

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

ELVYS DIAS REIS
LETÍCIA GABRIELA ANDRADE POLICARPO

**GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SÉRIES SINTÉTICAS DE
VAZÕES PARA SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO DA PCH
SALTO DO PARAPEBA - MG**

OURO BRANCO - MG
DEZEMBRO - 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA

ELVYS DIAS REIS
LETÍCIA GABRIELA ANDRADE POLICARPO

**GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SÉRIES SINTÉTICAS DE
VAZÕES PARA SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO DA PCH
SALTO DO PARAPEBA - MG**

Monografia apresentada à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Me. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira

OURO BRANCO - MG
DEZEMBRO - 2017

FOLHA DE APROVAÇÃO

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI

CAMPUS ALTO PARAÓPEBA

DECLARAÇÃO DE APROVAÇÃO

Título: GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DE SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES PARA SIMULAÇÃO DO ASSOREAMENTO DA PCH SALTO DO PARAÓPEBA - MG

Autores:

Elvys Dias Reis;

Letícia Gabriela Andrade Policarpo.

Aprovada como parte das exigências para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof. Me. Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira – UFSJ
(Orientador)

Prof. Dr. Eliane Prado Cunha Costa dos Santos – UFSJ
(Avaliador Interno)

Jackson de Oliveira Pereira
(Avaliador Interno)

Ouro Branco-MG, 21 de dezembro de 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho, e, em especial:

À Deus, por por tudo que tem nos proporcionado;

Às nossas famílias, pelo amor, incentivo e voto de confiança depositados;

A todos os amigos sempre presentes;

A todos professores e funcionários da UFSJ, pelos ensinamentos, apoio e suporte;

Ao professor Emmanuel Kennedy da Costa Teixeira, pela proposta de pesquisa, orientação, incentivo, atenção, acompanhamento do trabalho e participação como membro da banca examinadora;

Aos professores Eliane Prado Cunha Costa dos Santos e Jackson de Oliveira Pereira, pela participação como membros da banca examinadora.

RESUMO

A Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba, localizada no rio Paraopeba, em Jeceaba – MG, possui área de drenagem de, aproximadamente, 2.510 km². Segundo Vale (2014), o início de operação da PCH foi em 1956, sendo que ela teve que passar por reformas em 2000, pois o assoreamento havia alcançado a tomada d'água, impedindo a sua operação. Atualmente a usina encontra-se inoperante devido ao assoreamento. Como a estação fluviométrica da PCH Salto do Paraopeba não apresenta registros de vazões, não se sabe como ocorreu o processo de assoreamento que levou à interdição da usina. Assim, o objetivo do trabalho foi gerar séries sintéticas de vazões, utilizando o modelo estocástico AR1, as quais serão usadas futuramente para simular o assoreamento que causou a interdição da PCH. Foram utilizadas séries históricas de vazões correspondentes ao período de 1967 a 2014 registradas nas estações 40740000, localizada em Brumadinho – MG, e 40710000, localizada em Belo Vale – MG, pertencentes à Rede Hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA). De posse dessas séries históricas, procedeu-se às seguintes etapas: análise preliminar dos dados de vazão, preenchimento de falhas, aplicação dos testes de estacionariedade de Spearman e Mann-Kendall e de aderência de normalidade de Shapiro-Wilk, distribuição probabilística dos dados, análise de autocorrelação anual, modelagem dos dados segundo Thomas-Fiering ou modelo AR(1) e geração de 1.000 série sintéticas de vazões da PCH Salto do Paraopeba. Os resultados indicaram que o modelo estocástico se ajustou bem aos dados.

Palavras-chave: séries sintéticas de vazões, modelo estocástico AR1, assoreamento de reservatórios.

LISTA DE FIGURAS

Figura 0.1 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba	10
Figura 5.1 - Regressão linear entre as estações Alberto Flores e Belo Vale.....	38
Figura 5.2 - Histograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2014).....	40
Figura 5.3 - Correlograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2014)	41
Figura 5.4 - Resíduos distribuídos ao longo dos anos (1967 a 2014).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – Inventário das estações do rio Paraopeba	37
Tabela 5.2 – Correlação entre as estações analisadas	38
Tabela 5.3 – Série de vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba.....	39
Tabela 5.4 - Principais parâmetros estatísticos da série original e das séries sintéticas	41
Tabela 5.5 - Principais parâmetros estatísticos dos resíduos das séries sintéticas	42

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VII
1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GERAL	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3 REVISÃO DA LITERATURA	13
3.1 USO DE DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS E SUAS INCERTEZAS.....	13
3.2 UTILIZAÇÃO DOS MODELOS ESTOCÁSTICOS	18
3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ESTOCÁSTICOS NA HIDROLOGIA	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	34
4.2 GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES.....	35
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	37
5.1 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS.....	37
5.2 GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES.....	39
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
APÊNDICE A	48

1 INTRODUÇÃO

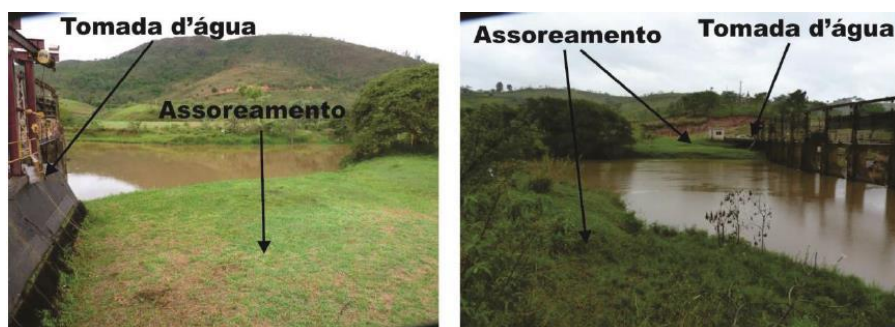
Reservatórios podem ser construídos para diversas finalidades, como abastecimento público de água, geração de energia, irrigação, controle de enchentes (ESTIGONI; MATOS; MAUD, 2014) e, ainda, acúmulo de rejeitos de mineração. Essas estruturas formadas em cursos d'água naturais estão sujeitas a algum grau de assoreamento, visto que a construção de uma barragem num rio afeta as suas características físicas e hidráulicas.

Além da redução do volume do reservatório, o assoreamento também pode provocar problemas operacionais, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN; MATOS; MAUD, 2010).

Em se tratando de reservatórios de hidrelétricas, Maia (2006) apresenta que o assoreamento é um sério problema que leva à diminuição da capacidade de geração de energia das usinas, visto que ocorre alteração na vazão regularizada. Assim, o faturamento da concessionária com a venda de energia elétrica será reduzido, o que, conseqüentemente, acarretará na redução da compensação financeira que é paga aos Estados, Distrito Federal, Municípios e Órgãos da União, receita que é proporcional à geração de energia elétrica.

A Pequena Central Hidrelétrica (PCH) Salto do Paraopeba, localizada no rio Paraopeba, em Jeceaba – MG, segundo Vale (2014), iniciou sua operação em 1956, sendo que ela teve que passar por reformas em 2000, pois o assoreamento havia alcançado a tomada d'água – um dos problemas citados por Albertin, Matos e Mauad (2010), impedindo a sua operação. Atualmente a usina encontra-se inoperante devido ao assoreamento. Na Figura 1.1 é apresentado o assoreamento alcançando a tomada d'água da usina.

Figura 0.1 - Assoreamento do reservatório da PCH Salto Paraopeba



Fonte: Vale, 2014.

Assim, diante do exposto acerca da PCH Salto do Paraopeba e apresentados os problemas causados pelo assoreamento, torna-se importante entender a maneira em que ele ocorreu ao longo de um determinado período, de forma que seja possível tomar medidas preventivas e corretivas quando da operação de reservatórios de hidrelétricas, bem como incentivar estudos que visem apresentar metodologias para prever taxas de sedimentação, a qual é essencial para a fase de projeto e operação de um reservatório.

Porém, para que os estudos conduzam a resultados confiáveis, são necessários dados locais representativos e consistentes, os quais raramente estão disponíveis no Brasil, uma vez que a densidade de estações sedimentométricas é reduzida e dificilmente se tem amostragens de longo tempo nos locais de interesse. Além da baixa quantidade de postos sedimentométricos, nos existentes são realizadas apenas medições da concentração sólida em suspensão, sem a determinação da descarga sólida total e dados de granulometria. Assim, muitos estudos sedimentológicos no país são prejudicados. Dessa forma, é necessário o surgimento de novas metodologias que auxiliem na obtenção de série de dados confiáveis.

A simulação estocástica surge como uma alternativa para esse cenário, pois a partir de alguns dados hidrossedimentológicos locais é possível gerar séries sintéticas com milhares de dados, os quais podem ser utilizados na modelagem numérica determinística.

Além do problema da falta e da qualidade dos dados hidrossedimentológicos, grande parte das séries históricas de vazões obtidas no Portal da Agência Nacional das Águas (ANA), HidroWeb, possui porcentagem significativa de dados faltosos, são curtas, contendo poucos anos de dados, ou contém dados suspeitos. Ademais, é sabido que os fatores que interferem

no processo de assoreamento estão sujeitos a grande variabilidade temporal e a várias incertezas, o que torna o seu estudo não apenas determinístico, mas também estocástico.

Assim, desenvolver um modelo estocástico-determinístico para avaliar o assoreamento de reservatórios de água é objetivo principal dessa pesquisa. Entretanto, como o projeto ainda está em desenvolvimento, nesse primeiro momento, será apresentado apenas o modelo estocástico utilizado para geração de séries de vazões. Em particular, serão objeto de estudo deste trabalho os dados de vazão referentes à PCH Salto do Paraopeba, os quais são inexistentes por falta de registros e incerteza de informações acerca da sua estação fluviométrica.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Gerar séries sintéticas de vazões, a partir de um modelo estocástico adequado, para a PCH Salto do Paraopeba, localizada no município de Jeceaba – MG, de maneira que se possa simular seu assoreamento futuramente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos desse trabalho são

- Identificar estações fluviométricas próximas à PCH que possuam dados de vazões diárias;
- Para a estação fluviométrica selecionada, fazer a análise preliminar dos dados, preenchendo as falhas existentes, além de se verificar a estacionariedade, a normalidade e a autocorrelação dos dados;
- Utilizar um modelo numérico estocástico para gerar séries sintéticas de vazões para a PCH Salto do Paraopeba.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ASSOREAMENTO DE RESERVATÓRIOS E SUAS INCERTEZAS

Os recursos hídricos constituem um bem natural e renovável, de maneira que o volume total disponível no globo terrestre permanece relativamente constante ao longo do tempo. Contudo, a água se mantém em circulação dinâmica, sendo variável no tempo, secular e sazonal, nos diversos compartimentos ambientais. Dessa forma, a distribuição de água no planeta se altera ao longo dos anos, sendo influenciada diretamente pela forma como o ambiente vem sendo modificado, desde os impactos locais até os impactos globais, além de sofrer alterações no decorrer de um ano hidrológico, segundo as diversas estações climáticas (HELLER; PÁDUA, 2010).

A gestão de recursos hídricos é de fundamental importância para o planejamento, desenvolvimento, distribuição e administração dos recursos hídricos, uma vez que visa garantir sua utilização da maneira mais otimizada possível, em conformidade com a legislação e normas pertinentes. Tal gestão tem como objetivo manter a qualidade e a quantidade de água disponível, promover o desassoreamento e controle de erosão, executar o controle de cheias e recomposição de mata ciliar, além de recuperar e preservar nascentes, mananciais e cursos d'água.

