RBE - VOLUME 13 - NÚMERO 2 - DEZEMBRO, 1995

RBE

VOL. 13 Nº 2
DEZEMBRO 1995

REVISTA BRASILEIRA DE ENGENHARIA

CADERNO DE RECURSOS HÍDRICOS

ABRH
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS

UM MODELO PARA GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE CHUVAS DIÁRIAS

Carlos Eduardo de Siqueira Nascimento
ELETROSUL - DEH - Departamento de Engenharia de Hidrelétricas
Rua Deputado Antônio Edu Vieira, 999, Pantanal
88040-901 - Florianópolis - SC

Jerson Kelman
COPPE/UFRJ - Programa de Engenharia Civil - Cx. Postal 68505
~~CEP 21945~~ - Rio de Janeiro - RJ
kelman@hidro.ufrj.br

RESUMO Discute-se as principais características do processo estocástico "precipitação", bem como as alternativas de modelagem. Apresenta-se um modelo de geração de chuvas diárias em que a ocorrência do processo é modelada pela abordagem das seqüências alternadas de dias secos e chuvosos. Nos dias chuvosos as precipitações são quantificadas sob duas hipóteses: (a) as alturas de chuvas são variáveis aleatórias independentes e, (b) são variáveis aleatórias dependentes. A comparação dos resultados, em termos de chuvas máximas anuais, observadas e geradas, indicou a superioridade da alternativa (b).
Palavras Chave: Precipitação/ Geração Estocástica/ Chuvas Diárias

A Stochastic Model For Daily Rainfall Generation
ABSTRACT The main characteristics of the stochastic process "precipitation" are discussed, as well as the modeling alternatives. A model for generating daily rainfall is introduced, which produces sequences of dry and rainy days. In rainy days, the amount of precipitation is modeled under two assumptions: (a) precipitation on two consecutive days are independent random variables, and (b) they are dependent. Comparison of results, in terms of maximum rainfall, historic and synthetic, has indicated the superiority of alternative (b).
Key-Words: Precipitation/ Stochastic Process/ Daily Rainfall

INTRODUÇÃO

O dimensionamento e a operação adequada de sistemas de recursos hídricos requerem o uso de técnicas de planejamento que necessitam de estimativas de probabilidades para certos eventos hidrológicos. Entretanto, tendo em vista que os registros históricos são geralmente curtos, as probabilidades de eventos extremos, como secas e cheias de grande recorrência, podem ser melhor estimadas a partir da geração de séries sintéticas. Embora não acrescentando novas informações aos eventos registrados, a geração de séries sintéticas permite criar situações críticas não observadas, que poderiam, com base em hipóteses estatísticas (a distribuição de probabilidades, por exemplo) fazer parte de um registro mais longo de observações.

As principais variáveis hidrológicas a serem consideradas no dimensionamento e na operação de um aproveitamento de recursos hídricos são, sem dúvida, a precipitação e a vazão. Quando a variável requerida para geração estocástica é a vazão, ela pode ser gerada diretamente ou então sintetizada a partir de séries de precipitações, fazendo-se uso de um modelo determinístico de transformação chuva-vazão previamente calibrado. Há várias razões para se utilizar esta segunda alternativa:

a) Os registros históricos de precipitações são geralmente mais extensos que os das vazões;
b) As vazões apresentam uma correlação serial maior que as precipitações. Como resultado, cada observação adicional da precipitação acrescenta mais informação ao conhecimento do processo do que o fazem novas informações da vazão;
c) Exceto em alguns casos, como em pequenas bacias hidrográficas, a geração de um evento extremo de precipitação, num intervalo de tempo isolado, não é tão importante para a formação de uma cheia de grande recorrência. Cheias de grande recorrência, em pico e volume, podem ser formados pela persistência de precipitações, mas sem que as mesmas tenham intensidades extremas;
d) Atividades antrópicas na bacia, bem como a construção de reservatórios, sistemas de irrigação e a urbanização, por exemplo, modificam o regime de vazões naturais, dificultando a correspondente modelagem estocástica. Como o regime de chuvas, exceto em situações muito especiais, independe das modificações introduzidas na bacia pelo homem, calibrando-se um modelo de transformação chuva-vazão com os dados do período mais recente, garante-se que o modelo está fornecendo uma resposta às precipitações conforme o estado atual da bacia.

Além disto, as precipitações também podem ser utilizadas para prever as vazões que resultarão de modificações na bacia, bastando que se incorpore as modificações projetadas ao modelo de transformação chuva-vazão.

