilidade do dia atual ser seco, dado que o dia anterior foi seco

$P(C|S)$ - probabilidade do dia atual ser chuvoso visto que o dia anterior foi seco

$P(S|C)$ - probabilidade do dia atual ser seco, uma vez que o dia anterior foi chuvoso

$P(C|C)$ - probabilidade do dia atual ser chuvoso, dado que o dia anterior foi chuvoso.

O cálculo das probabilidades condicionais da matriz de transição foi efetuado através das seguintes equações (Robertson, 1976; Fietz et al., 1998; Sousa, 1999):

$$P(S|S) = \frac{N(S|S)}{N(S|S) + N(C|S)} = \frac{N(S|S)}{N(S)} \quad (1)$$

$$P(C|S) = \frac{N(C|S)}{N(S|S) + N(C|S)} = \frac{N(C|S)}{N(S)} = 1 - P(S|S) \quad (2)$$

$$P(C|C) = \frac{N(C|C)}{N(S|C) + N(C|C)} = \frac{N(C|C)}{N(C)} \quad (3)$$

$$P(S|C) = \frac{N(S|C)}{N(S|C) + N(C|C)} = \frac{N(S|C)}{N(C)} = 1 - P(C|C) \quad (4)$$

em que:

$N(S|S)$ - número de dias secos com o dia anterior seco

$N(C|S)$ - número de dias chuvosos com o dia anterior seco

$N(S|C)$ - número de dias secos com o dia anterior chuvoso

$N(C|C)$ - número de dias chuvosos com o dia anterior chuvoso

$N(S)$ - número total de dias secos

$N(C)$ - número total de dias chuvosos

Consideram-se dias secos, aqueles em que a precipitação pluviométrica foi inferior à evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith. Estratégia semelhante foi adotada por Fietz et al. (1998) e Sousa (1999).

O processo de geração das séries de dias secos e chuvosos foi efetuado utilizando-se as probabilidades condicionais $P(C|S)$ (probabilidade de chover hoje, dado que não choveu ontem) e $P(C|C)$ (probabilidade de chover hoje, dado que choveu ontem) e uma série de números aleatórios uniformemente distribuídos entre zero e um (U_i). O processo é inicializado no dia 1º de janeiro e, desta forma, a definição do estado inicial (seco ou chuvoso) do dia 31 de dezembro é feita da seguinte maneira: i) gera-se um número aleatório (x) entre zero e um; ii) compara-se esse número aleatório com as probabilidades condicionais $P(C|S)$ e $P(C|C)$ obtidas para a data de plantio de 15 de dezembro: a) se $0 < x \leq P(C|S)$, o estado inicial é chuvoso; b) se $P(C|S) < x \leq P(C|C)$, o estado inicial é chuvoso e c) se $x > P(C|C)$, o estado inicial é seco. Para os demais dias, seguiu-se o esquema apresentado na Figura 1.

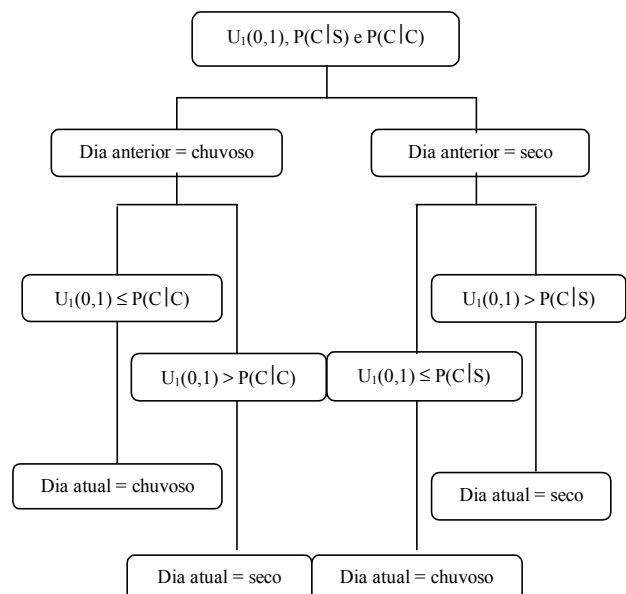


Figura 1. Esquema para a definição da ocorrência de dias secos e chuvosos

Procedimento semelhante foi adotado para os demais períodos analisados, caso em que se utilizaram, para a definição do estado inicial (seco ou chuvoso) as probabilidades P(C|S) e P(C|C) obtidas para os períodos imediatamente anteriores.

Uma vez identificada a ocorrência de chuva (dia atual = chuvoso) o processo de simulação passa à etapa seguinte de modelagem da quantidade; caso contrário, assume-se o valor diário de precipitação igual a zero. Previamente, para verificar-se o ajuste dos valores diários de precipitação pluviométrica às funções de distribuição de probabilidade a serem utilizadas, aplicou-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (Campos, 1976). Para o processo de simulação da magnitude da precipitação diária foram utilizados os parâmetros γ e β da distribuição gama (Assis et al., 1996). Opcionalmente, para os períodos cujos valores diários de precipitação pluviométrica não apresentaram ajuste prévio à função de distribuição gama, usou-se a função de distribuição empírica, conforme descrito com detalhes, em Andrade Júnior (2000).