Como a água está constantemente se repondo na natureza e, embora as reservas de água em reservatórios naturais e artificiais sejam úteis para aumentar os recursos hídricos disponíveis, o fluxo de água deve ser o foco principal nas avaliações de recursos hídricos. Ao considerar o fluxo de água como a medida mais relevante dos recursos hídricos, a velocidade de escoamento da água torna-se crucial (OKI; KANAI, 2006).

Segundo Garg e Jothiprakash (2008), a velocidade do escoamento e a sua turbulência são reduzidas com a construção de reservatórios em cursos d'água naturais, o que se deve ao aumento da área molhada da seção transversal do rio e à diminuição da declividade da linha d'água. Tal redução tem o efeito de desacelerar o movimento da partícula na direção da corrente e de restringir a resultante das forças de sustentação (LOPES, 1993). Desse modo, as partículas sólidas podem se depositar ao longo do reservatório, estando este sujeito a algum grau de assoreamento.

O assoreamento é um problema que afeta os cursos d'água ocasionando a diminuição do volume de água disponível para utilização e, conseqüentemente, a redução da quantidade de energia gerada. É causado principalmente pela água da chuva, que transporta os sedimentos suspensos que são originados do solo exposto devido ao seu esgotamento por uso inadequado e devido à retirada da vegetação. Qualquer reservatório, independente da sua finalidade, pode ter sua capacidade de armazenamento alterada por causa da presença de sedimentos. Dessa forma, de acordo com Cabral (2005), atualmente há um grande número de reservatórios no Brasil que se encontra totalmente ou parcialmente assoreados, sendo estes, em sua maioria, de pequeno e médio porte.

O depósito das partículas mais grossas da carga de sedimentos afluente ao reservatório, compostas principalmente por pedregulho e areia, tendem a ocorrer na entrada do lago (final do remanso). As partículas de tamanho médio são as próximas a serem depositadas, seguidas pelas partículas finas, as quais tendem a se depositar no trecho final do reservatório ou permanecem em suspensão e alcançam os órgãos de descarga (TEIXEIRA, 2013).

Nesse contexto, diversos fatores afetam o volume de sedimentos que se acumulará num reservatório, sendo eles: a quantidade de sedimentos produzidos na bacia de contribuição; as condições geológicas, climáticas e vegetação da região; as características físicas e hidráulicas do reservatório; e as características dos sedimentos – sendo que, dentre esses, segundo Salas e Shin (1999), os principais fatores são: a vazão do rio; a quantidade de sedimentos que entra no reservatório; o tamanho e o peso específico dos sedimentos; e o tamanho e a operação do reservatório. Problemas decorrentes do assoreamento em reservatório dizem respeito, principalmente, à redução do seu volume, o que pode interferir no uso para o qual ele foi construído.

Além da redução do volume do reservatório, o assoreamento também pode provocar problemas operacionais, como: abrasão de componentes, tubulações e pás de turbinas; problemas mecânicos nas manobras das eclusas e comportas; dificuldade ou impedimento da captação de água pela estrutura de tomada d'água; afogamento dos locais de desova, alimentação e abrigo dos peixes; formação de bancos de areia, diminuindo o calado para a navegação; além de afetar a segurança da barragem (ALBERTIN; MATOS; MAUAD, 2010). Em reservatórios construídos para o controle de enchentes, o assoreamento reduz sua capacidade de retenção, podendo causar perdas econômicas e até de vidas humanas à jusante

deles. Além disso, os sedimentos interagem com a água retendo por adsorção ou liberando seus poluentes.

Assim, vistos os problemas causados pelo assoreamento, tornam-se importantes os estudos que visem apresentar metodologias para prever taxas de sedimentação, a qual é essencial para as fases de projeto e operação de um reservatório. Com auxílio de trabalhos nessa área, os quais promovam estimativa espaço-temporal do assoreamento, possibilita-se o estudo do volume do material a ser sedimentado ao passar dos anos e sua distribuição não uniforme no reservatório. Além disso, tanto medidas preventivas quanto corretivas podem ser tomadas de forma mais eficiente, pois, como discutido por Annandale (2011) citado por Adam *et al.* (2015), o controle da sedimentação em reservatórios deve ser uma prioridade pelas décadas que estão por vir.

Entretanto, prever o acúmulo de sedimentos é uma tarefa difícil porque os processos envolvidos - erosão, transporte, deposição e consolidação dos sedimentos - são complexos e podem ocorrer simultaneamente. Além disso, os fatores que interferem no processo estão sujeitos a grande variabilidade temporal e a várias incertezas, o que torna o estudo do assoreamento não apenas determinístico, mas também estocástico. Assim, desenvolver um modelo estocástico para avaliar o assoreamento de reservatórios de água é um dos focos desse projeto. Ressalta-se que, ao se utilizar um modelo estocástico, além de avaliar as incertezas, pode-se também determinar as estatísticas do sedimento depositado no reservatório ao longo do tempo, como a média, a variância e a distribuição de probabilidade.

Pode-se citar algumas das incertezas envolvidas no processo de assoreamento, as quais são devidas à variabilidade natural do sistema: vazão afluente; concentração de sedimentos; granulometria dos sedimentos; entre outros. Além disso, há imprecisões na medição desses parâmetros e possibilidade de serem imprecisos os levantamentos topobatimétricos da região do reservatório.

Em relação às incertezas associadas à vazão, Righetto (1998) discutiu o caráter estocástico das vazões de um curso d'água, sendo elas uma variável aleatória que apresentam três componentes principais: o componente de tendência, o qual descreve a variação da vazão (aumento ou diminuição) ao longo do tempo; o componente de periodicidade, o qual define as variações provocadas pela sazonalidade (período seco e chuvoso); e o componente aleatório, o

qual representa a variação e aleatoriedade da magnitude e frequência de ocorrência da variação da vazão.

Outra fonte de incerteza na estimativa do assoreamento de reservatórios é o fato do estudo ser feito para um cenário futuro, de forma que há também incertezas embutidas nas estimativas do aporte de sedimentos e vazões afluentes futuros. Tem-se que o aporte de sedimentos pode variar ao longo dos anos devido à mudança de uso e ocupação da bacia de drenagem, enquanto a vazão pode ser influenciada pela mudança climática.

Schleiss *et al.* (2016) apresentam que a incerteza quanto à mudança climática torna o processo de assoreamento em reservatórios um fenômeno estocástico, sendo que, segundo Juracek (2015), é esperado que as mudanças climáticas afetem os reservatórios aumentando as taxas de sedimentação. Assim, a estocasticidade relacionada ao aquecimento global deve ser considerada em modelos de transporte de sedimentos.

Além das fontes de incerteza na variabilidade natural do sistema, a qual Tung e Yen (2005) *apud* Kuria e Vogel (2015) ressaltam que são difíceis de controlar, tem-se incertezas relacionadas ao modelo, as quais são específicas ao modelo matemático usado para representar o sistema natural. Esse tipo de incerteza geralmente decorre de uma compreensão incompleta do sistema que está sendo modelado, da incerteza relacionada com os dados e da incerteza operacional (FRANCESCHINI; TSAI, 2010).

Assim, diante de tantas fontes de incertezas, métodos de análise dessas imprecisões estão sendo desenvolvidos em algumas áreas relacionadas ao manejo de recursos hídricos, porém, os estudos relacionados com as análises de incerteza da modelagem de transporte de sedimentos ainda são limitados (OH, TSAI; CHOI, 2015), mais especificamente, são poucos os estudos que propuseram algum modelo estocástico para estudar o assoreamento de reservatórios.

A fim de realizar este estudo, faz-se necessária a utilização de séries históricas de vazões provenientes de medições realizadas em uma estação fluviométrica, a qual, de acordo com Pinto e Holtz (1976), consiste em qualquer seção de um rio, convenientemente instalada e operada para a obtenção sistemática das vazões ao longo do tempo. A vazão é obtida a partir do nível das águas, observado com a ajuda da régua linimétrica ou registrado pelo linígrafo, aplicado em uma curva-chave.

De posse destas medições, cria-se uma série histórica, que é um conjunto de eventos e dados agrupados ao longo do tempo. Esses dados, obviamente, são os valores das vazões.

A Agência Nacional das Águas (ANA), por meio do portal HidroWeb, disponibiliza séries históricas de cotas, chuvas, evaporação, perfil do rio, qualidade da água, sedimentos e, sobretudo, vazões. É possível notar a presença de falhas diárias, mensais e anuais em tais séries, o que pode interferir na realização de estudos ou até mesmo inviabilizá-los. As falhas podem ser devido à ausência do observador, falhas nos mecanismos de registro, perda das anotações ou das transcrições dos registros pelos operadores e encerramento das observações (Streck *et al.*, 2009; Bertoni; Tucci, 2007).

Sendo assim, conforme mencionado por Teixeira *et al.* (2016), ao se analisar as séries, é comum tomar-se a decisão de descartar todo o ano hidrológico com falhas ou utilizar alguma metodologia para preenchê-las.

O preenchimento de falhas e a extensão das séries são realizados por meio da análise de correlação dos dados observados no período comum entre a estação com dados a serem preenchidos e a estação de apoio (PRUSKI; SILVA; KOETZ, 2006).

Desta forma, segundo Barnetche e Kobiyama (2006) *apud* Oliveira *et al.* (2008), a aplicação da modelagem no preenchimento de falhas pode facilitar os estudos de gestão dos recursos hídricos, uma vez que possibilita o conhecimento do comportamento hidrológico, permitindo um aproveitamento consciente destes recursos.

Nesse cenário de falhas e incertezas associadas ao processo de assoreamento, alguns trabalhos encontrados na literatura nacional apresentaram modelos estocásticos para o estudo do transporte de sedimentos, podendo-se citar Farias (2003) e Estigoni (2016).

No trabalho desenvolvido por Farias (2003), gerou-se séries sintéticas de vazões por três metodologias diferentes – Thomas & Fiering com modificação de Clarke, Thomas & Fiering com modificação de Clarke e transformação de Matalas e Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos de Svanidze – com o objetivo de melhor representar o escoamento das águas para os reservatórios e auxiliar no seu dimensionamento, de modo que ele ocorra de acordo com as reais necessidades. O autor conclui que, dentre os métodos de geração de vazões estudados, aquele que melhor reproduziu a natureza do evento hidrológico em questão – o regime de escoamento das águas para os reservatórios – foi o Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos de Svanidze.

Estigoni (2016), por sua vez, identificou em seu trabalho os mecanismos de como a variabilidade hidrológica influencia a previsão do assoreamento de reservatórios por meio de casos idealizados e validação das hipóteses em estudo de caso, propondo ainda um fluxograma de atividades para a previsão de assoreamento capaz de reduzir incertezas inerentes a estes estudos, pautado na modelagem hidrodinâmica de transporte de sedimentos, ferramentas de hidrologia estatística e uso de múltiplos cenários. O autor comprova que modelos estocásticos para geração de séries sintéticas produzirão séries ligeiramente diferentes caso aplicados mais de uma vez, mesmo quando utilizando parâmetros de calibração iguais, causando significativa diferença na previsão do assoreamento.

3.2 MODELOS ESTOCÁSTICOS

De acordo com Koenigsdorf (2009), um processo estocástico pode ser definido como uma sequência de variáveis aleatórias indexadas ao tempo e também a eventos. É uma variável que se desenvolve no tempo de maneira parcialmente aleatória e imprevisível. Por outra perspectiva, um processo estocástico é uma sequência de funções mensuráveis, ou seja, uma variável aleatória definida num espaço de probabilidade que toma valores num espaço de funções. O autor descreve ainda que tais processos podem ser classificados em estacionários e não estacionários.