Embora se tenha enfatizado a possibilidade de uso na transformação chuva-vazão, há situações em que a geração estocástica de precipitações se torna necessária por si só. É o caso, por exemplo, de sistemas de irrigação. A decisão de irrigar pode ser tomada em função da probabilidade de ocorrência de determinadas seqüências de dias secos ou ~~da probabilidade~~ de déficit de chuva em determinados períodos de tempo.

Em vista, portanto, da importância e do interesse prático do assunto, este trabalho tem como objetivo a apresentação de um modelo estocástico para geração de chuvas diárias, bem como a apresentação dos resultados obtidos com a sua aplicação. Antes porém, discute-se o processo estocástico "precipitação".

O PROCESSO PRECIPITAÇÃO

A precipitação resulta de um complexo processo atmosférico intimamente ligado à ascensão das massas de ar. Conforme a causa da ascensão, as chuvas (única forma de precipitação considerada neste trabalho) se classificam em:

a) Frontais
b) Orográficas
c) Convectivas

O estudo e o conhecimento da gênese das precipitações em cada local podem indicar a modelagem mais apropriada. As chuvas frontais, por exemplo, exibem uma certa dependência no tempo, pois o mecanismo gerador deste tipo de instabilidade pode persistir por vários dias. Os temporais diários, de origem convectiva, que geralmente ocorrem nos fins das tardes de verão são, por sua vez, independentes. Estas características devem ser levadas em conta na escolha do modelo. Um tipo de chuva, entretanto, não exclui o outro, podendo chuvas de origens distintas ocorrerem simultaneamente, ou não serem distinguidas dentro do intervalo de discretização.

A movimentação contínua, a ascensão e a dissipação das massas de ar determinam a variação temporal e espacial das precipitações. Modelar matematicamente as precipitações como um fenômeno contínuo-intermitente no espaço e no tempo é uma tarefa difícil, talvez até impossível. A abordagem usual é modelar a chuva a partir das suas observações pontuais efetuadas em pluviômetros e pluviógrafos.

A Sazonalidade do Processo Precipitação

Uma característica do processo precipitação que deve ser considerada e analisada é a sazonalidade. Considera-se que o processo precipitação não é estacionário ou, em outras palavras, que os seus parâmetros variam ao longo do tempo. Há duas abordagens para o problema. A primeira é dividir o ano em estações e supor que dentro de uma mesma estação, por exemplo ao longo de um mês, o processo seja estacionário. Nesta abordagem ocorrem transições abruptas das propriedades probabilísticas do processo ao se passar de uma estação para a seguinte. A segunda abordagem considera os parâmetros como uma função do tempo, por exemplo através do emprego de séries de Fourier. Embora mais complexa, esta abordagem também tem sido empregada na modelagem dos processos estocásticos e nela a transição abrupta é eliminada.

A Persistência do Processo Precipitação

Um outro aspecto a ser considerado no processo precipitação é a persistência ou dependência temporal. Esta propriedade pode ser medida pelo coeficiente de auto-correlação, que será menor quanto maior for o intervalo de discretização considerado. Assim, as precipitações mensais exibem uma menor dependência que as precipitações diárias. A memória do processo, porém, é curta. Em geral apenas a informação do que ocorreu num determinado dia é relevante para se fazer previsões para o dia seguinte.

MODELOS ESTOCÁSTICOS DE PRECIPITAÇÃO

Os modelos estocásticos de precipitação se classificam em

univariados, multivariados e multidimensionais, conforme caracterizem a variação temporal da chuva num único ponto, em vários pontos simultaneamente ou em cada ponto da área de interesse. Os modelos se subdividem ainda em exteriores e interiores. Nos modelos exteriores são geradas as características globais do evento chuvoso, tais como a sua duração e precipitação total e também os tempos ou intervalos entre os próprios eventos chuvosos. Os modelos interiores, por sua vez, distribuem a precipitação total do evento chuvoso dentro do período de ocorrência.

Embora sendo uma série temporal e exibindo dependência entre observações sucessivas, os modelos da família ARMA(p,q), têm sido pouco utilizados para modelar as precipitações diárias devido à intermitência do processo. A abordagem mais comum é modelar separadamente a ocorrência do processo precipitação e o montante precipitado nos dias chuvosos. Deste modo utiliza-se um modelo para verificar a ocorrência de chuva e, em caso positivo, aplica-se um outro modelo para quantificar a precipitação ocorrida no intervalo de tempo considerado, geralmente supondo-se a independência entre os montantes precipitados em intervalos de tempo sucessivos.

Modelos de Ocorrência da Precipitação

Ainda que de um modo geral, são três as estruturas básicas, segundo Foufoula-Georgiou(1985), para modelar a ocorrência da chuva. A Figura 1 ilustra essas estruturas.