Nas duas fases da modelagem foram utilizadas seqüências independentes de números aleatórios U_1 e U_2 . Em ambas as etapas empregaram-se séries de dados diários de precipitação pluviométrica obtidos nas Estações Meteorológicas instaladas nos campos experimentais da Embrapa Meio Norte, em Parnaíba e Teresina. Em Teresina, este processo foi efetuado com os dados diários de precipitação pluviométrica e evapotranspiração de referência, obtidos no período de 1985 a 1999. A etapa seguinte de avaliação do modelo de simulação foi realizada com os dados dessas variáveis referentes ao período de 1977 a 1983; esta divisão se deu em função da ausência dos dados relativos ao ano de 1984. Em Parnaíba, devido ao reduzido número de anos de observação (1990-1999) efetuou-se o ajuste do modelo retirando-se sucessivamente um ano de dados de cada vez, da seguinte forma: i) inicialmente, retirou-se o ano de 1990 e se procedeu ao ajuste com os dados do período compreendido entre 1991 a 1999; ii) em seguida, retirou-se o ano de 1991, procedendo-se ao ajuste com os dados do ano de 1990 e do período compreendido entre 1992-1999, e assim por diante. Neste caso, a etapa de avaliação foi realizada justamente com os dados do ano excluído do ajuste. O modelo foi aplicado dividindo-se o ano em 24 períodos contínuos de 70 dias, com intervalos de 15 dias, iniciando-se em 1º de janeiro e término em 15 de dezembro.

Com o intuito de se avaliar o desempenho do processo de simulação da precipitação pluviométrica acima descrito, efetuaram-se 100 simulações da ocorrência e quantidade de chuva, comparando-se a média dos valores simulados com a média dos valores observados de número de dias secos, número de dias chuvosos e precipitação pluviométrica total ocorrida em cada período analisado; para tanto, utilizaram-se os seguintes indicadores de desempenho estatístico: precisão - coeficiente de correlação de Pearson (r) (Eq. 5); exatidão - índice de concordância de Willmott (Id) (Willmott, 1981) (Eq. 6) e o índice de confiança ou desempenho de Camargo (c) (Camargo & Sentelhas, 1997) o qual se constitui em um produto dos dois índices anteriores. Tal estratégia permite identificar-se o grau de precisão e de exatidão do processo de modelagem da precipitação pluviométrica utilizado no estudo (Camargo & Sentelhas, 1997; Pereira, 1998; Sousa, 1999).

$$r = \frac{N \left(\sum_{j=1}^N S_j O_j \right) - \left(\sum_{j=1}^N S_j \right) \left(\sum_{j=1}^N O_j \right)}{\sqrt{\left[\left(N \sum_{j=1}^N (S_j)^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^N S_j \right)^2 \right] \left[\left(N \sum_{j=1}^N (O_j)^2 \right) - \left(\sum_{j=1}^N O_j \right)^2 \right]}} \quad (5)$$

$$Id = 1 - \frac{\sum_{j=1}^N (S_j - O_j)^2}{\sum_{j=1}^N (|S_j - \bar{O}| + |O_j - \bar{O}|)^2} \quad (6)$$

em que:

- r - coeficiente de correlação de Pearson
- Id - índice de concordância de Willmott
- S_j - parâmetro simulado no j -ésimo período
- O_j - parâmetro observado na série histórica no j -ésimo período
- \bar{O} - média do parâmetro observado na série histórica
- N - número de períodos avaliados

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta os resultados relativos ao ajuste dos dados diários de precipitação pluviométrica à função de distribuição gama, utilizando-se o teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov, em nível de 5% de significância, conforme metodologia apresentada por Campos (1976).

Tabela 1. Ajuste dos dados diários de precipitação pluviométrica à função de distribuição gama, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, em cada período avaliado nos municípios de Parnaíba e Teresina, PI

Período	Parnaíba			Teresina		
	Dmax	Dtab	Ajuste	Dmax	Dtab	Ajuste
01 - Jan	0,0958	0,1039	Sim	0,0743	0,0598	Não
15 - Jan	0,0952	0,0955	Sim	0,0829	0,0570	Não
01 - Fev	0,0851	0,0905	Sim	0,0764	0,0540	Não
15 - Fev	0,0797	0,0856	Sim	0,0810	0,0544	Não
01 - Mar	0,0637	0,0875	Sim	0,0830	0,0550	Não
15 - Mar	0,0783	0,0903	Sim	0,0748	0,0587	Não
01 - Abr	0,0821	0,1030	Sim	0,0810	0,0682	Não
15 - Abr	0,0792	0,1138	Sim	0,0889	0,0807	Não
01 - Mai	0,1212	0,1370	Sim	0,0821	0,0994	Sim
15 - Mai	0,1170	0,1590	Sim	0,1010	0,1312	Sim
01 - Jun	0,1291	0,1940	Sim	0,1156	0,1700	Sim
15 - Jun	0,1663	0,2240	Sim	0,1022	0,2210	Sim
01 - Jul	0,1553	0,2610	Sim	0,1216	0,2690	Sim
15 - Jul	0,1128	0,3610	Sim	0,2822	0,3610	Sim
01 - Ago	-	-	-	0,1935	0,3010	Sim
15 - Ago	-	-	-	0,1823	0,2540	Sim
01 - Set	-	-	-	0,1358	0,2030	Sim
15 - Set	0,2596	0,5630	Sim	0,1111	0,1850	Sim
01 - Out	0,2848	0,5190	Sim	0,1204	0,1660	Sim
15 - Out	0,2014	0,4300	Sim	0,1060	0,1370	Sim
01 - Nov	0,2145	0,2210	Sim	0,1222	0,1018	Não
15 - Nov	0,1659	0,1660	Sim	0,1081	0,0838	Não
01 - Dez	0,1380	0,1390	Sim	0,1143	0,0738	Não
15 - Dez	0,1138	0,1166	Sim	0,0850	0,0652	Não