Para Werner e Ribeiro (2003), modelos estacionários são aqueles que assumem que o processo está em “equilíbrio”. Assim, um processo é considerado fracamente estacionário se suas média e variância se mantêm constantes ao longo do tempo e a função de autocovariância depende apenas da defasagem entre os instantes de tempo. Um processo é fortemente estacionário se todos os momentos conjuntos são invariantes a translações no tempo.

Ainda segundo Koenigsdorf (2009), os processos estocásticos estacionários com média e a variância constantes no tempo são amplamente utilizados, em detrimento dos não estacionários, os quais possuem momentos que crescem sem limites à medida que o tempo passa.

Um processo estocástico pode ser classificado como um processo em tempo discreto ou em tempo contínuo. Um processo estocástico em tempo discreto é aquele em que o valor da variável só varia em um determinado instante de tempo. Esta variável é classificada com

variável discreta. Já um processo em tempo contínuo, a variável assume valores a qualquer instante de tempo, por isso é chamada de variável contínua.

Nesse contexto, Lúcio *et al.* (2010) descrevem que uma série temporal pode ser analisada como uma realização parcial de um processo estocástico, por meio de modelos estocásticos, cuja característica principal se fundamenta no fato das variáveis apresentarem uma estrutura de dependência. Para essa análise, são utilizados modelos estocásticos.

A escolha do modelo estocástico, segundo Morettin e Toloi (2006) *apud* Câmara *et al.* (2016), é baseada, principalmente, nas autocorrelações da variável aleatória em questão.

Ressalta-se também que ao se utilizar um modelo estocástico, além de avaliar as incertezas, pode-se também determinar as estatísticas da variável em análise ao longo do tempo, como a média, a variância e a distribuição de probabilidade.

Dentre tais modelos, destaca-se o modelo AR1. Esse é um modelo autorregressivo, onde os dados de uma série são considerados como sendo um processo composto pela soma de duas componentes: uma determinística e outra aleatória (Farias, 2003). A Equação 1 representa o modelo completo para o cálculo da vazão, sendo ela:

$$Q_i = \mu + \rho * (Q_{i-1} - \mu) + t_i * \sigma * (1 - \rho^2)^{1/2} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: Q_i é a vazão no intervalo de tempo definido; μ é a média populacional dos dados; ρ é o coeficiente de autocorrelação da população; t_i é uma componente de aleatoriedade gerada a partir da distribuição normal $\sim N(0,1)$; e σ é o desvio padrão populacional.

Uma das premissas para utilização de alguns modelos estocásticos, como o AR1, é que os dados sejam estacionários. Para verificação de tal asserção, aplica-se o teste não-paramétrico de *Spearman*.

O termo “estacionariedade” refere-se ao fato que, excluídas as flutuações aleatórias, as observações amostrais são invariantes em relação à cronologia de suas ocorrências (NAGHETTINI, 2007), podendo ser influenciadas por tendências temporais, as quais, segundo o autor, associam-se a mudanças graduais que se processam na bacia.

Segundo Nerc (1975), a ideia essencial do teste não-paramétrico de *Spearman* é que, se uma tendência temporal existir em uma série hidrológica X_t , ao longo do tempo t , ela pode ser identificada pela correlação entre o índice de tempo e os dados da série. Assim, a base do teste

serão os índices de tempo T_t , que variam de 1 a N, e o coeficiente de correlação (r_s) entre as ordens de classificação m_t da série X_t , dado pela Equação 2.

$$r_s = 1 - \frac{6 * \sum_{t=1}^N (m_t - T_t)^2}{N^3 - 3} \quad \text{Equação (2)}$$

Ressalta-se que N deve ser maior do que 10 para que exista a possibilidade de a série ser estacionária. Sendo assim, além dessa premissa, admite-se que não existe tendência temporal como hipótese nula, H_0 , para demonstrar que a distribuição de r_s , $E[r_s]$, pode ser aproximada por uma Normal de média igual a zero e variância mensurada pela Equação 3.

$$\text{Var}[r_s] = \frac{1}{N - 1} \quad \text{Equação (3)}$$

Assim, para a hipótese nula supracitada, a estatística do aludido teste será dada pela Equação 4, a qual segue uma distribuição Normal padrão.

$$T = \frac{r_s}{\sqrt{\text{Var}[r_s]}} \quad \text{Equação (4)}$$

Por se tratar de um teste bilateral, a um nível de significância α , deve-se rejeitar a hipótese nula de que não existe tendência temporal caso $|T| > Z_{(1-\alpha/2)}$, segundo Naghettini (2007).

Além do teste de *Spearman*, utilizou-se o método não-paramétrico de Mann-Kendall para avaliar a estacionariedade dos dados e confirmar os resultados do primeiro teste. De acordo com Back (2001), Marengo e Alves (2005), Blain (2009), Krishnakumar e Gopakumar (2009) e Rodrigues *et al.* (2010), o método não paramétrico de Mann-Kendall, proposto inicialmente por Mann (1945) e Kendall (1975), tem sido muito utilizado na análise de tendência da variabilidade de séries temporais meteorológicas.

Segundo o teste, para as observações X_1, X_2, \dots, X_n de uma série temporal, deve-se testar a hipótese nula H_0 de que as observações da série são independentes e identicamente distribuídas, ou seja, de que não há tendência. Sendo assim, sob H_0 , a estatística do teste é dada pela Equação 5.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad \text{Equação (5)}$$

Onde $\text{sign}(x)$ vale 1, se $x > 0$; 0, se $x = 0$; e -1, se $x < 0$.

Além disso, mostra-se que S segue uma distribuição normal, isto é, $S \sim N(\mu, \sigma^2)$, sendo a média μ igual a 0 (zero) e a variância dada pela Equação 6.

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{j=1}^P t_j(t_j-1)(2t_j+5)}{18} \quad \text{Equação (6)}$$

Na qual n é o número de observações, P é o número de grupos com observações iguais e t é número de observações iguais no grupo j , caso ocorram.

Caso n seja superior a 30, a estatística do teste é dada pela Equação 7.

$$Z = \frac{S-1}{\sigma}, \text{ se } S > 0; 0, \text{ se } S = 0; \frac{S+1}{\sigma}, \text{ se } S < 0 \quad \text{Equação (7)}$$

A Equação 7 também pode ser usada mesmo para n menor do que 30.

Assim, para um teste bilateral, não rejeitamos H_0 para um nível de significância α , se para $Z_{\alpha/2}$ de uma distribuição normal se obtido atendida a condição: $|Z| \leq Z_{\alpha/2}$.

Outra premissa que deve ser observada, quando da utilização do modelo estocástico AR1, é se os dados estão normalmente distribuídos. Assim, é usual construir o histograma dos dados, o qual ajudará numa inspeção visual da distribuição de probabilidade.

Complementando tal análise de distribuição de probabilidade, pode-se ainda aplicar Teste de Normalidade ou Teste de *Shapiro-Wilk*, apresentado por Shapiro (1965). Shapiro e Wilk (1965) desenvolveram o teste mostrando que ele é eficiente para diferentes distribuições e tamanhos de amostras quando comparado aos resultados de outros testes, como o de Kolmogorov-Smirnov, por exemplo.

Field (2009) ressalva que o teste pode ser tendencioso de acordo com o tamanho da amostra, ou seja, pode ser estatisticamente significativo a partir de uma distribuição normal em amostras grandes.

Para a verificação da normalidade por meio do aludido teste, existem diversas ferramentas e programas estatísticos, dentre os quais o R, que é usado para a análise de dados e permite manipular, transformar, criar tabelas e gráficos que resumam as informações obtidas, entre outras funções.

Diversos trabalhos já foram publicados analisando a eficiência deste e de outros testes. Leotti *et al.* (2005) consideraram que o teste de *Shapiro-Wilk* é, aparentemente, o melhor teste de aderência à Normalidade. Este fato também é confirmado pelos autores Cirillo e Ferreira (2003) e Öztuna *et al.* (2006).

O teste baseia-se na estatística W, dada pela Equação 8,

$$W = \frac{b^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad \text{Equação (8)}$$

na qual x_i são os valores ordenados da amostra e b é uma constante determinada pelas Equações 9 e 10.

$$b = \sum_{i=1}^{n/2} a_{n-i+1} * (x_{n-i+1} - x_i) \quad \text{Equação (9)}$$

$$b = \sum_{i=1}^{(n+1)/2} a_{n-i+1} * (x_{n-i+1} - x_i) \quad \text{Equação (10)}$$

Caso n seja par, utiliza-se a Equação 9, do contrário usa-se a Equação 10, nas quais a_{n-i+1} são constantes geradas pelas médias, variâncias e covariâncias das estatísticas de ordem de uma amostra de tamanho n de uma distribuição Normal.

Para realizar o teste, assume-se como hipótese nula H_0 que a amostra provém de uma população Normal e se estabelece um nível de significância do teste, α , e então se calcula W. Caso $W_{\text{calculado}} < W_{\alpha}$, rejeita-se H_0 ao nível de significância α , sendo os valores de W_{α} facilmente encontrados na literatura.

Quando se faz uma simulação estocástica, é importante avaliar se as séries geradas apresentam características estatísticas semelhantes às da série original (média, variância e autocorrelação). Além disso, também se deve estimar os resíduos (e) das séries temporais, ou seja, os erros de previsão de um passo a frente, de acordo com a Equação 11.

$$e_t = X_t - Y_t \quad \text{Equação (11)}$$

Em que X_t é o valor da vazão da série sintética no ano t e Y_t é o valor correspondente ao mesmo ano na série original.

Assim, de acordo com Chatfield (2000), se os dados se ajustarem bem ao modelo, então os resíduos devem formar uma série aleatória com média próxima de zero. Além disso, a autocorrelação da série de resíduos deve ser analisada para se verificar se os dados se ajustam bem ao modelo, devendo esta ser significativa e próxima da original.

3.3 APLICAÇÃO DOS MODELOS ESTOCÁSTICOS

Quando da aplicação da modelagem estocástica, diversos autores desenvolveram trabalhos que contribuem para o seu entendimento, projetos e estudos acerca do uso de recursos hídricos, e, mais especificamente, para a simulação do assoreamento de reservatórios.

Adam *et al.* (2014) estimaram a sedimentação futura no reservatório Sidi Yacoub no norte da Argélia usando uma abordagem estocástica. Segundo os autores, a grande novidade do trabalho é a abordagem estocástica desenvolvida para caracterizar as vazões de montante e jusante ao reservatório, sendo essa uma abordagem nova, a qual permite um alto nível de detalhamento na reprodução da variabilidade das séries anuais. Assim, a estimativa para assoreamentos futuros pôde ser executada numa abordagem verdadeiramente estocástica, tendo como premissa a estacionariedade das distribuições estatísticas das vazões ao longo de todo o período analisado.

Oh, Tsai e Choi (2015) afirmaram que uma estimativa precisa das concentrações de sedimentos é particularmente difícil e continua a ser um desafio, uma vez que existe um elevado grau de incerteza envolvido no processo global de transporte de sedimentos. Assim, os autores propuseram uma abordagem estocástica desse transporte para quantificar a incerteza associada à estimativa da concentração de sedimentos. Deve-se destacar que a descarga de sedimentos, utilizada nas estimativas do assoreamento de reservatórios, muitas vezes são obtidas de forma indireta a partir da concentração de sedimentos. Visto que a estimativa da concentração de sedimentos é imprecisa, tem-se que a descarga sólida também é imprecisa, ou seja, tem-se uma propagação de incertezas.