Seqüências Alternadas de Dias Secos e Chuvosos: Nesta estrutura, seqüências ininterruptas e independentes de dias secos e chuvosos alternam-se obrigatoriamente. Em outras palavras, um período seco (chuvoso) é sempre seguido de um período chuvoso (seco). As variáveis aleatórias de interesse são a duração de cada um destes períodos.

Séries Binárias Discretas: Nesta estrutura, as séries temporais de chuvas diárias consistem de dias secos e chuvosos e, portanto, podem ser vistas como séries binárias de 0's e 1's , com o "0" correspondendo a um dia seco e o "1" correspondendo a um dia chuvoso. Uma primeira modelagem do processo seria considerar independentes as suas realizações, dando origem a um processo de Bernouilli. Entretanto, a ocorrência da chuva diária, de um modo geral, exibe uma certa persistência e o processo de Bernouilli, por este motivo, não é adequado para modelar a sua ocorrência. Assim, a dependência observada nas ocorrências das chuvas diárias tem que ser considerada e o mais simples e provavelmente mais utilizado modelo de dependência tem sido a cadeia de Markov de dois estados (dia seco ou dia chuvoso) de primeira ordem.

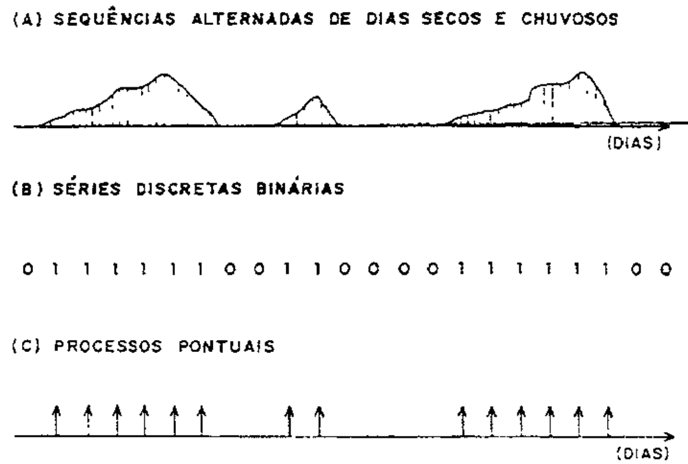

Figura 1. Estruturas de Modelagem da Ocorrência da Chuva Diária.

Cadeias de Markov também têm sido utilizadas para modelar simultaneamente as ocorrências e as alturas de chuva precipitadas. Nestes casos, os estados são definidos por intervalos de precipitações, sendo a chuva gerada no intervalo através de uma distribuição uniforme ou, de modo mais simplificado, tomada igual ao ponto médio do intervalo. Alguns autores, a partir de um determinado intervalo, ajustam uma distribuição de probabilidades para gerar o montante precipitado, de modo a não limitar os valores gerados ao máximo observado na série histórica.

Processos Pontuais: Um processo pontual consiste de uma série de eventos instantâneos que ocorrem aleatoriamente no tempo e no espaço.

Sob esta definição, um dia será chuvoso caso ocorra um evento instantâneo ao longo de suas 24 horas. O processo fica caracterizado pela distribuição do número de eventos ocorridos num determinado intervalo de tempo e pela distribuição dos intervalos de tempo entre eventos. Por exemplo, no processo Poisson os tempos entre eventos são independentes e identicamente distribuídos com distribuição exponencial, e o número de eventos, num determinado intervalo de tempo, ou em intervalos de tempo não superpostos, é uma variável aleatória com distribuição de Poisson.

Sucintamente, estas são as principais estruturas para modelar as ocorrências das chuvas diárias. Aos leitores interessados indica-se, como ponto de partida, as revisões bibliográficas efetuadas por Kelman (1977), Foufoula-Georgiou (1985) e Nascimento (1990), onde são descritos os principais modelos elaborados nos últimos 30 anos. Nestas revisões são igualmente descritos os principais modelos para geração das alturas precipitadas, tema este que será abordado a seguir.

Modelos para Alturas de Precipitação

A maioria dos modelos de ocorrência da precipitação considera algum tipo de dependência em intervalos de tempo sucessivos. Todavia, na ocorrência de um evento chuvoso, geralmente o montante precipitado é suposto ser independente dos montantes precipitados nas ocorrências anteriores. Assim sendo, escolhida a distribuição marginal de probabilidades da precipitação diária, fica fácil fazer a atribuição de um valor à altura precipitada nos dias chuvosos. A distribuição de probabilidades pode ser teórica ou empírica. Quando resultados médios são importantes, como totais mensais ou anuais, a utilização da distribuição empírica conduz aos melhores resultados (quando se comparam os valores gerados com os históricos), desde que a distribuição seja convenientemente discretizada e que um número razoável de dados sejam gerados. A distribuição empírica, entretanto, não permite extrapolações, limitando os valores gerados ao máximo observado na série histórica. Este problema pode ser superado a partir de uma distribuição teórica apenas para gerar os valores extremos.