Observou-se grau de ajuste melhor dos dados à função de distribuição gama em Parnaíba que em Teresina, por ter apresentado melhor homogeneidade dos valores diários de precipitação pluviométrica. Em Parnaíba, não foi possível a determinação do ajuste para os períodos de 1-Ago, 15-Ago e 1-Set, em plena estação seca, uma vez que os conjuntos de dados apresentaram somente valores de precipitação pluviométrica iguais a zero, não possibilitando o cálculo dos parâmetros γ e β da distribuição. Em Teresina, contrariamente ao que era esperado, não ocorreu ajuste dos dados à função de distribuição gama no período compreendido pela estação chuvosa (dezembro a março) (Tabela 1) devido, provavelmente, a uma dispersão maior dos valores de precipitação pluviométrica nessa época do ano, aliado ao elevado rigor estatístico do teste de Kolmogorov-Smirnov, que rejeita a hipótese de os dados seguirem determinada função de distribuição, quando pelo menos um dos valores de precipitação apresentar desvio superior ao tabelado.

Em Parnaíba, à exceção dos períodos de 1-Ago, 15-Ago e 1-Set, a função de distribuição gama é adequada para representar os valores de precipitação pluviométrica diária ocorridos nos períodos analisados. Em Teresina, esta adequação apenas ocorreu no período compreendido de 1-Mai a 15-Out. Resultado semelhante foi observado por Vivaldi (1973) e Assis (1991) os quais assumiram que a função de distribuição de probabilidade gama é adequada para modelar a precipitação pluviométrica em base diária em diversos períodos do ano, nos municípios de Itaguaí, RJ, Pelotas, RS, e Piracicaba, SP.

Quanto à modelagem da ocorrência da precipitação pluviométrica diária, as probabilidades condicionais da matriz de transição $P(C|S)$ e $P(C|C)$ variaram em função do período analisado desde 0,143 a 0,487 (estação chuvosa) e em torno de 0,000 a 0,066 (estação seca) (Parnaíba) e de 0,235 a 0,549 (estação chuvosa) e em torno de 0,006 a 0,101 (estação seca) (Teresina)

respectivamente (Tabela 2). Esses valores evidenciam a tendência natural de maiores probabilidades de ocorrência de dias chuvosos durante a estação chuvosa e dias secos na estação seca.

A definição de estação chuvosa e seca levou em consideração os valores totais de precipitação pluviométrica (P) e evapotranspiração de referência (ET_o) em cada período avaliado. Considerou-se, como estação chuvosa, a constituída pelos períodos em que os valores totais de $P \geq ET_o$. Por outro lado, para os valores totais de $P < ET_o$, a estação foi considerada seca.

Os parâmetros γ e β da distribuição gama apresentaram o mesmo comportamento de oscilação dos valores, em função do período analisado. Conforme ressaltado, não foi possível a determinação desses parâmetros para os períodos iniciados em 1-Ago, 15-Ago e 1-Set (Parnaíba) sem, contudo, comprometer a fase de simulação da magnitude dos valores de precipitação pluviométrica, uma vez que são períodos comprovadamente secos com valores de $P(C|S)$ e $P(C|C)$ da ordem de 0,003 e 0,000, respectivamente (Tabela 2). Em Teresina, nos períodos onde não se verificou ajuste dos dados à função de distribuição gama, obviamente não constam os valores dos parâmetros γ e β .

A Tabela 3 apresenta os valores observados e simulados pelo modelo de número de dias secos (N(S)), número de dias chuvosos (N(C)) e precipitação pluviométrica total (P) em cada período, além dos correspondentes índices de desempenho estatístico obtidos para os municípios de Parnaíba e Teresina, Piauí.

Em termos médios, em ambos os locais os valores simulados de N(S) e N(C) foram praticamente iguais aos valores observados. Em Parnaíba, os valores de P foram menores nas séries de dados simulados em comparação com os valores observados, mas em Teresina a tendência média do modelo foi superestimar os valores de P. No que diz respeito à N(C), Peiter et al. (1999) e Genneville &

Tabela 2. Probabilidades condicionais da cadeia de Markov $P(C|S)$ e $P(C|C)$ e parâmetros γ e β da distribuição gama em cada período avaliado nos municípios de Parnaíba e Teresina, PI