Estigoni (2016) discutiu a incerteza na estimativa do assoreamento devido ao aporte de sedimentos, o qual é geralmente realizado por meio da relação da descarga sólida com a vazão (curva-chave de sedimentos), sendo esta uma relação expressada por uma equação do tipo potência. Segundo o autor, muitas vezes a curva-chave de sedimentos calibrada pode não representar bem a realidade, visto que a maioria do transporte de sedimentos se dá em eventos

de cheia, fazendo a ressalva que medições durante esses eventos são importantes, porém tendem a não acontecer. Foram montados quatro cenários de vazões variando em torno de uma mesma média, sendo a diferença entre os cenários a amplitude de variação das vazões. Os resultados apresentados demonstraram que quanto maior a amplitude de variabilidade da vazão, maior o aporte de sedimentos, mesmo se tendo uma vazão média constante. O autor também apresentou que quanto maior o expoente da curva-chave de sedimentos, maior é a influência da variabilidade da vazão no cálculo da descarga sólida.

Freitas (2001) afirma que para a otimização e análise de risco de sistemas múltiplos de reservatórios são empregados modelos de geração sintética de vazões. Os modelos autoregressivos utilizados para este fim são recomendados para rios de regiões temperadas, os quais não têm a mesma eficiência para rios de regiões semi-áridas. Sendo assim, como o trabalho visa a geração sintética de vazões, foram estudados diversos modelos, tanto de modelagem anual (AR(1), GAR(1), ARR), quanto de modelagem mensal (PAR(1), Two-tier, Método dos Fragmentos e Modelo de Desagregação), adaptados para regiões com esta condição climática e aplicados a bacias hidrográficas localizadas na região Nordeste do Brasil. Ademais, na gestão de recursos hídricos destes locais é importante a análise dos impactos de secas extremas por meio deste método, além da definição de políticas de otimização do uso e conservação da água. Notou-se que, dos modelos utilizados na geração de vazão, o método dos fragmentos, quando aplicado às diversas bacias do semi-árido brasileiro, apresenta melhores resultados. Portanto, ele é uma ferramenta útil no projeto e otimização de sistemas de reservatórios nesses tipos de regiões.

Farias (2003), em sua dissertação, gerou séries sintéticas de vazões a fim de analisar o regime de escoamento das águas para os reservatórios, utilizando três métodos diferentes: Thomas & Fiering com modificação de Clarke, Thomas & Fiering com modificação de Clarke e transformação de Matalas e Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos de Svanidze. Dessa forma, obteve-se as curvas de garantia mensal com as séries geradas pelos métodos e as comparou graficamente com as curvas de garantia mensal obtidas a partir do emprego das séries históricas de vazões afluentes. Ademais, fez-se uma análise baseada nos erros relativos das vazões regularizadas com garantia mensal de 90%. Tais vazões foram determinadas segundo o emprego das séries históricas com a finalidade de analisar o efeito da diferença entre as metodologias. Concluiu-se que os resultados mais adequados foram obtidos pelo Método de Monte Carlo associado ao Método dos Fragmentos

de Svanidze uma vez que foi o que melhor reproduziu a natureza do evento hidrológico em questão.

O trabalho de Câmara *et al.* (2015) teve por objetivo o desenvolvimento de um modelo hidrológico estocástico para a previsão diária de nível fluviométrico do rio Tocantins para o município de Marabá no estado do Pará. Para este fim, foi utilizado o modelo hidrológico empírico e estocástico, com base em dados diários de níveis e na metodologia de Box e Jenkins (BJ) ou ARIMA “*Auto Regressive Integrated Moving Average*”. Tal método tem como vantagem o uso de modelo de regressão linear e do modelo ARIMA para suavização de erros aleatórios e para sua aplicação avaliou-se todas as premissas recomendadas a fim de obter melhores resultados. O modelo ajustado conseguiu alcançar o propósito de capturar a dinâmica das séries temporais, apresentando bons resultados, podendo auxiliar no planejamento e na elaboração de ações preventivas quanto à ocorrência de impactos gerados pela ação de fenômenos naturais para o município de Marabá.

Costa, Damázio e Raupp (2014) utilizaram o modelo de simulação estocástica OPCHENS para operação semanal de controle de cheias em reservatórios de sistemas hidroelétricos. Tal modelo visa avaliar os volumes de espera calculados no estudo de prevenção de cheias e as regras de operação propostas a partir da análise estatística de variáveis associadas ao controle de cheias. Para tanto, o modelo simulou 12.000 séries sintéticas de vazões diárias afluentes aos reservatórios do sistema hidrelétrico com horizonte de tempo igual a duração da estação chuvosa da bacia em estudo. Como resultado do trabalho desenvolvido, estimou-se os tempos de retorno alcançados, as estatísticas do número e duração das inundações e das defluências máximas, as frequências de inundações ao longo da estação chuvosa e as probabilidades associadas aos armazenamentos finais dos reservatórios.

Kelman (1987), em seu capítulo sobre modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos, descreve algumas técnicas para quantificar e atribuir probabilidades a eventos futuros relacionados com a disponibilidade de recursos hídricos. Além disso, discute de que maneira essas probabilidades são afetadas por obras de engenharia, tais como reservatórios de regularização e afirma que os modelos e algoritmos matemáticos empregados em hidrologia estocástica são construídos sobre conceitos de probabilidade e estatística.

Bialik (2011) desenvolveu, com base na abordagem de Lagrange, um modelo teórico de grãos não uniformes em um fluxo turbulento de canal aberto. Na análise descrita por ele,

propõe-se um modelo estocástico mais realista de colisão de camadas de partículas. Com base em considerações geométricas, são derivadas novas fórmulas para os valores máximo e mínimo do ângulo de superfície de colisão com uma camada irregular. Uma simulação de Monte Carlo da distribuição de partículas é introduzida e são apresentadas simulações numéricas de possíveis trajetórias de partículas com diferentes tamanhos em um fluxo de canal aberto. Isto demonstra que o mecanismo de colisão de camadas de partículas depende exatamente dos seus diferentes tamanhos e da estrutura do leito do canal. Além disso, apresentou-se uma aplicação para a análise da difusão longitudinal de partículas não uniformes e o problema com as condições iniciais em simulações numéricas de movimento de partículas é brevemente descrito.

Carneiro e Farias (2013) aplicaram a técnica de Otimização Estocástica Implícita (OEI) e Redes Neurais Artificiais (RNA) visando a operação sustentável de um sistema de reservatórios localizado no sertão paraibano utilizando um conjunto de possíveis cenários de entrada. Os cenários mensais sintéticos de vazões afluentes ao sistema hídrico foram obtidos pelo Método dos Fragmentos, o qual tem como princípio básico desagregar vazões anuais em vazões mensais segundo uma forma padronizada, gerando vazões sintéticas com propriedades estatísticas similares às dos dados observados. Os resultados obtidos por tal método apontaram que o modelo apresenta potencial para simulação estocástica de vazões mensais em regiões semiáridas. As regras operacionais OEI-RNA geraram resultados superiores à política de operação padrão e equivalentes a um modelo determinístico. Contudo, a técnica OEI-RNA se mostrou mais adequada por necessitar apenas de informações sobre o volume inicial e vazão afluente para o mês corrente, diferentemente do modelo determinístico, o qual apresentou melhores resultados, porém para aplicá-lo necessita-se de conhecer todo o horizonte de operação.

O trabalho de Eleutério, Rozan e Mosé (2014) focou no impacto das estratégias utilizadas para modelar e mapear o risco de inundações nas estimativas de danos. Consideraram-se diferentes estratégias para modelar o fenômeno de inundação, em função do tipo de modelo hidráulico utilizado - 1D, *software* híbrido 1D / 2D ou 2D, isto é, seleção do modelo; e, as simplificações feitas pelo modelador ao representar a topografia e a batimetria do sistema fluvial, ou seja, escolhas paramétricas. Com este propósito, foram percebidos diferentes modelos de perigo e estimativas de danos na cidade de Fislis, no leste da França. Os modelos hidráulicos HEC-RAS, Mike 21 e Mike Flood foram utilizados para medir a seleção dos

efeitos do modelo. Considerou-se uma escala de análise diferente (nível de detalhes) ao construir os diferentes cenários de modelagem - densidade de seções transversais e estruturas hidráulicas (modelos 1D), e a resolução celular de modelo de elevação digital (modelos 2D). Trinta e dois modelos foram usados para simular inundações com diferentes períodos de retorno. Os modelos 2D tendem a superestimar as superfícies de inundação e os modelos 1D tendem a superestimar as profundidades das águas da inundação. Os resultados dos testes de propagação de incerteza sobre estimativas de danos revelaram que a escolha da escala de análise foi o principal aspecto, influenciando a incerteza da avaliação. Essas escolhas paramétricas foram responsáveis por 75% da incerteza global, contra 18% para a seleção do modelo. Além disso, percebeu-se que o aumento da precisão da modelagem de perigo tem diferentes impactos nos mapas de inundações e estimativas de danos, de acordo com o tipo de modelo. Para modelos 1D, quanto mais detalhados os modelos (maior densidade de seções transversais), mais altos foram os resultados de estimativa de dano. Para modelos 2D, quanto mais precisos foram os modelos (pequenas grades), mais baixas foram as estimativas de danos. Os resultados das estimativas de dano foram fortemente influenciados por escolhas de modelagem hidráulica, portanto, a produção de mapas de inundações para esse propósito deve ser profundamente analisada.

Figueiredo e Blanco (2014) apresentaram em seu trabalho, através da utilização de modelo estocásticos do tipo ARIMA, uma análise de previsões de vazão e níveis de água médios mensais com antecedência de 24 meses. Tais dados são referentes à bacia do rio Tapajós, localizada no estado do Pará. A fim de definir o modelo ideal para a execução da análise, levou-se em consideração o coeficiente e função de autocorrelação (ACF) e o coeficiente de função e autocorrelação parcial (PACF). Um modelo ARIMA sazonal, representado por $ARIMA(p,d,q)(P,D,Q)S$, onde p , d e q são parâmetros não sazonais e P , D e Q são parâmetros sazonais auto regressivos, de integração e de média móvel, respectivamente, foi selecionado como o melhor para descrever a série possuidora de correlação serial nos períodos sazonalmente defasados. Este modelo apresentou melhor desempenho tanto para as séries de vazão quanto para as séries de níveis de água, nas fases de calibração e validação. Porém, notou-se que, em função da maior linearidade do comportamento temporal dos níveis de água, estes foram mais bem simulados que as vazões, o que pode ser explicado pela concepção linear dos modelos ARIMA.

Carrasco (2009), em seu artigo, fala sobre a importância da simulação, a qual é uma técnica de amostragem controlada, utilizada em conjunto com um modelo, com o objetivo de obter respostas aproximadas sobre problemas probabilísticos complicados. Ele analisou o método de Monte Carlo - geração de números aleatórios ou observações de uma variável aleatória uniforme - e, a partir dele, desenvolveu alguns algoritmos particulares para variáveis aleatórias não uniformes e, dada a importância, trabalhou com variáveis aleatórias com distribuição normal, logo, concentrou em algumas outras variáveis absolutamente contínuas e analisou algumas técnicas para variáveis aleatórias discretas. Notou-se que, em geral, realizar a programação das diferentes rotinas não é um processo de grande complexidade. As implementações foram sempre para a obtenção de um número determinado de observações independentes da variável aleatória em questão, pensando na construção da função de distribuição empírica da variável aleatória. Isso se torna mais importante quando não se entende completamente a distribuição das variáveis aleatórias envolvidas em um problema de estudo, sendo assim, a possibilidade de êxito da implementação seria ter uma boa aproximação ao problema através do modelo matemático que explica a dinâmica entre seus vários componentes.