Utilizando o Critério de Informação de Akaike, que é uma medida, com base na função de verossimilhança, que procura balancear a meta de parcimônia de parâmetros com o objetivo de se obter um bom ajuste, Woolhiser e Róldan (1982) ajustaram e compararam, para postos nos Estados Unidos, as distribuições exponencial, gama e exponencial mista (em geral as mais utilizadas para gerar alturas de precipitação). Concluiram que a distribuição que melhor se ajustava aos dados considerados era a exponencial mista, seguida da "gama dependente" (considerando a distribuição dependente do estado do tempo no dia anterior) e finalmente a exponencial. No estudo não foi testado o grau de dependência serial das precipitações, sendo a independência assumida implicitamente. Outrossim os autores chamaram a atenção para o fato de terem utilizado amostras pequenas e que o ordenamento das distribuições poderia mudar, caso as amostras utilizadas fossem maiores.

Em alternativa ao critério de Akaike, principalmente quando a geração de eventos extremos é importante, pode-se utilizar o critério da "robustez". Segundo este critério, a distribuição que melhor se ajusta a amostra nem sempre é aquela que gera, de modo confiável, os valores extremos de grande recorrência. Estudos efetuados pela ELETROBRÁS-CEPEL (1987) utilizando descargas médias diárias máximas anuais, indicaram a superioridade das distribuições de dois parâmetros em relação às de três parâmetros, com destaque para a distribuição exponencial 2 parâmetros. Embora não se tendo conhecimento de um estudo semelhante para precipitações, os resultados mencionados não podem ser desprezados. Chama-se ainda a atenção para a alta incerteza associada a extrapolações com distribuições de probabilidades descritas por muitos parâmetros, principalmente quando existe um valor extremo (de recorrência desconhecida) na amostra.

Testes de Validação dos Modelos Estocásticos

A confiança que se possa ter num modelo estocástico depende, segundo Kelman (1987 a), da capacidade que ele tenha de preservar nas séries sintéticas algumas propriedades observadas na série histórica que sejam relevantes para o estudo em tela. Diz-se que um modelo preserva uma determinada propriedade quando não se pode distinguir estatisticamente a série histórica da gerada, com base nas observações desta propriedade nas duas séries. Quando alguma propriedade é utilizada para a determinação de um parâmetro do modelo, ela é automaticamente preservada, por construção. Neste caso, comparar a observação da propriedade da série sintética com sua correspondente da série histórica, serve apenas para verificar a adequação do programa de computador utilizado e não para validar o modelo (Kelman e Pereira, 1977 ; Stedinger e Taylor, 1982).

A aceitabilidade de muitos modelos estocásticos pode ser julgada sem que se faça qualquer teste estatístico. É o caso quando os dados observados e previstos pelos modelos são muito próximos ou muito afastados. Entretanto, em muitas situações, o julgamento não é tão óbvio e os testes estatísticos podem ajudar a tomar uma decisão. Todavia, todos os testes estão sujeitos a dois tipos de erro: 1) rejeitar a hipótese verdadeira e 2) aceitar a hipótese falsa. São os chamados erros Tipo I e Tipo II, respectivamente. Neste trabalho o único teste formal que se fez foi o de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras, com o objetivo de testar se as precipitações máximas anuais, históricas e sintéticas, tinham as mesmas distribuições de probabilidades. A estatística do teste é a máxima distância entre a distribuição acumulada empírica obtida da série histórica e a distribuição acumulada empírica obtida da série sintética, conforme mostra a Figura 2. Foram verificados os graus de aderência entre os dois gráficos para as precipitações máximas anuais de 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12 e 15 dias de duração. O procedimento para a realização do teste está detalhadamente descrito pela ELETROBRÁS-CEPEL (1987) e por Nascimento(1990).

O MODELO PROPOSTO PARA A GERAÇÃO DE CHUVAS DIÁRIAS

O modelo proposto é do tipo univariado, tendo por objetivo a geração de chuvas diárias num ponto ou a chuva média diária numa bacia hidrográfica. É composto de duas partes. Na primeira parte determina-se o estado do tempo. Na segunda parte, sob diferentes opções, gera-se a altura de chuva precipitada nos dias chuvosos.

O modelo está estruturado para dividir o ano em estações ou períodos sazonais. Dentro de cada período sazonal o processo é considerado estacionário, tanto em relação às suas ocorrências quanto em relação aos montantes precipitados.