Período	Parnaíba				Teresina			
	Markov		Gama		Markov		Gama	
	$P(C S)$	$P(C C)$	γ	β	$P(C S)$	$P(C C)$	γ	β
01 - Jan	0,190	0,436	1,768	10,539	0,281	0,469	-	-
15 - Jan	0,223	0,467	1,744	10,892	0,315	0,502	-	-
01 - Fev	0,245	0,480	1,906	9,129	0,365	0,545	-	-
15 - Fev	0,292	0,487	1,808	10,131	0,377	0,549	-	-
01 - Mar	0,276	0,471	1,828	10,092	0,387	0,536	-	-
15 - Mar	0,255	0,450	1,772	10,543	0,315	0,521	-	-
01 - Abr	0,194	0,394	1,809	10,877	0,214	0,484	-	-
15 - Abr	0,161	0,346	1,927	10,500	0,158	0,427	-	-
01 - Mai	0,105	0,238	2,206	8,348	0,105	0,344	2,186	7,051
15 - Mai	0,089	0,136	2,422	6,578	0,066	0,229	2,333	5,874
01 - Jun	0,065	0,093	3,076	4,122	0,039	0,152	2,808	4,032
15 - Jun	0,047	0,097	2,963	3,979	0,024	0,103	2,679	4,690
01 - Jul	0,028	0,105	2,245	5,754	0,014	0,125	1,764	9,046
15 - Jul	0,018	0,154	4,569	1,928	0,006	0,125	1,251	14,433
01 - Ago	0,003	0,000	-	-	0,011	0,214	1,661	10,783
15 - Ago	0,002	0,000	-	-	0,017	0,150	1,670	10,541
01 - Set	0,002	0,000	-	-	0,031	0,114	1,694	12,273
15 - Set	0,006	0,200	3,363	3,236	0,035	0,103	2,060	9,833
01 - Out	0,008	0,167	1,813	8,954	0,040	0,152	1,588	14,952
15 - Out	0,011	0,125	2,293	7,468	0,055	0,200	1,572	16,913
01 - Nov	0,035	0,310	1,676	11,277	0,101	0,212	-	-
15 - Nov	0,066	0,346	1,474	14,204	0,139	0,288	-	-
01 - Dez	0,097	0,354	1,449	14,380	0,184	0,292	-	-
15 - Dez	0,143	0,398	1,550	12,293	0,235	0,352	-	-

Tabela 3. Valores observados (O) e simulados (S) de número de dias secos (N(S)), número de dias chuvosos (N(C)) e precipitação pluviométrica total (P) em cada período e os correspondentes índices de desempenho estatístico nos municípios de Parnaíba e Teresina, PI

Período	Parnaíba						Teresina					
	N(S)		N(C)		P (mm)		N(S)		N(C)		P (mm)	
	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S	O	S
01 - Jan	54	52	16	18	279,1	323,7	47	47	23	24	533,9	481,3
15 - Jan	49	49	21	22	355,2	390,6	45	43	25	27	567,1	553,4
01 - Fev	43	48	27	22	427,0	376,1	45	38	25	32	543,4	642,3
15 - Fev	42	44	28	26	424,5	459,3	48	38	22	32	472,3	653,8
01 - Mar	42	46	28	24	419,0	440,0	49	39	21	31	406,9	643,8
15 - Mar	40	48	30	22	483,5	415,9	52	42	18	28	332,6	558,8
01 - Abr	46	53	24	17	396,4	337,2	57	49	13	21	212,4	391,4
15 - Abr	50	56	20	14	356,1	279,0	61	55	9	15	110,8	282,1
01 - Mai	52	62	18	8	298,7	149,2	64	60	6	10	66,2	152,8
15 - Mai	58	63	12	7	203,6	105,0	66	65	4	5	41,0	71,0
01 - Jun	65	66	5	4	77,4	57,4	68	67	2	3	23,4	33,4
15 - Jun	66	67	4	3	72,7	38,0	69	68	1	2	19,4	22,5
01 - Jul	67	68	3	2	68,0	27,3	69	69	1	1	19,3	18,5
15 - Jul	70	68	0	2	0,0	12,5	69	70	1	0	17,7	8,1
01 - Ago	70	70	0	0	0,0	0,0	69	69	1	1	11,0	14,3
15 - Ago	70	70	0	0	0,0	0,0	69	69	1	1	14,6	22,3
01 - Set	70	70	0	0	0,0	0,0	69	68	1	2	13,4	47,4
15 - Set	70	69	0	1	0,0	3,6	68	67	2	3	23,0	53,9
01 - Out	70	69	0	1	0,0	7,1	67	67	3	3	48,4	77,0
15 - Out	69	69	1	1	6,5	11,7	65	65	5	5	93,7	123,1
01 - Nov	64	67	6	3	90,3	66,0	61	62	9	8	171,5	215,4
15 - Nov	61	64	9	6	160,2	131,3	56	59	14	11	301,9	280,0
01 - Dez	59	61	11	9	170,4	177,5	52	55	18	15	403,9	352,7
15 - Dez	52	57	18	13	297,8	238,7	47	52	23	18	518,5	439,4
Média	58	61	12	9	191,1	168,6	60	58	10	12	206,9	255,8
r	0,9648		0,9648		0,9627		0,9392		0,9392		0,9266	
Id	0,9582		0,9582		0,9763		0,9479		0,9479		0,9465	
c	0,9245		0,9245		0,9399		0,9006		0,9006		0,8777	

Boock (1983) observaram boa concordância entre os valores das séries de dados simulados e observados. Quanto ao total precipitado por período avaliado em Teresina, concorda plenamente com os resultados alcançados por Genneville & Boock (1983) e Peiter et al. (1999) os quais obtiveram valores simulados superiores aos observados na série histórica.

Em Teresina, os coeficientes de variação (CV) de todos os parâmetros analisados tenderam a ser menores nas séries de dados simulados em comparação com os valores médios das séries históricas (Tabela 4) demonstrando que o modelo gerou séries de dados mais homogêneas. Comportamento semelhante foi constatado por Genneville & Boock (1983) que também obtiveram menores valores de CV nas médias mensais de precipitação simuladas em comparação com os valores médios observados na região de Campo Grande (MS). Obviamente, não foi possível o cálculo do CV em Parnaíba, uma vez que na fase de validação do modelo utilizaram-se os dados de precipitação de apenas um ano (1990).