Coser, Mendonça e Reis (2012), buscaram, por meio de simulações, avaliar o desempenho de técnica de otimização não-linear, utilizando o algoritmo de Powell na escolha dos reais modelos estocásticos e na estimativa de seus parâmetros. Optaram por utilizar os modelos PMIX, complexos e parcimoniosos, os quais, geralmente, são capazes de preservar características sazonais e anuais para séries históricas que apresentam baixas dependências anuais. Através das simulações de séries apresentando grande número de anos e posterior estimativa de parâmetros dos respectivos modelos, verificou-se que a rotina computacional de parâmetros com o algoritmo Powell é capaz de escolher adequadamente modelos utilizados na geração de séries sintéticas periódicas de vazões que consigam reproduzir parâmetros estatísticos (média, desvio padrão, autocorrelação mensal Lag1, autocorrelação mensal Lag2, autocorrelação mensal Lag12 e autocorrelação anual Lag1) das séries históricas originais. Concluiu-se que a adoção desses modelos e do processo de geração e estimativa de parâmetros desenvolvidos permitirá bons resultados no âmbito da definição de regras de operação e de estimativas de volumes úteis de reservatórios de regularização de vazões para grande número de rios com séries de descargas líquidas mensais apresentando altas dependências.

Franceschini e Tsai (2010) apresentam em seu artigo uma estrutura para quantificar a variabilidade geral das estimativas do modelo das concentrações de Bifenilos Policlorados Totais (PCBs totais) no rio Niagara, com base na incerteza de poucos parâmetros do modelo e na variabilidade natural incorporada em algumas das variáveis de entrada do modelo. Os resultados da análise de incerteza foram utilizados para entender a importância dos componentes do modelo estocástico e seu efeito sobre a confiabilidade geral da saída do modelo e para avaliar múltiplas fontes de incerteza que talvez precisem ser mais estudadas. A análise de incerteza foi feita utilizando o método de Rosenblueth modificado. A qualidade da água ao longo do rio Niagara foi simulada acoplando dois modelos numéricos, um para a parcela hidrodinâmica do estudo e outro para o destino e transporte de contaminantes. Para o período de monitoramento de maio de 1995 a março de 1997, a concentração de PCBs totais do Lago Erie foi o componente estocástico que mais influenciou a variabilidade dos resultados de modelagem para as concentrações simuladas na saída do rio Niagara. Outros componentes estocásticos significativos, em ordem, foram os seguintes: a concentração de sedimentos em suspensão, as cargas de fonte pontual e, em menor grau, a deposição atmosférica, o fluxo e as cargas de fontes não pontuais. Os resultados do modelo que incluem estimativas de incerteza forneceram informações mais abrangentes sobre a variabilidade das concentrações de contaminantes, como os intervalos de confiança e, em geral, ofereceram uma melhor abordagem para comparar os resultados do modelo com os dados medidos.

Wu e Shen (1999) apresentam técnicas de aproximação de primeira ordem para estimar os parâmetros estocásticos de um modelo de transporte de sedimentos. O modelo de Poisson, composto não homogêneo de Shen-Todorovic, eliminando certos pressupostos idealizados para descrever o movimento de sedimentos em fluxos naturais, é uma revisão do modelo homogêneo anterior de Einstein-Hubbell-Sayre. No entanto, a complexidade do modelo não homogêneo e a dificuldade em determinar os parâmetros do modelo limitaram sua aplicação. As técnicas de aproximação propostas empregaram as expansões de Taylor de primeira ordem, em relação a um ponto temporal ou espacial selecionado por uma diferença finita, da função de distribuição de probabilidade cumulativa (CDF) de deslocamentos de partículas. As expansões de primeira ordem foram divididas pelo CDF original para uma maior simplificação. As expansões avançadas e retrógradas foram resolvidas numericamente como um sistema para avaliar o parâmetro no ponto especificado. Os parâmetros não homogêneos foram obtidos com sucessivas aplicações deste procedimento em vários pontos.

Ge, Cheung e Kobayashi (2008) apresentaram uma abordagem estocástica para descrever incertezas de entrada e sua propagação através das equações de águas rasas não lineares. A formulação se baseou em um modelo de volume finito com um esquema de tipo Godunov para suas capacidades de captura de choque. Os polinômios ortogonais do esquema de Askey forneceram expansão das variáveis em termos de um número finito de modos, a partir dos quais os momentos médios e de ordem superior da distribuição podem ser derivados. A propriedade ortogonal dos polinômios permitiu o uso de uma projeção Galerkin para derivar equações separadas para os modos individuais. A implementação da expansão do caos polinomial e sua contrapartida não intrínseca determinaram as contribuições modais do sistema de equações resultante. Exemplos de transformação de ondas longas sobre uma corcova submersa ilustraram a abordagem estocástica com incertezas representadas pela distribuição Gaussiana. Além disso, resultados adicionais demonstraram a aplicabilidade da abordagem com outras distribuições. A solução estocástica concorda bem com os resultados do método de Monte Carlo, mas em uma pequena fração de seu custo computacional.

Furbish, Ball e Schmeeckle (2012) afirmaram que a alta velocidade de partículas de areia grossa transportadas em leitos de rios revela como os movimentos de partículas possuem periodicidades intrínsecas associadas ao comportamento de partida e de parada. Os harmônicos dominantes nestes movimentos tiveram uma influência primária sobre a taxa em que o deslocamento médio quadrático da partícula $R(t)$ – uma medida convencionalmente usada para avaliar a possibilidade de difusão anômala –, a qual aumenta com o intervalo de tempo t . Durante um período de tempo correspondente ao tempo de viagem típico das partículas, os cálculos de $R(t)$ podem indicar o comportamento não-Fickiano aparentemente, enquanto refletem os efeitos das periodicidades nos movimentos de partículas e não a difusão anômala. Foi fornecida a base teórica para este comportamento observado e ilustrou-se como a difusividade eficaz de partículas (Fickian) é obtida a partir da definição clássica de G. I. Taylor, envolvendo a autocovariância da velocidade da partícula e incluindo sua relação com a velocidade da partícula em conjunto como articulada por O. M. Phillips. As difusividades em cruzamento são uma ordem de magnitude menor que as difusividades de corrente.

Gomes e Caicedo (2011), além de fazerem uma revisão de literatura sobre técnicas utilizadas na geração de campos aleatórios de condutividade hidráulica, desenvolveram um estudo de um caso hipotético de simulação estocástica de fluxo e transporte de contaminantes em meio poroso saturado correspondente à área de um aquífero freático (livre). Para tanto,

utilizaram o método de simulação gaussiana sequencial (SGS) para a geração dos campos aleatórios de condutividade hidráulica com a finalidade de representar a incerteza e a variabilidade espacial deste parâmetro. A estrutura espacial da condutividade hidráulica é descrita por três modelos diferentes de variabilidade espacial: gaussiano, exponencial e esférico. Com o intuito de realizar o estudo do caso hipotético, avaliou-se a propagação de uma pluma de contaminação a partir de uma área contaminada por benzeno, considerando-se um horizonte de 30 anos. Os resultados obtidos mostraram uma maior dispersão da pluma para as simulações dos modelos gaussiano e exponencial, quando comparados às simulações do modelo esférico.

Moll, Schilperoort e De Leeuw (1987) avaliaram vários métodos estatísticos para analisar formas de leito de rios aluviais. Os modelos de séries temporais ofereceram possibilidades atrativas para quantificar as relações entre os formatos de leito e os parâmetros de fluxo e foram aplicados em dados de canal e protótipo. A análise direta das dimensões do leito resultou em diferentes escolhas para distribuições estatísticas de comprimento e altura da duna. Já a análise indireta, com base em premissas de estacionariedade e normalidade do processo estocástico subjacente, produziu dimensões médias de ondas, as quais se desviaram das expectativas teóricas. Além disso, modelos de séries temporais foram aplicados para descrever as séries de distância de elevação do leito. Em Moll (1985) foi indicado que o processo de ruído residual ainda continha informações sobre a posição das dunas. No entanto, De Leeuw (1985) obteve resultados razoáveis mediante a aplicação de um AR (2), modelo para série de elevação do leito usando o ruído branco Gaussiano como processo de condução. Espectros e propriedades derivadas do espectro da série de formas de leito e aqueles de acordo com o modelo AR (2) foram razoavelmente bem comparados. A representação das características de rugosidade pelo modelo de séries temporais foi investigada usando técnicas de simulação estocástica. Foi mostrado que o coeficiente de atrito adimensional e o coeficiente de rugosidade da série simulada se comparavam satisfatoriamente com as séries originais. Os autores concluíram que o comprimento da série e o método de pré-processamento de dados podem influenciar significativamente em todos os resultados de análise estatística; que os modelos AR (2) oferecem boas possibilidades para uma representação concisa da série de elevação do leito, conservando características de rugosidade; que o fenômeno de modulação de frequência não perturbou a modelagem de

séries temporais; e, que pode ser possível estabelecer uma relação (dinâmica) entre os parâmetros do modelo AR (2).

Wu e Chen (2009) utilizaram uma estrutura bayesiana que incorpora a cadeia de Markov Monte Carlo (MCMC) para atualizar os parâmetros de um modelo de arraste de sedimento. Foram feitos três estudos. Primeiro, as análises de sensibilidade foram realizadas via MCMC univariado e os resultados revelaram que as resultantes posteriores de MCMC, de duas e três séries, não foram significativamente diferentes; o MCMC de duas séries convergiu mais rápido que de três séries. O coeficiente de correlação da função de densidade de probabilidade (PDF) de Gram-Charlier (GC) é uma restrição física imposta ao MCMC, em que uma maior correlação retardaria a taxa de convergência. Os resultados, também, indicam que a incerteza dos parâmetros é reduzida com o aumento do número de dados de entrada. Segundo, o MCMC multivariado foi executado para atualizar simultaneamente o coeficiente de velocidade C e os momentos estatísticos do PDF do GC. Para fluxos totalmente ásperos, a distribuição de C foi significativamente modificada através de MCMC multivariado. No entanto, para os regimes de transição, os valores posteriores de C , resultantes de MCMC univariado e multivariado, não foram significativamente diferentes. Para os regimes ásperos e de transição, as diferenças entre as distribuições anterior e posterior dos momentos estatísticos foram limitadas. E terceiro, o efeito prático dos parâmetros atualizados na predição das probabilidades de arrastamento foi demonstrado. Com todos os parâmetros atualizados, o modelo de arraste do sedimento foi capaz de calcular de forma mais precisa e realista as probabilidades de arraste. O trabalho citado ofereceu uma abordagem alternativa para estimar os parâmetros hidráulicos que não são facilmente observados.