A Modelagem da Ocorrência

A abordagem utilizada para modelar o estado do tempo, isto é, a

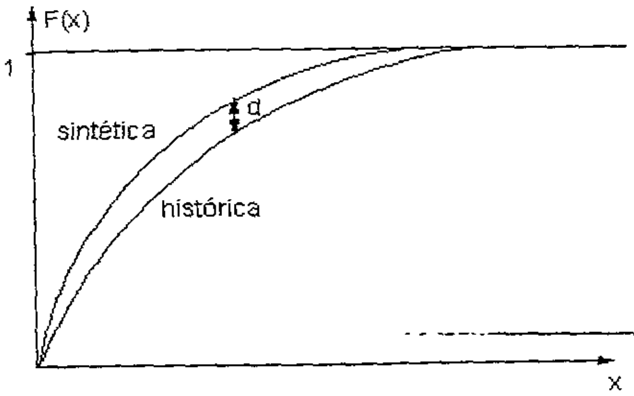

Figura 2. Máxima distância (d) entre freqüências acumuladas, históricas e sintéticas.

ocorrência do processo, é do tipo de seqüências alternadas de dias secos e chuvosos, cujos comprimentos são sorteados aleatória e independentemente.

Distribuições teóricas discretas poderiam ter sido ajustadas aos comprimentos das seqüências de dias secos e chuvosos, mas preferiu-se trabalhar com a curva acumulada empírica das freqüências relativas desses comprimentos. Como as curvas empíricas não permitem extrapolações, há necessidade de verificar se as amostras históricas incluem situações críticas de períodos secos e úmidos. Quando uma seqüência, seca ou chuvosa, não é observada na série histórica, a sua freqüência relativa é interpolada linearmente a partir das observações adjacentes, de modo que o seu comprimento possa ser sorteado quando da utilização do modelo para a geração de dados sintéticos. Quando também uma seqüência inicia numa estação e termina na seguinte, a sua contagem foi atribuída ao período sazonal em que ela teve início. Na Figura 3 apresenta-se um exemplo desse tipo de curva, a qual foi utilizada neste trabalho.

Modelagem das Alturas Precipitadas

Concomitantemente com a geração da ocorrência do processo, alturas de chuva são atribuídas aos dias chuvosos. Na geração das alturas

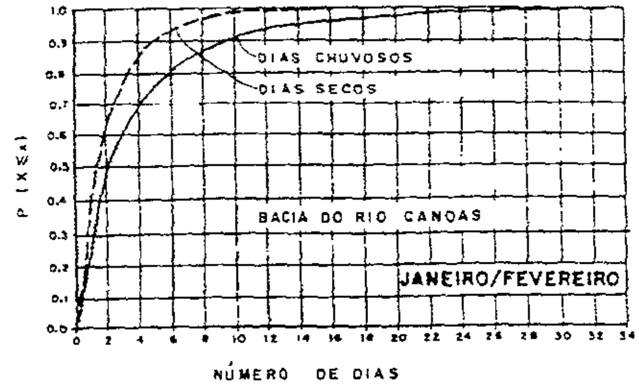

Figura 3. Exemplo de distribuição empírica dos números consecutivos de dias secos e de dias chuvosos.

precipitadas duas opções são possíveis no modelo:

i) As precipitações diárias são independentes;
ii) As precipitações ocorridas em dias chuvosos consecutivos são dependentes.

Na primeira opção as alturas de chuva são geradas a partir da distribuição marginal de probabilidades da precipitação diária. Na segunda opção utiliza-se um modelo auto-regressivo de ordem 1 - AR(1) para gerar as precipitações a partir do segundo dia da seqüência chuvosa. No primeiro dia, ou quando a seqüência chuvosa é de apenas 1 dia, a altura da chuva é gerada com a distribuição marginal considerada.

Em ambos os casos a distribuição marginal de probabilidades é uma combinação da distribuição empírica e da exponencial 2 parâmetros. Na Figura 4 apresenta-se um exemplo típico das curvas de distribuição utilizadas neste trabalho.

A porção da curva definida pela distribuição empírica é facilmente determinada, bastando contar os eventos (alturas de chuva observadas) por intervalos de classes de precipitação colocados em ordem crescente, dividir o número de eventos em cada intervalo pelo número total de eventos e plotar os resultados acumulados dessas divisões contra o limite