A amplitude de variação dos valores de CV para os valores observados de precipitação pluviométrica foi de 16 a 169%, com os menores valores ocorrendo durante a estação chuvosa (16 a 93%) e os maiores na estação seca (33 a 169%). Constatou-se tendência de aumento nos valores de CV nos períodos compreendidos pela fase de transição entre a estação chuvosa e a seca. Saad (1990) analisando os totais mensais de chuva nos meses de março e setembro, em Piracicaba, SP, também observou esta mesma tendência de variação de valores de CV entre os meses chuvosos (54%) e secos (94%). Os elevados

valores de CV denotam caráter de grande variabilidade e dispersão dos dados de precipitação pluviométrica, justificando a realização de estudos da frequência de distribuição (Saad, 1990).

Apesar das variações nos N(S), N(C) e P, isoladamente em cada período estudado, os valores médios simulados aproximaram-se bastante dos observados, evidenciando que o modelo proporcionou estimativas com razoável precisão e exatidão dos parâmetros relacionados à ocorrência e magnitude da precipitação, fato este comprovado pelos bons resultados da análise de correlação (r) e índice de concordância de Willmott (Id) verificados para todos os parâmetros gerados (Tabela 3). Segundo Genneville & Boock (1983) este comportamento é, em parte, próprio de modelos baseados em probabilidades.

Conforme o critério de interpretação do desempenho pelo índice "c", proposto por Camargo & Sentelhas (1997) todos os parâmetros avaliados foram enquadrados na categoria de desempenho estatístico "ótimo" ($c > 0,85$). O modelo apresentou desempenho pouco melhor no processo de geração da ocorrência e da magnitude da precipitação pluviométrica em Parnaíba ($c = 0,9245$ e $c = 0,9399$) que em Teresina ($c = 0,9006$ e $c = 0,8777$). Este comportamento é contrário ao que se pensava em termos de desempenho estatístico, uma vez que em Teresina foi utilizada uma série histórica de dados maior na estimativa dos parâmetros necessários ao modelo. Provavelmente, esse fato deve estar relacionado à menor variabilidade e ao melhor grau de ajuste dos dados diários de precipitação pluviométrica de Parnaíba à distribuição gama.

Tabela 4. Coeficientes de variação (%) dos valores observados (O) e simulados (S) de número de dias secos (N(S)), número de dias chuvosos (N(C)) e precipitação pluviométrica total (P) em cada período avaliado, para os municípios de Parnaíba e Teresina, PI

Período	Parnaíba						Teresina					
	N(S)		N(C)		P (mm)		N(S)		N(C)		P (mm)	
	O*	S	O*	S	O*	S	O	S	O	S	O	S
01 - Jan	-	10	-	29	-	31	17	9	35	18	26	23
15 - Jan	-	11	-	24	-	27	14	11	26	18	16	24
01 - Fev	-	11	-	23	-	27	18	13	32	15	24	22
15 - Fev	-	11	-	19	-	23	16	14	34	17	29	21
01 - Mar	-	11	-	21	-	25	15	11	36	14	31	21
15 - Mar	-	11	-	23	-	27	14	12	41	18	40	24
01 - Abr	-	8	-	26	-	32	15	11	65	24	71	29
15 - Abr	-	6	-	25	-	31	13	8	96	27	93	31
01 - Mai	-	5	-	40	-	46	11	7	117	42	115	47
15 - Mai	-	4	-	38	-	48	7	4	133	52	126	58
01 - Jun	-	3	-	45	-	50	6	3	169	63	164	66
15 - Jun	-	3	-	55	-	59	3	2	155	74	162	78
01 - Jul	-	2	-	65	-	67	3	2	163	112	169	116
15 - Jul	-	2	-	98	-	97	2	1	142	174	165	218
01 - Ago	-	0	-	-	-	-	1	2	106	118	164	138
15 - Ago	-	0	-	-	-	-	1	2	82	108	116	98
01 - Set	-	0	-	-	-	-	2	2	94	66	84	83
15 - Set	-	1	-	183	-	185	2	3	85	67	99	71
01 - Out	-	1	-	138	-	155	4	3	97	63	85	68
15 - Out	-	1	-	126	-	135	5	3	67	49	79	65
01 - Nov	-	4	-	68	-	75	5	5	32	36	37	45
15 - Nov	-	5	-	49	-	54	9	6	38	32	49	34
01 - Dez	-	6	-	41	-	43	12	7	34	27	39	32
15 - Dez	-	7	-	31	-	38	18	8	36	23	33	29
Média	-	5	-	55	-	61	9	6	80	52	84	60

* Não foi possível por ter utilizado dados de apenas 1990

Constatou-se, ainda, em ambos os municípios, que o número de simulações não teve efeito significativo sobre os índices de desempenho estatístico relacionados aos parâmetros envolvidos nas fases de modelagem da ocorrência (N(S) e N(C)) e magnitude da precipitação pluviométrica diária (P). Para todas as variáveis simuladas, os índices de desempenho

estatístico para o intervalo de 10 a 100 simulações não diferiram estatisticamente em nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey (Tabela 5). Segundo Sousa (1999) a não significância do número de simulações mostra a precisão do modelo utilizado, uma vez que as simulações tendem a fornecer resultados semelhantes.