Oh e Tsai (2010) utilizaram um processo de difusão de salto estocástico (SJD) para descrever o movimento de partículas de sedimento em fluxos de canais abertos. O modelo de rastreamento de partículas de difusão de salto estocástico (SJD-PTM) é regido pela equação diferencial estocástica (SDE). O SJD-PTM proposto pode caracterizar as propriedades probabilísticas do movimento das partículas de sedimento, simulando a trajetória mais provável e as variâncias de conjunto do movimento das partículas associadas à turbulência do fluxo e às ocorrências aleatórias de perturbações de fluxo extremo. Para o movimento das partículas em resposta a ocorrências extremas de fluxo, introduziu-se o tempo de relaxamento de partículas (atraso temporal) para quantificar a resposta atrasada de partículas de sedimento a grandes perturbações de fluxo devido ao efeito de inércia das partículas. O tempo de

relaxamento das partículas é considerado um fator que diminui o impacto das perturbações do fluxo extremo. Mostrou-se que as partículas mais pesadas e maiores, normalmente, têm um maior tempo de relaxamento de partícula, uma diminuição da magnitude do salto de partículas e uma variância de conjunto menor de trajetórias de partículas nas ocorrências de perturbações de fluxo extremo. A capacidade de quantificar as variações do movimento das partículas de forma mais abrangente é uma das principais vantagens associadas ao SJD-PTM para modelagem e previsões de transporte de sedimentos em longo prazo.

Eleutério (2012) afirma que o conhecimento básico para apreender o risco de inundação diz respeito à frequência e intensidade das inundações, à exposição dos seres humanos e aos recursos às inundações, à sua sensibilidade à inundação e à sua susceptibilidade a sofrer danos. Sendo assim, o aspecto multidisciplinar do risco de inundação e a característica de multi-modelagem das avaliações de risco de inundação levam a uma organização metodológica complexa que envolve várias fontes de incerteza. Visando melhorar a compreensão global sobre as várias fontes de incerteza relacionadas à análise econômica dos riscos de inundação, concentrou-se em como as diferentes estratégias usadas para modelar riscos de inundação e avaliar a vulnerabilidade de um território podem afetar as estimativas de possíveis danos causados pelas inundações. Vários testes, com base em dois estudos de caso franceses, foram realizados. Mediu-se a variabilidade das estimativas de dano como uma função de diferentes considerações em conjuntos de dados, métodos e modelos utilizados para analisar diferentes parâmetros. Os resultados desses testes destacaram que o nível de incerteza epistêmica vinculado a essas avaliações é consideravelmente elevado. Além disso, foram usadas abordagens de modelagem paralela para quantificar o impacto relativo de diferentes fontes de incerteza sobre as possíveis estimativas de danos. Os resultados mostraram que a contribuição relativa dos diferentes módulos para a incerteza global depende de vários aspectos da avaliação, incluindo especificidades do local e a distribuição das probabilidades de inundação. Por fim, desenvolveu-se um método para analisar os potenciais de danos sistêmicos e disfunções da infraestrutura de redes em relação à resiliência de um território a inundações. Esta preocupação é considerada apenas nas avaliações de danos causados pelas inundações e representa uma importante fonte de incertezas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

Ao se acessar o banco de dados da ANA, constata-se que não há dados públicos disponíveis para a PCH Salto do Paraopeba. Os dados que possivelmente existam foram registrados a partir do ano 2000, quando ela passou a ser operada pela CEMIG. Ressalta-se que não se teve acesso aos dados que a CEMIG provavelmente tem.

Diante disso, para obtenção dos dados hidrossedimentológicos da PCH, foi realizado um inventário das estações hidrossedimentométricas situadas à montante, à jusante e no reservatório da PCH, a partir do banco de dados da ANA, o qual é encontrado no *website* HidroWeb.

Para isso, levantou-se todas as estações pertencentes ao rio Paraopeba com pelo menos uma campanha de medição simultânea de vazão e concentração de sedimentos em suspensão, avaliando-se a posição de cada uma delas, montante ou jusante, e as respectivas distâncias até a PCH Salto do Paraopeba. Ainda, filtrou-se aquelas cujas séries históricas dos parâmetros vazão afluente e dados sedimentológicos são publicamente acessíveis no referido *website*.

De posse das séries históricas supracitadas, analisou-se o período compreendido pelas medições dos seus dados e a presença ou não de falhas, de forma que estações com poucos dados registrados ou com muitos dados faltantes foram descartadas. Dessa maneira, foi possível reduzir a quatro o número de estações a serem analisadas, a saber: São Brás do Suaçuí à Jusante (40550002) e à Montante (40549998), Belo Vale (40710000) e Alberto Flores (40740000), sendo que as duas primeiras foram unidas, uma vez que seus períodos de medição são complementares e não se sobrepõem.

Definidas as estações com potencial para servir de apoio na obtenção dos dados hidrossedimentológicos da PCH Salto do Paraopeba, examinou-se a correlação entre elas, duas a duas, de modo a prosseguir os estudos com o par que apresentou maior coeficiente de determinação (R^2), sendo elas Belo Vale e Alberto Flores, como será apresentado no item Resultados. Ademais, ambas apresentam grande série histórica de dados confiáveis. É importante destacar que muitos autores nacionais, como Barbosa (2004), Santos *et al.*, (2015), Vieira *et al.* (2016), apresentam que o valor mínimo de R^2 deve ser 0,7, para que a equação de regressão explique de maneira satisfatória o comportamento dos dados da série.

Comentado [E1]: Vai mudar muita coisa ser 0,7 ou 0,9???

Com isso, fez-se uma análise preliminar das séries históricas de dados diários das duas estações, observando inconsistências e descontinuidades, de forma a preencher as falhas daquela mais próxima à PCH, Belo Vale, que dista aproximadamente 15,0 km da PCH. Ressalta-se que o preenchimento das falhas foi feito após se obter as séries de vazões mensais, conforme se detalha a seguir.

Nesse contexto, Moreira e Silva (2014) analisaram métodos para estimativa das vazões da bacia do rio Paraopeba, sendo que um dos métodos é o da proporcionalidade. Eles concluíram que na estimativa da vazão média de longa duração não foram observadas diferenças expressivas entre os métodos analisados.

Assim, para se determinar as vazões da PCH, devido à proximidade com Belo Vale, optou-se por fazer proporção das áreas de drenagem, conforme metodologia da Eletrobrás (1985), sendo que a área da PCH é 2.485,0 km² e de Belo Vale é 2.770,0 km². Eletrobrás (1985) ressalta que não se deve aplicar este método quando a relação entre a área de drenagem do posto fluviométrico em análise e a seção de interesse for superior a três, o que não ocorre nesse caso.

A série histórica de vazões diárias da estação de Belo Vale é compreendida entre 1965 a 2015. De posse dessa série, utilizando-se o programa estatístico R, o qual é de domínio público livre e apresenta código fonte aberto, podendo assim ser programado, gerou-se as séries de médias mensais. As falhas observadas na série histórica foram preenchidas usando o método da regressão linear, tomando a estação de Alberto Flores como apoio, sendo que essa estação está a, aproximadamente, 70,0 km de Belo Vale. Ela apresenta dados diários de vazões entre 1963 e 2017 e possui 4.120,0 km² de área de drenagem.

4.2 GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES

Diante das várias incertezas mencionadas no item Revisão de Literatura, considera-se a vazão afluente como um parâmetro estocástico ao se representar um sistema natural por meio de modelos matemáticos.

Assim, utilizou-se o modelo estocástico autorregressivo AR1 para gerar os valores de vazões, os quais poderão ser utilizados para simular o assoreamento que levou à interrupção da operação da PCH Salto do Paraopeba. Conforme previamente apresentado, o uso do modelo deve atender às premissas de estacionariedade e normalidade dos dados.

Por meio do *software* estatístico R, testou-se a estacionariedade a partir do teste não-paramétrico de *Spearman*, conforme recomendado em Naghettini e Pinto (2007) e previamente explicitado, ao nível de significância de 5%.

A estacionariedade dos dados foi testada também pelo teste de *Mann-Kendall*, por meio do *software* Trend, ao mesmo nível de significância utilizado no teste de *Spearman*.

Além disso, de posse da série de vazões médias anuais da PCH, no *software* supracitado, foi construído um histograma, o qual ajudou numa inspeção visual da distribuição de probabilidade, conforme se verifica no item Resultados.

Complementando tal análise de distribuição de probabilidade, aplicou-se Teste de Normalidade ou Teste de *Shapiro-Wilk*, ao nível de significância de 5%, para verificar se os dados testados são de uma população normalmente distribuída.

Conforme exposto anteriormente, o programa estatístico R é de domínio público e apresenta código fonte aberto, logo, para aplicar o Teste de Normalidade, utilizou-se uma de suas funções, a saber: *shapiro.test()*. Portanto, não houve necessidade de desenvolver um código para testar a normalidade dos dados de vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba.

No programa R, verificaram-se ainda as autocorrelações dos dados da série de vazões anuais e, a partir disso, construiu-se o correlograma dos dados. No caso de modelos AR, se a série for estacionária, o correlograma cai rapidamente para os limites de autocorrelação igual a zero.

Testadas tais premissas e de posse dos dados de vazão média, variância e autocorrelação referente ao atraso 1 (Lag 1) da série original, analisaram-se os valores médios das séries sintéticas destes mesmos parâmetros, podendo-se comparar e verificar se o modelo AR1 se ajustou bem aos dados de médias anuais.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 OBTENÇÃO DOS DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS

Conforme apresentado, por meio do banco de dados da ANA disponibilizado no portal HidroWeb, foi feito um inventário das estações hidrossedimentométricas pertencentes ao rio Paraopeba com pelo menos uma campanha de medição simultânea e analisou-se, para cada uma delas, se havia séries históricas de vazão afluente e de dados sedimentológicos disponíveis, a posição e a distância aproximada em relação à PCH Salto do Paraopeba. Assim, o grande número de estações do rio se reduziu às que são apresentadas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Inventário das estações do rio Paraopeba

Código	Nome	Município	Responsável	Posição em relação à PCH	Distância aproximada até a PCH (km)
40740000	Alberto Flores	Brumadinho	ANA	Jusante	70,0
40710000	Belo Vale	Belo Vale	ANA	Jusante	15,0
40700002	Jeceaba	Jeceaba	ANA	Jusante	5,0
40540000	Jurema	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	> 150 km
40720002	Melo Franco	Brumadinho	ANA	Jusante	95,0
40850000	Ponte da Taquara	Paraopeba	ANA	Jusante	> 150 km
40800001	Ponte Nova do Paraopeba	Juatuba	ANA	Jusante	> 150 km
40845000	Santa Cruz	Papagaios	ANA	Jusante	> 150 km
40550000	São Brás do Suaçuí	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	30,0
40550002	São Brás do Suaçuí Jusante	São Brás do Suaçuí	ANA	Jusante	29,0
40549998	São Brás do Suaçuí Montante	São Brás do Suaçuí	ANA	Montante	30,0
40718000	Toca	Brumadinho	ANA	Jusante	86,0

Dessa maneira, filtrou-se as estações com maior potencial para servir de apoio na obtenção dos dados da PCH, escolhendo-se preferencialmente estações mais próximas e que apresentaram séries históricas com maior número de dados. Assim, foram escolhidas: São Brás do Suaçuí à Jusante (40550002) e à Montante (40549998), Belo Vale (40710000) e Alberto Flores (40740000), conforme já mencionado previamente. Ressalta-se que, por não apresentarem superposição de dados e se complementarem, as estações de São Brás do Suaçuí foram unidas em uma só.

A seguir, para maior assertividade e confiabilidade na geração de séries sintéticas, correlacionou-se as estações supracitadas, duas a duas, a fim de se obter os respectivos coeficientes de determinação (R^2), que auxiliarão em um melhor ajustamento dos dados ao

modelo estocástico posteriormente escolhido. Para isso, foi utilizado o programa estatístico R para obter as séries de vazões mensais, as quais foram submetidas à análise e cujos resultados são mostrados na Tabela 5.2.