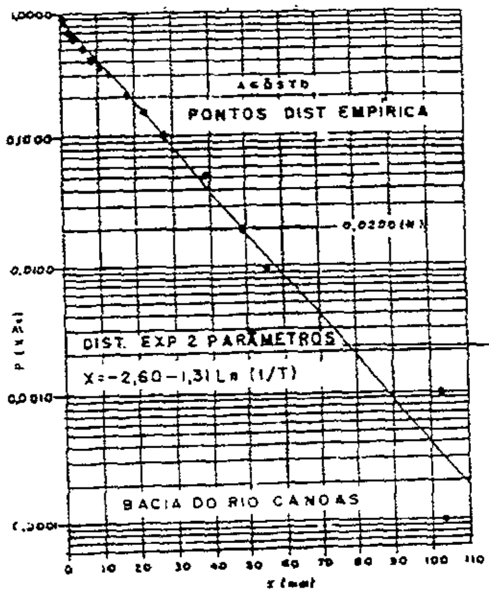

Figura 4. Exemplo de distribuição acumulada empírica e exponencial 2 parâmetros da chuva diária.

inferior dos respectivos intervalos. A distribuição exponencial 2 parâmetros tem a seguinte forma:

$$x = B(0) - B(1).\ln(1/T) = B(0) - B(1).\ln[1 - F_X(x)] \qquad (1)$$

onde: x é a precipitação diária; B(0) é $\bar{x} - s$ (método dos momentos); B(1) é s (método dos momentos); $\bar{x}$ é a média das precipitações observadas; s é o desvio padrão das precipitações observadas; T é o tempo de recorrência; $F_X(x) = P[X \leq x]$ é a função de distribuição acumulada.

O limite entre o domínio da distribuição empírica e o domínio da distribuição exponencial foi escolhido sem se seguir uma regra rígida. Procurou-se um ponto de separação u* onde houvesse convergência entre as duas curvas, mas cuja recorrência fosse a mais alta possível, de modo a gerar com a distribuição exponencial apenas os eventos

extremos. Isto é, para $F_X(x)<u^*$ adotou-se a distribuição empírica e, para $F_X(x)>u^*$, a distribuição exponencial.

Considerando dependentes as alturas de precipitação numa seqüência de dias chuvosos consecutivos, o esquema de geração das chuvas diárias é dado pelos seguintes passos:

i) Geração da altura de chuva do primeiro dia da seqüência com a distribuição marginal considerada. Para tanto sorteia-se um número de distribuição uniforme U no intervalo entre 0 e 1. Faz-se então:

$$1 - F_X(x) = P[X \geq x] = U \qquad (2)$$

Se $U<u^*$ utiliza-se a distribuição empírica, sendo a precipitação sintética obtida por interpolação na respectiva curva de freqüência acumulada. Se $U>u^*$ utiliza-se a distribuição exponencial 2 parâmetros, através da Eq.(1). Os demais dias da seqüência chuvosa são gerados com os passos seguintes:

ii) Transformação da variável X (precipitação) numa variável Y com distribuição marginal normal padrão $[\Phi_Y(y)]$:

$$y = \Phi_Y^{-1}[F_X(x)] = \Phi_Y^{-1}[\Phi_Y(y)] \qquad (3)$$

iii) Geração de um número aleatório normal padrão "e" e aplicação do modelo auto-regressivo:

$$y(t+1) = r_y . y(t) + e(t+1).(1 - r_y)^{0.5} \qquad (4)$$

onde r_y é o coeficiente de auto-correlação de ordem 1.

iv) Transformação da variável Y para a variável X (precipitação):

$$x = F_X^{-1}[\Phi_y(y)] = F_X^{-1}[F_X(x)] \qquad (5)$$

onde x é obtido por interpolação linear ou utilizando a Eq.(1), conforme a sua distribuição marginal.

v) Havendo persistência do processo chuvoso retorna-se ao passo iii). Caso contrário, não haverá chuva, e ter-se-á um dia seco. A partir de um novo dia chuvoso repete-se o processo. Quando a seqüência chuvosa é de apenas um dia utiliza-se o procedimento descrito no passo i).

A Estimativa do Coeficiente de Auto-Correlação de Ordem 1

Inicialmente, para aplicação do modelo AR(1), o coeficiente de correlação de ordem 1 das chuvas diárias, devido à intermitência do processo, foi estimado pelo coeficiente de correlação dos valores normalizados das precipitações em dias chuvosos consecutivos da série histórica. Isto é, as alturas de precipitação x foram normalizadas (transformação para variáveis y) pelo emprego da Eq.(3) e só então o coeficiente de auto-correlação foi estimado. A transformação para a normal padrão foi efetuada considerando-se as chuvas diárias com distribuição exponencial 2 parâmetros.