Tabela 5. Variação dos índices de desempenho estatístico em função do número de simulações usadas na modelagem dos parâmetros relacionados à ocorrência (N(S) e N(C)) e magnitude da precipitação pluviométrica (P) em Parnaíba e Teresina, PI

Nº de Simulações	r			ld			c		
	N(S)	N(C)	P	N(S)	N(C)	P	N(S)	N(C)	P
Parnaíba									
10	0,9594	0,9594	0,9576	0,9594	0,9594	0,9738	0,9204	0,9204	0,9325
20	0,9673	0,9673	0,9640	0,9593	0,9593	0,9752	0,9279	0,9279	0,9401
30	0,9681	0,9681	0,9646	0,9604	0,9604	0,9770	0,9298	0,9298	0,9424
40	0,9663	0,9663	0,9653	0,9593	0,9593	0,9773	0,9270	0,9270	0,9434
50	0,9663	0,9663	0,9657	0,9589	0,9589	0,9775	0,9266	0,9266	0,9440
60	0,9643	0,9643	0,9634	0,9572	0,9572	0,9759	0,9230	0,9230	0,9402
70	0,9646	0,9646	0,9639	0,9579	0,9579	0,9767	0,9240	0,9240	0,9414
80	0,9643	0,9643	0,9633	0,9581	0,9581	0,9766	0,9239	0,9239	0,9408
90	0,9657	0,9657	0,9644	0,9586	0,9586	0,9772	0,9257	0,9257	0,9424
100	0,9648	0,9648	0,9627	0,9582	0,9582	0,9763	0,9245	0,9245	0,9399
Teresina									
10	0,9572	0,9572	0,9568	0,9562	0,9562	0,9550	0,9153	0,9153	0,9137
20	0,9495	0,9495	0,9394	0,9520	0,9520	0,9453	0,9039	0,9039	0,8880
30	0,9467	0,9467	0,9331	0,9522	0,9522	0,9439	0,9014	0,9014	0,8808
40	0,9470	0,9470	0,9346	0,9531	0,9531	0,9452	0,9026	0,9026	0,8834
50	0,9469	0,9469	0,9350	0,9530	0,9530	0,9448	0,9024	0,9024	0,8834
60	0,9484	0,9484	0,9347	0,9537	0,9537	0,9449	0,9045	0,9045	0,8832
70	0,9468	0,9468	0,9332	0,9335	0,9335	0,9458	0,8838	0,8838	0,8826
80	0,9448	0,9448	0,9302	0,9535	0,9535	0,9456	0,9009	0,9009	0,8796
90	0,9434	0,9434	0,9280	0,9530	0,9530	0,9449	0,8991	0,8991	0,8769
100	0,9445	0,9445	0,9286	0,9535	0,9535	0,9452	0,9006	0,9006	0,8777