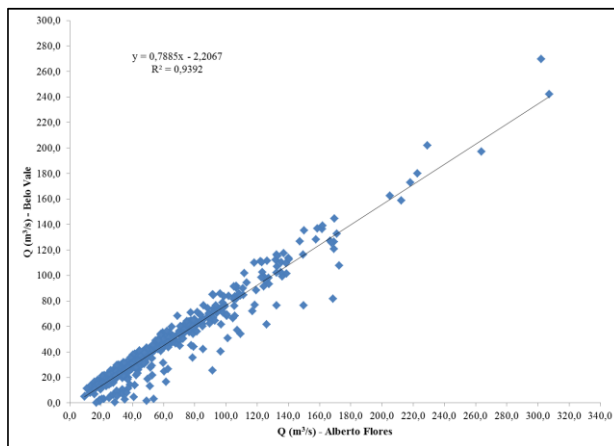
Tabela 5.2 – Correlação entre as estações analisadas

Estações correlacionadas	Coefficiente de determinação (R ²)
Alberto Flores com Belo Vale	0,9392
Alberto Flores com São Brás do Suaçuí à Jusante e à Montante	0,8409
Belo Vale com São Brás do Suaçuí à Jusante e à Montante	0,8634

Pela Tabela 5.2, conclui-se que o par de estações cujas séries históricas apresentam maior correlação entre os dados é Alberto Flores e Belo Vale, conforme se verifica na Figura 5.1. Assim, elas servirão de apoio na obtenção dos dados hidrossedimentológicos da PCH Salto do Paraopeba.

Após realizar uma análise preliminar dos dados e identificar algumas inconsistências e discontinuidades, optou-se por preencher as falhas da estação de Belo Vale com a de Alberto Flores como apoio, estando a primeira mais próxima da PCH. O preenchimento foi feito por meio de regressão linear, conforme equação apresentada na Figura 5.1, onde se tem o valor de, aproximadamente, 0,94 para o coeficiente de determinação (R²).

Figura 5.1 - Regressão linear entre as estações Alberto Flores e Belo Vale



Comentado [E2]: Cuidado com os dados acima de 200 m³/s. Talvez são dois comportamentos.

Após o preenchimento das falhas na série de vazões mensais, por proporção de áreas de drenagem entre Belo Vale (2.770,0 km²) e a PCH (2.485,0 km²), determinaram-se as vazões

mensais da PCH. Pelas áreas de drenagem, nota-se que a vazão da PCH é cerca de 90% da vazão de Belo Vale.

5.2 GERAÇÃO ESTOCÁSTICA DAS SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÕES

Antes de se utilizar o modelo estocástico AR1, testou-se as suas premissas, sendo uma delas é que a série de dados seja estacionária. Assim, a partir da série de vazões mensais da PCH, obteve-se a série de dados anuais, mostrada na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Série de vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba

Ano Hidrológico	Q _{anual} (m ³ /s)	Ano Hidrológico	Q _{anual} (m ³ /s)	Ano Hidrológico	Q _{anual} (m ³ /s)
1967 - 1968	37,29	1983 - 1984	45,47	1999 - 2000	35,50
1968 - 1969	29,08	1984 - 1985	61,11	2000 - 2001	26,52
1969 - 1970	33,26	1985 - 1986	41,27	2001 - 2002	33,68
1970 - 1971	19,77	1986 - 1987	42,07	2002 - 2003	35,42
1971 - 1972	44,29	1987 - 1988	37,70	2003 - 2004	43,75
1972 - 1973	47,27	1988 - 1989	33,15	2004 - 2005	48,21
1973 - 1974	40,37	1989 - 1990	30,66	2005 - 2006	33,27
1974 - 1975	33,15	1990 - 1991	55,75	2006 - 2007	32,25
1975 - 1976	29,22	1991 - 1992	58,45	2007 - 2008	35,19
1976 - 1977	45,67	1992 - 1993	57,93	2008 - 2009	58,05
1977 - 1978	40,31	1993 - 1994	41,75	2009 - 2010	26,75
1978 - 1979	65,51	1994 - 1995	39,41	2010 - 2011	21,40
1979 - 1980	53,53	1995 - 1996	43,81	2011 - 2012	44,70
1980 - 1981	46,16	1996 - 1997	56,82	2012 - 2013	23,50
1981 - 1982	58,80	1997 - 1998	27,21	2013 - 2014	9,66
1982 - 1983	76,04	1998 - 1999	31,66		

No programa R, ao aplicar o teste não-paramétrico de *Spearman* na série de vazões anuais, o parâmetro estatístico $|T|$ (indicado na Equação 4) obtido foi de 1,51, valor inferior ao de $z_{(1-\alpha/2)}$ a um nível de significância de 5%, 1,96. Dessa maneira, tem-se que a série é estacionária (rejeitou-se a hipótese nula H_0 : não existe tendência temporal), atendendo, assim, a um dos requisitos do modelo AR1.

O teste de *Mann-Kendall* também foi aplicado ao nível de significância de 5%, de maneira a ratificar o resultado do teste de *Spearman*. Conforme era esperado, rejeitou-se a hipótese nula H_0 de que as observações da série são independentes e identicamente distribuídas, ou seja, de que não há tendência. Isso se ratifica ao observar que o valor do parâmetro estatístico $|Z|$ (conforme Equação 7) foi de 1,66, inferior ao valor de 1,96 referente ao parâmetro $Z_{\alpha/2}$ para α igual a 5%. O resultado demonstrado no *software* Trend indicou que, além de existir tendência nos dados de vazão, esta é decrescente.

Utilizando-se novamente o R, fez-se o histograma (Figura 5.2) da série anual de vazões para verificar a tendência dos dados. A média é 40,68 m³/s, a mediana é 40,31 m³/s e o desvio padrão é 13,15 m³/s. Nota-se uma pequena assimetria nos dados, com maior ocorrência de valores no lado direito do bloco de maior frequência.

Complementando a análise visual do histograma da Figura 5.2, aplicou-se o Teste de *Shapiro-Wilk*, também pelo programa R. O valor do parâmetro estatístico W (indicado na Equação 8) mensurado foi de 0,982, maior do que o W_{α} para α igual a 5%, 0,946. Portanto, não se rejeita a hipótese nula H_0 de que a amostra provém de uma população Normal, ou seja, os resultados aferidos pelo teste indicaram a existência de evidências que comprovam a normalidade na distribuição dos dados testados.

Para se verificar as autocorrelações dos dados de vazões anuais, fez-se o seu correlograma, o qual está apresentado na Figura 5.3. O resultado obtido para as autocorrelações apresenta uma autocorrelação (ACF) significativa de, aproximadamente, 0,35 para o atraso 1 (Lag 1), sendo essa a única correlação significativa. No caso de modelos AR, se a série for estacionária, o correlograma cai rapidamente para os limites de autocorrelação igual a zero, como está acontecendo.

Figura 5.2 - Histograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2014)

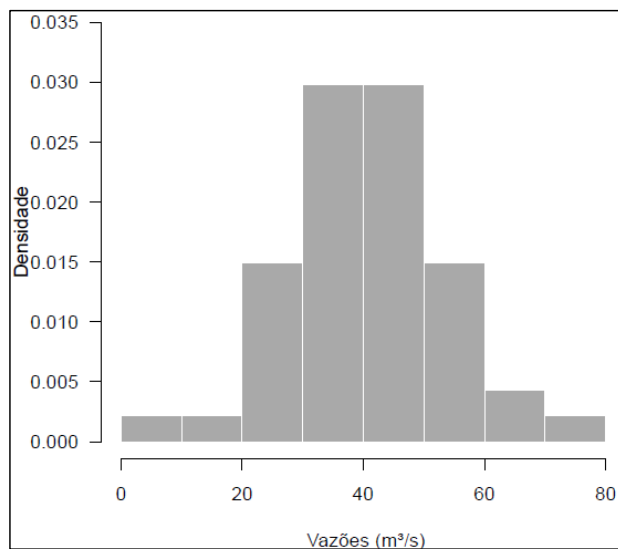
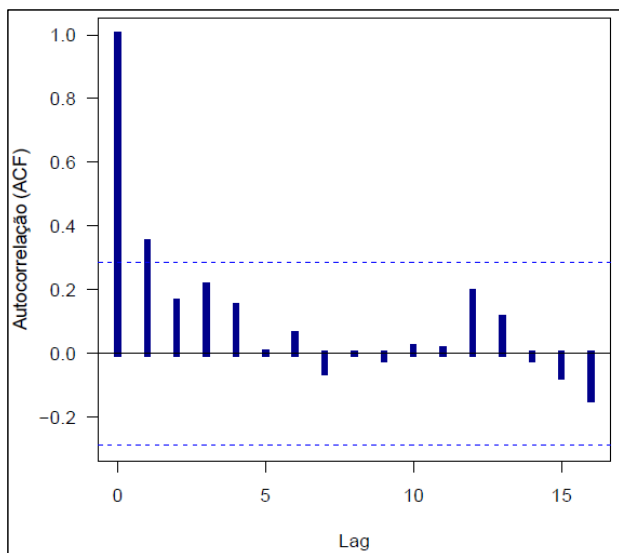


Figura 5.3 - Correlograma das vazões anuais da PCH Salto do Paraopeba (1967 a 2014)



Atendidas as premissas de estacionariedade e normalidade para utilização do modelo estocástico autorregressivo AR1, gerou-se 1.000 (mil) séries sintéticas de vazões anuais da PCH seguindo o processo explicitado pela Equação 4, a qual garante, por meio do seu parâmetro aleatório, que todas elas sejam diferentes.

Para isso, foi necessário desenvolver um código na plataforma do *software* R, o qual recebe a série anual de vazões, aplica os testes de estacionariedade e de normalidade e, caso as premissas sejam validadas, gera as séries sintéticas de vazões em um arquivo externo ao programa. O código encontra-se no Apêndice A.

De posse das 1.000 séries sintéticas geradas, analisou-se suas principais características estatísticas de maneira a compará-las às da série original. Os resultados são dados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Principais parâmetros estatísticos da série original e das séries sintéticas

Parâmetro	Série original da PCH	Séries sintéticas	Varição (%)
Vazão [m ³ /s]	40,676	40,670	-0,02%
Variância [(m ³ /s) ²]	172,819	168,549	-2,53%
Autocorrelação	0,349	0,298	-17,14%

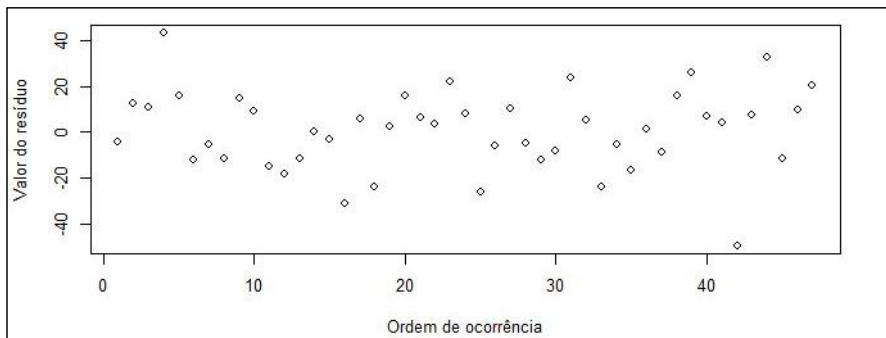
Conforme se verifica na Tabela 5.4, houve pequena variação nos parâmetros vazão e variância, o que sugere que a média dos dados gerados em relação a cada item analisado pode ser considerada constante. A variação da autocorrelação, entretanto, foi maior, o que se deve à parcela aleatória do modelo AR1. Porém, a autocorrelação de 0,298 das séries sintéticas continua sendo significativa, uma vez que ainda encontra-se acima do limite de 0,286.