O modelo, com o coeficiente de auto-correlação assim estimado, foi aplicado na geração de chuvas diárias. A análise dos valores extremos (chuvas máximas anuais para 1, 2, 3, 5, 7, 10, 12 e 15 dias) indicou, exceto para 1 dia de duração e para a bacia do rio Pelotas, que as chuvas máximas anuais, observadas e geradas, não poderiam ser consideradas como provenientes de uma mesma população. Todavia, notou-se que a aderência entre as respectivas curvas de distribuições acumuladas, medida pela estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, era muito maior do que quando as chuvas foram geradas independentemente. Em outras palavras, a adoção da hipótese de dependência para a altura de precipitação em dias sucessivos diminuiu o desvio máximo entre as curvas de freqüências empíricas acumuladas das precipitações máximas anuais, históricas e sintéticas. Procurou-se, então, através de tentativas, outros valores de coeficientes de auto-correlação que aumentassem a aderência. Na situação em que a hipótese nula do teste de Kolmogorov-Smirnov não fosse rejeitada, considerou-se o modelo calibrado. Esta condição depende do nível de significância adotado no teste, que neste trabalho foi de 5%.

As estatísticas marginais das precipitações diárias, geradas com o modelo AR(1), não se modificam com a utilização de diferentes coeficientes de auto-correlação. Ao se aumentar o valor do coeficiente de auto-correlação, aumenta-se a tendência de valores altos da precipitação serem seguidos por valores altos e também, vice-versa, valores baixos serem seguidos por valores baixos. Com isto melhora-se a representação das distribuições de probabilidades das precipitações máximas anuais de "n" dias de duração, para "n" maior que 1 dia.

A APLICAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O modelo foi aplicado a quatro sub-bacias da Bacia do Rio Uruguai, situada na Região Sul do Brasil. Trabalhou-se com a chuva média diária sobre essas quatro sub-bacias. O modelo foi aplicado em três versões: (a) considerando as alturas de chuvas diárias independentes; (b) considerando as alturas de chuvas diárias dependentes, com coeficiente de auto-correlação estimado pelo método dos momentos; (c) considerando as alturas de chuvas diárias pendentes, com coeficiente de auto-correlação "inflado" empiricamente, que podemos chamar de "modelo calibrado".

A Tabela 1 discrimina, por sub-bacia, o número de séries e o total de anos gerados em cada caso.

Tabela 1. Geração de Séries Sintéticas.

Sub-Bacia	Nº de Séries Sintéticas	Nº de Anos de Cada Série(*)	Total de Anos Gerados
Canoas	33	62	2.046
Pelotas	63	32	2.016
Passo Fundo	60	35	2.100
Uruguai	45	45	2.045

(*) Mesmo comprimento da série histórica

Considerou-se a sazonalidade de modo que cada mês constitui uma estação, exceto na sub-bacia do rio Canoas, onde o ano foi dividido em nove períodos pela agregação dos meses janeiro-fevereiro, setembro-outubro e novembro-dezembro.

Na Tabela 2 apresenta-se os coeficientes de auto-correlação correspondentes à versão (b) e (c). Na bacia do rio Pelotas não houve necessidade de incrementar os coeficientes de auto-correlação amostrais.

Tabela 2. Coeficientes de Auto-Correlação de Ordem 1.

Período Sazonal	Rio Canoas Versão b	Rio Canoas Versão c	Rio Pelotas Versão b	Rio Passo Fundo Versão b	Rio Passo Fundo Versão c	Rio Uruguai Versão b	Rio Uruguai Versão c
Jan	0,20	0,38	0,21	0,10	0,18	0,27	0,38
Fev	0,20	0,38	0,30	0,21	0,28	0,34	0,48
Mar	0,21	0,38	0,20	0,14	0,22	0,26	0,38
Abr	0,15	0,32	0,16	0,11	0,18	0,19	0,32
Mai	0,24	0,42	0,07	0,17	0,22	0,20	0,32
Jun	0,14	0,32	0,31	0,22	0,28	0,26	0,38
Jul	0,28	0,42	0,29	0,19	0,28	0,30	0,42
Ago	0,29	0,42	0,42	0,32	0,38	0,40	0,52
Set	0,16	0,32	0,24	0,21	0,28	0,28	0,42
Out	0,16	0,32	0,17	0,23	0,32	0,21	0,32
Nov	0,16	0,32	0,16	0,11	0,18	0,19	0,32
Dez	0,16	0,32	0,20	0,05	0,12	0,18	0,28

Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos testes de Kolmogorov-Smirnov para as três versões.

A Tabela 4 apresenta os totais anuais precipitados para a versão (c), podendo-se notar que em termos médios o modelo produziu resultados consistentes. Em relação aos totais máximos anuais o modelo, nas sub-bacias Canoas e Pelotas, não conseguiu superar os valores históricos. De modo análogo, na bacia do rio Pelotas não se conseguiu gerar, em 2016 anos de dados sintéticos, um total mínimo anual inferior ao valor mínimo observado nos 32 anos da série histórica. Ainda assim os resultados obtidos podem ser considerados razoáveis. A análise a nível mensal, embora os resultados não sejam mostrados, é praticamente igual à realizada a nível anual.