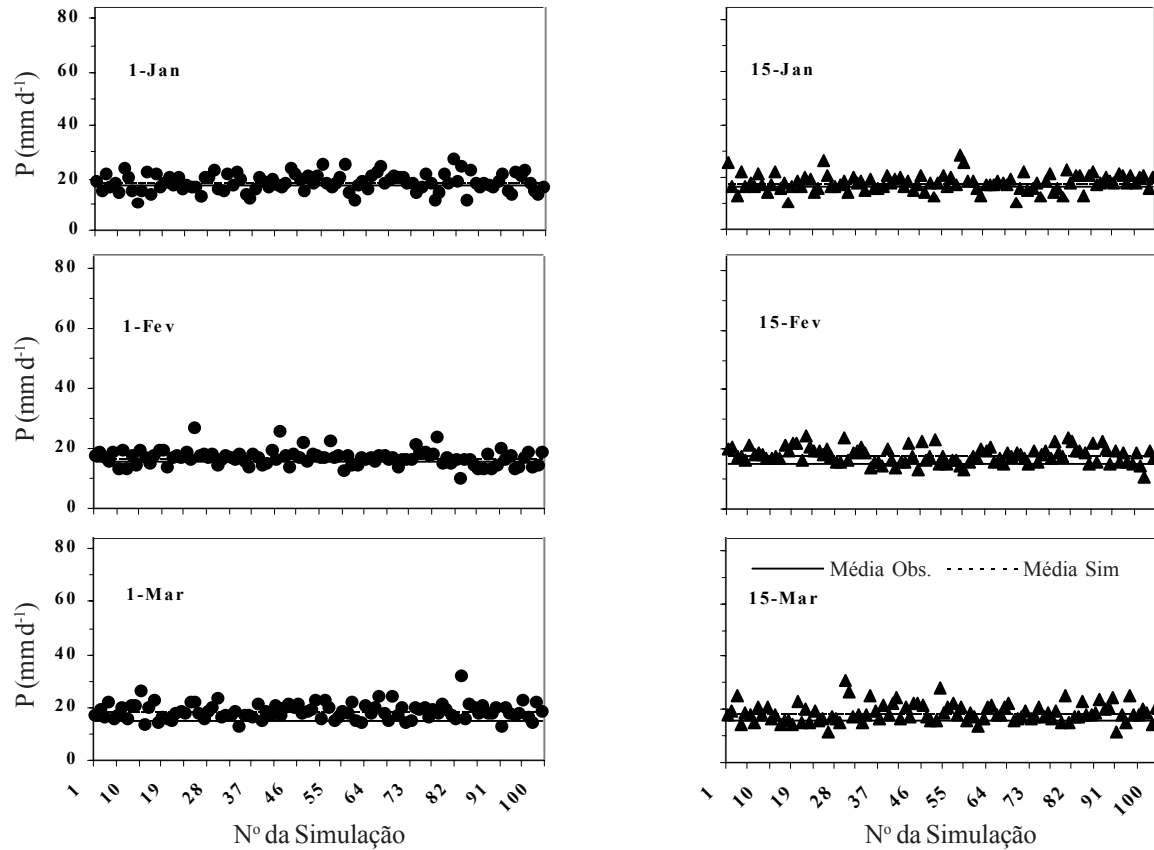


Figura 2. Comparação entre a média dos valores observados e valores simulados de precipitação pluviométrica diária (P) em períodos de 1-Jan. a 15-Mar. na estação chuvosa do município de Parnaíba, PI

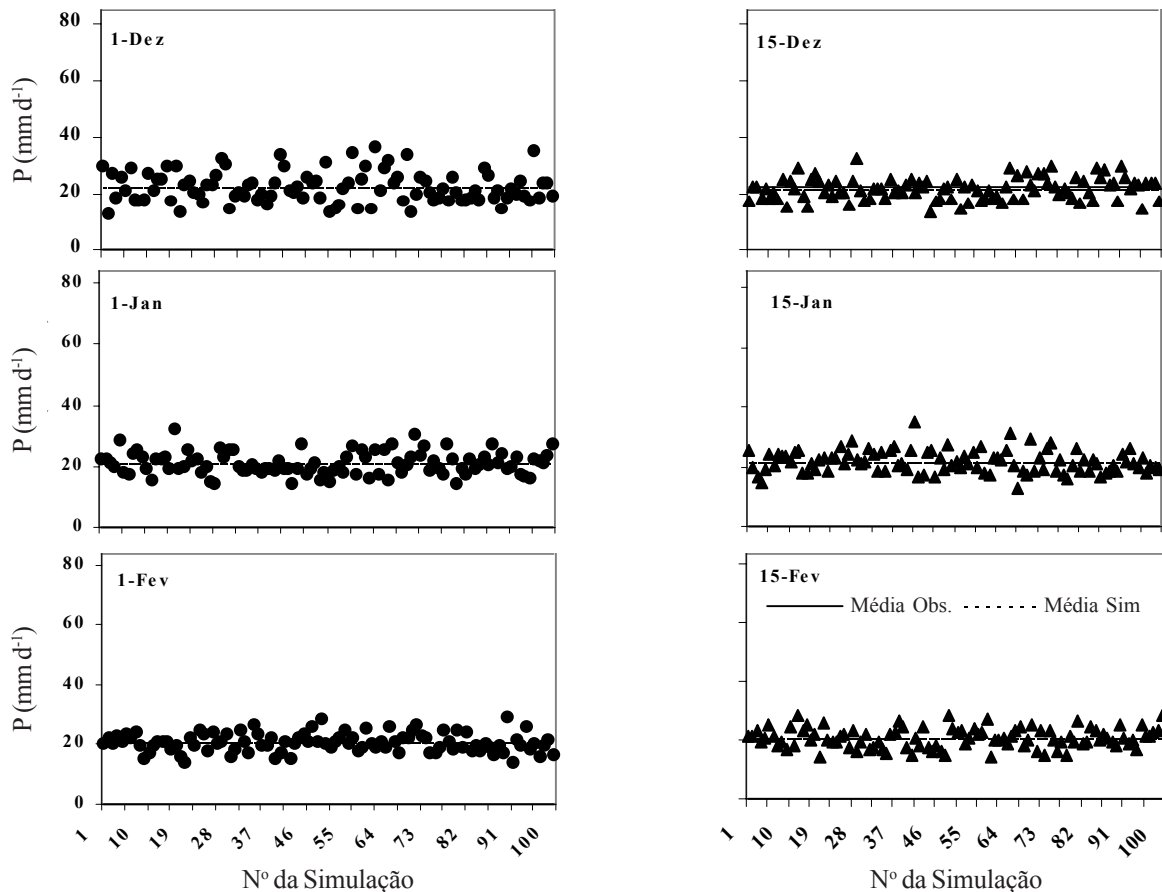


Figura 3. Comparação entre a média dos valores observados e valores simulados de precipitação pluviométrica diária (P) em períodos de 1-Dez. a 15-Fev. na estação chuvosa do município de Teresina, PI

Com o intuito de aprofundar a análise apenas na estação chuvosa, elaboraram-se as Figuras 2 e 3, nas quais são comparados a média dos valores diários observados e os valores diários simulados de precipitação pluviométrica em períodos específicos nos municípios de Parnaíba (1-Jan a 15-Mar) e Teresina (1-Dez a 15-Fev). Percebeu-se, no início da estação chuvosa (1-Dez e 15-Dez) mais notadamente em Teresina, maior dispersão dos valores simulados em torno da média dos valores observados.

A maior variabilidade dos dados se deve ao fato desse período se constituir em uma fase de transição entre a estação seca e a chuvosa. Esta dispersão tendeu a diminuir a medida em que a estação chuvosa se configurou plenamente nos dois municípios.

A diferença entre as médias dos valores diários observados e simulados de precipitação pluviométrica variou apenas de -6,3% (15-Fev) a 7,9% (1-Dez), em Teresina, e de 5,7% (1-Fev) a 8,1% (15-Jan), em Parnaíba. Essas variações, quanto à ocorrência de sub ou superestimativa dos valores simulados de precipitação em relação aos valores observados, demonstram a boa performance do modelo de simulação, conforme já discutido. As diferenças observadas são inerentes à aleatoriedade do método de simulação de Monte Carlo (Sousa, 1999).

CONCLUSÃO

A simulação da ocorrência e da quantidade de precipitação pluviométrica diária utilizando-se a cadeia de Markov de 1ª ordem, associada às funções de distribuição gama e empírica, permitiu a geração de séries pluviométricas para as microrregiões de Parnaíba e Teresina, PI, bastante próximas das séries observadas, fato comprovado pela obtenção de índices estatísticos de desempenho satisfatório.

LITERATURA CITADA

- Almeida, R.M.B. Características climatológicas do regime de chuvas em Minas Gerais. Viçosa: UFV, 1995. 64p. Dissertação Mestrado
- Andrade Júnior, A. S. Viabilidade da irrigação, sob risco climático e econômico, nas microrregiões de Teresina e Litoral Piauiense. Piracicaba: ESALQ/USP, 2000. 566 p. Tese Doutorado
- Assis, F.N. Modelagem da ocorrência e da quantidade de chuva e de dias secos em Piracicaba, SP e Pelotas, RS. Piracicaba: ESALQ/USP, 1991. 134p. Tese Doutorado
- Assis, F.N.; Arruda, H.V.; Pereira, A.R. Aplicações de estatística à climatologia: teoria e prática. Pelotas: Editora Universitária/UFPEL, 1996. 161p.
- Assis, F.N.; Villa Nova, N.A. Análise da ocorrência e da quantidade de chuva em Piracicaba, SP. In : Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 8, 1993, Santa Maria. Resumos... Santa Maria: UFSM, 1993. p.139
- Azevedo, P.V.; Leitão, M.M.V.B.R. Aplicação de processos em cadeia de Markov às precipitações diárias no estado da Paraíba. Revista Brasileira de Meteorologia, Santa Maria, v.5, p.389-402, 1990.
- Camargo, A.P.; Sentelhas, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- Campos, H. Estatística experimental não - paramétrica. 2 ed. Piracicaba: ESALQ, 1976. p.39-51.
- Carey, D.I.; Haan, C.T. Markov process for simulating daily point rainfall. Journal of Irrigation and Drainage Division, New York, v.104, n. IR1, p.111-125, 1978.
- Fietz, C.R.; Urchei, M.A.; Frizzzone, J.A.; Folegatti, M.V. Probabilidade de ocorrência de períodos secos e chuvosos na região de Dourados, MS. Irriga, Botucatu, v.3, n.1, p.16-22, 1998.
- Genneville, M.S.; Boock, A. Modelo estocástico para simulação da precipitação pluviométrica diária de uma região. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.18, n.9, p.959-966, 1983.
- Genovez, A.M. Avaliação da regularização de vazões em pequenas bacias com dados esparsos. São Carlos: EESC/USP, 1987. 168p. Tese Doutorado
- Howell, T.A.; Hiler, E.A.; Reddell, D.L. Optimization of water use efficiency under high frequency irrigation - II. System simulation and dynamic programming. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.18, n.5, p.879-887, 1975.
- Peiter, M.X. Estudo do manejo da irrigação via modelo de simulação. São Carlos: EESC/USP, 1998. 183p. Tese Doutorado
- Peiter, M.X.; Chaudhry, F.H.; Carlesso, R.; Ruviaro, C. Modelagem estocástica da precipitação diária para Santa Maria, RS. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 28, 1999, Pelotas. Anais... Pelotas: SBEA/UFPEL, 1999. CD-ROM
- Pereira, F.A.C. Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) em relação a um lisímetro de paisagem. Piracicaba: ESALQ/USP, 1998. 87p. Tese Doutorado
- Peres, F.C.; Mattos, Z.P.B. Simulação como auxílio à decisão de confinar bovinos de corte. In: Sociedade Brasileira de Zootecnia: Bovinocultura de Corte. Piracicaba: FEALQ, 1990. p.97-108.
- Robertson, G.W. Dry and wet spells. Project Report Agrometeorology A-6. UNDP/FAO. Technical Assistance to the Federal Land Development Authority. Tun Razak Agriculture Research Center. Jerantut, Pahang, Malaysia. 1976. 30p.
- Saad, J.C.C. Estudo das distribuições de frequência da evapotranspiração potencial e da precipitação pluvial para fins de dimensionamento de sistemas de irrigação. Piracicaba: ESALQ/USP, 1990. 124 p. Dissertação Mestrado
- Sediyama, G.C.; Melo, J.S.P.; Alves, A.R.; Coelho, D.T. Dependência temporal e espacial das probabilidades de ocorrência de dias secos e/ou chuvosos em dias consecutivos, para intervalos mensais. Revista Ceres, Viçosa, v.43, n.247, p.267-286, 1996.
- Sousa, S.A.V. Programa computacional para simulação da ocorrência de veranicos e queda de produção. Piracicaba: ESALQ/USP, 1999. 124p. Tese Doutorado
- Vivaldi, L.J. Utilização da distribuição gama em dados pluviométricos. Piracicaba: ESALQ/USP, 1973. 77p. Dissertação Mestrado
- Willmott, C.J. On the validation of models. Physical Geography, Silver Spring, v.2, p.184-194, 1981.