CONCLUSÕES

Com relação aos coeficientes de auto-correlação de ordem 1 apresentados na Tabela 2, há que se mencionar que outros coeficientes poderiam proporcionar resultados igualmente satisfatórios, pois o processo de busca foi empírico e por tentativas. Embora se tenha procurado os valores mais próximos dos amostrais, considerou-se desnecessário "otimizar" o processo. Mais do que isso, pretendeu-se mostrar a importância de se considerar dependentes as alturas de

Tabela 3. Resultados do Teste de Kolmogorov-Smirnov - d(calculados) dcrit= 1,358.

Sub-Bacia	Versão	Duração (dias) 1	2	3	5	7	10
Canoas	a	1,084	2,122	2,165	2,614	2,870	2,341
	b	0,825	1,515	1,478	1,988	2,196	1,760
	c	0,702	0,732	0,711	0,983	1,065	0,846
Pelotas	a	0,995	1,470	1,732	1,747	2,065	2,124
	b	0,650	0,849	0,635	1,020	1,069	1,182
P. Fundo	a	0,457	1,583	1,868	1,886	1,876	1,914
	b	0,788	0,996	1,277	1,258	1,335	1,402
	c	0,631	0,679	0,940	0,961	1,071	0,989
Uruguai	a	0,658	2,464	2,961	2,607	2,312	2,478
	b	0,561	1,471	1,768	1,354	1,085	1,358
	c	0,758	0,940	1,097	0,514	0,397	0,531

Tabela 4. Totais Anuais Precipitados (mm).

Sub-Bacia	Série	Mínimo	Médio	Máximo
Canoas	Histórica	987,8	1.515,5	2557,5
	Sintética	882,0	1.522,0	2256,2
Pelotas	Histórica	887,7	1.520,3	2.636,7
	Sintética	949,1	1.511,1	2.156,9
P. Fundo	Histórica	1.198,5	1.867,7	2.742,4
	Sintética	1.050,3	1.859,1	2.796,2
Uruguai	Histórica	1.038,2	1.543,2	2.688,4
	Sintética	928,9	1.565,9	2.952,8

precipitações em dias chuvosos consecutivos e a exeqüibilidade de se utilizar coeficientes de auto-correlação diferentes dos valores amostrais obtidos pelo método dos momentos.

O modelo proposto produziu resultados satisfatórios. Embora tenha sido aplicado na Bacia do Rio Uruguai, situada na Região Sul do Brasil, onde o ano hidrológico não é definido, acredita-se que possa ser utilizado em outras bacias e regiões, principalmente naquelas em que o processo precipitação é persistente, tendo vários dias de duração. Nestas situações a hipótese de dependência é particularmente interessante e o modelo proposto deve ser adequado.

REFERÊNCIAS

ELETROBRÁS/CEPEL (1987), *Guia para Cálculo de Cheia de Projeto de Vertedores,* Rio de Janeiro, RJ.

FOUFOULA-GEORGIOU, EFI (1985), *Discrete-Time Point Process Models for Daily Rainfall,* Water Resources Series, Technical Report No. 93, Dept. Civil Eng., University of Washington, Seattle, Washington, 98.195. Também Technical Report No. 85, Florida Water Resources Center, University of Florida, Gainesville, Florida, 32.611, USA.

KELMAN, JERSON (1977), *Stochastic Modeling of Hydrologic Intermittent Daily Processes,* Hydrology Papers No. 89, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 80523, USA.

KELMAN, JERSON (1987a), *Modelos Estocásticos no Gerenciamento de Recursos Hídricos,* Cap. 4, Vol. 1 da Coleção de Recursos Hídricos: Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos, Nobel/ABRH, São Paulo, SP.

KELMAN, JERSON e PEREIRA, MÁRIO V. F. (1977), Critérios de Avaliação para Modelos de Séries Hidrológicas, *IV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica,* Rio de Janeiro, RJ.

NASCIMENTO, CARLOS EDUARDO DE S. (1990), *Modelagem Estocástica para a Precipitação Diária,* Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ-Engenharia Civil/Área de Recursos Hídricos), Rio de Janeiro, RJ.

STEDINGER, J. R. e TAYLOR, N. R. (1982), Synthetic Streamflow Generation, 1 Model Verification and Validation, *Water Resources Research,* 86(4) pg. 117-122.

WOOLHISER, D. A. e ROLDAN, J. (1982), Stochastic Daily Precipitation Models, 2, A Comparison of Distributions of Amounts, *Water Resources Research,* 18(5), pg. 1461-1468.