Foram analisados também os resíduos das 1.000 séries sintéticas, especificamente a média, a autocorrelação e a dispersão dos dados. Os resultados são mostrados na Tabela 5.5 e na Figura 5.4.

Tabela 5.5 - Principais parâmetros estatísticos dos resíduos das séries sintéticas

Parâmetro	Resíduos das séries sintéticas
Vazão [m³/s]	-0,006
Autocorrelação	0,319

Figura 5.4 - Resíduos distribuídos ao longo dos anos (1967 a 2014)



Os resíduos de vazão das séries sintéticas, com valor médio quase nulo, indicam que os dados se ajustam bem ao modelo AR1, de acordo com Chatfield (2000), desconsiderando-se a dimensão dos seus valores. Entretanto, a autocorrelação média dos resíduos, com valor próximo ao da série original, não indicou a independência dos dados. Ademais, os resíduos se dispersaram bastante ao longo do período representado pelos dados das séries sintéticas, 1967 a 2014, conforme se verifica na Figura 5.4.

6 CONCLUSÕES

Comentado [E3]: Nível de significância?

A estimativa do assoreamento em reservatórios de hidrelétricas não pode ser admitida como apenas um processo determinístico, mas também estocástico, visto algum grau de incerteza inerente às variáveis aleatórias utilizadas na estimativa, como a vazão. Por isso, avaliou-se a utilização do modelo autorregressivo AR(1) para geração de séries sintéticas de vazões. Para isso, observou-se que:

- A estação mais próxima à PCH Salto do Paraopeba que possui dados hidrossedimentológicos é a de Belo Vale, sendo que suas falhas na série de vazões mensais foram preenchidas utilizando-se a estação de Alberto Flores como apoio;
- Fazendo-se proporção entre as áreas drenagens, construiu-se a série de vazões anuais da PCH, sendo verificada que essa série é estacionária, segue distribuição normal e possui autocorrelação significativa para o atraso 1 (Lag1);
- A partir da série anual de vazões da PCH, gerou-se 1.000 séries sintéticas de vazões utilizando-se o modelo estocástico AR1, sendo que suas estatísticas (média, variância e autocorrelação) são próximas da série original, indicando, assim, que o modelo estocástico se **ajustou bem** aos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAM, N.; ERPICUM, S.; ARCHAMBEAU, P.; PIROTON, M.; DEWALS, B. *Stochastic Modelling of Reservoir Sedimentation in a Semi-Arid Watershed*, Springer Science+Business Media B. V., 2014.

BIALIK, R. J. *Numerical study of saltation of non-uniform grains*. Journal of Hydraulic Research, 2011, 49:5, 697-701, DOI: 10.1080/00221686.2011.598025

CÂMARA, R. K. C.; ROCHA, E. J. P.; PROTÁZIO, J. M. B.; QUEIROZ, J. C.; RIBEIRO, W. M. N.; SIQUEIRA, I. S.; LIMA, A. M. M. *Modelagem hidrológica estocástica aplicada ao rio Tocantins para a cidade de Marabá-PA*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, n. 1, p. 11-23, 2016.

CARNEIRO, T. C.; FARIAS C. A. S. *Otimização Estocástica Implícita e Redes Neurais Artificiais para Auxílio na Operação Mensal dos Reservatórios Coremas - Mãe d'Água*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 n.4 - Out/Dez 2013,115-124.

CARRASCO, H. *Simulación, algunos métodos y aplicaciones*, 2009.

CIRILLO, M. A. E D. F. FERREIRA. *Extensão do Teste para Normalidade Univariado Baseado no Coeficiente de Correlação Quantil para o Caso Multivariado*. Revista de Matemática e Estatística, v. 21, n. 3, p. 67–84. São Paulo, 2003.

CHATFIELD, C. *Time-series forecasting*. Chapman &C Hall/CRC. Estados Unidos da América, 2000.

COSER, M. C.; MENDONÇA, A. S. F.; REIS J. A. T. *Avaliação do Desempenho de Modelos Estocásticos Parâmetros Multiplicativos na Geração de Séries Fluviométricas Mensais para Dimensionamento de Reservatórios de Regularização de Vazões*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 18 n.1 - Jan/Mar 2013,249-262.

COSTA, F.S.; DAMÁZIO, J. M.; RAUPP, I. P. *Modelo de simulação estocástica para operação de controle de cheias em sistemas hidroelétricos* – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

ELEUTÉRIO, J. *Flood risk analysis: impact of uncertainty in hazard modelling and vulnerability assessments on damage estimations*. Université de Strasbourg, 2012.

ELEUTÉRIO, J.; ROZAN, A.; MOSÉ, R. *Propagation of hydraulic modelling uncertainty on damage estimates*, 2014.

ESTIGONI, M. V. *Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu – SP*. 2016. 239 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2016.

FARIAS, J. A. M. *Métodos de geração de vazões mensais e suas influências sobre a curva de garantia versus vazão regularizada em reservatórios do estado do Ceará*. 2003. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2013.

FIELD, A. *Discovering statistics using SPSS*. SAGE Publications, 3ª ed. Los Angeles, LA, 2009.

FIGUEIREDO, N.M.; BLANCO C. J. C. *Simulação de Vazões e Níveis de Água Médios Mensais para o Rio Tapajós Usando Modelos ARIMA*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 19 n.3 - Jul/Set 2014,111-126.

FRANCESCHINI, S.; TSAI, C.W. *Assessment of uncertainty sources in water quality modeling in the Niagara River*. Advances in Water Resources, v. 33, p.493-503, 2010.

FREITAS, M. A. S. *Geração de vazão em rios de regiões semi-áridas*, 2001.

FURBISH, D. J.; BALL, A. E.; SCHMEECKLE, M. W. *A probabilistic description of the bed load sediment flux: Fickian diffusion at low transport rates*. Journal of Geophysical Research, vol. 117, f03034, DOI:10.1029/2012jf002356, 2012.

GE, L.; CHEUNG, K.F.; KOBAYASHI, M.H. *Stochastic Solution for Uncertainty Propagation in Nonlinear Shallow-Water Equations*. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, DOI:10.1061/ASCE07339429, 134:12, 1732.

GOMES, J.; CAICEDO N. O. L. *Uso do Método de Simulação Gaussiana Sequencial (SGS) na Simulação Estocástica do Fluxo e Transporte em Meio Poroso Saturado*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 16 n.4 - Out/Dez 2011, 135-147.

HIPEL, K. W., McLEOD, A. D. *Times series modelling of water resources and environmental systems*, Developments in water Science, v. 45, ed, Elsevier, 1994, 1010p.

KELMAN, J. *Modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel/ABRH. 1987.

KENDALL, M. G. *Rank correlation methods*, 2ª ed, New York: Hafner, 1970.

KOENIGSDORF, M. A. L. *Avaliação de Projetos de Exploração e Produção de Petróleo via Opções Reais: Abordagem por Mínimos Quadrados de Monte Carlo*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontfícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

LEOTTI, V. B; A. R. BIRCK E J. RIBOLDI. *Comparação dos Testes de Aderência à Normalidade Kolmogorov-smirnov, AndersonDarling, Cramer-Von Mises e Shapiro-Wilk por Simulação*. 11º Simpósio de Estatística Aplicada à Experimentação Agronômica e a 50ª Reunião Anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria (RBRAS). Anais. Londrina, 2005.

LÚCIO, P. S.; SILVA, F. D. S.; GUIMARÃES, L. T. F.; SANTOS, L. A. R.; FERREIRA, D. B.; SALVADOR, M. A.; BALBINO, H. T.; SARMANHO, G. F.; SANTOS, L. S. F. C.; LUCAS, E. M. W.; BARBOSA, T. F.; DIAS, P. L. S. *Um Modelo Estocástico Combinado de Previsão Sazonal para a Precipitação no Brasil*. Revista Brasileira de Meteorologia, v.25, n.1, p.70-87. São Paulo, 2010.

MANN, H. B. *Nonparametric tests against trend*. Econometrica, v 13, 1945.

MOLL, J. R.; SCHIELPEROOT, T.; LEEUW, A. J. *Stochastic analysis of bedform dimensions*. Journal of Hydraulic Research, 1987, 25:4, 465-479, DOI:10.1080/00221688709499263.

MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. M. *Análise de Séries Temporais*. São Paulo: Edgard Blucher, 2006, 564 p.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Básica*. CPRM. Belo Horizonte, 2007.

OH, J.; TSAI, C. W. *A stochastic jump diffusion particle-tracking model (SJD-PTM) for sediment transport in open channel flows*. Water Resources Research, 2010, Vol. 46, W10508, DOI:10.1029/2009WR008443.

OH, J.; TSAI, C. W.; CHOI, S. *Quantifying the Uncertainty Associated with Estimating Sediment Concentrations in Open Channel Flows Using the Stochastic Particle Tracking Method*. Journal Hydraulic Engineering, 2015.

ÖZTUNA, D.; A. H. ELHAN; E. TÜCCAR. *Investigation of Four Different Normality Tests in Terms of Type I Error Rate and Power under Different Distributions*. Journal of Medicine Cincinnati. v. 36, n. 3, p. 171–176, 2006.

PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T. *Medições de vazão*. In: PINTO, N.L.S.; HOLTZ, A.C.T.; MARTINS, J.A.; GOMIDE, F.L.S. *Hidrologia básica*. 1ª ed. Rio de Janeiro, 1976. cap 10, p. 182.

PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; KOETZ, M. *Estudo da vazão em cursos d'água*. Viçosa: UFV, 2006. (Caderno didático).

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. *An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika. Oxford, UK, 1965.

TEIXEIRA, E. K. C.; REIS, E. D.; HERMENEGILDO, D. H. L.; FERNANDES, M. A. *Influência de Dados Faltantes na Determinação de Vazões Mínimas de Estiagem*. XXVII Congresso Latinoamericano de Hidráulica. Peru, 2016.

TUCCI, C.E.M. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1997.

VALE, V. L. *Reconstituição da calha natural do reservatório da PCH Salto do Paraopeba*. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

WERNER, L.; RIBEIRO, J. L. D. *Previsão de Demanda: uma aplicação dos modelos Boxjenkins na área de assistência técnica de computadores pessoais*. Revista Gestão & Produção v.10, n.1, p.47-67. São Paulo, 2003.

WU, F.; CHEN, C. C. *Bayesian Updating of Parameters for a Sediment Entrainment Model via Markov Chain Monte Carlo*. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, DOI:10.1061/ASCE0733-9429, 135:1, 22.

WU, F.; SHEN, H. W. *First-order estimation of stochastic parameters of a sediment transport model*. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37:2, 213-227, DOI:10.1080/00221689909498307.

APÊNDICE A

```
#o usuário deverá chamar a função QSN
#o parâmetro “vazoes” é a série original, imputada previamente
#o parâmetro “Nseries” é o número de séries sintéticas que o usuário deseja gerar
QSN<-function(vazoes,Nseries)
{

Qsinteticamatriz<-matrix(nrow=length(vazoes),ncol=Nseries)
Qsinteticamedia<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
Qsinteticavariancia<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
QsinteticaACF<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
QsinteticaACFresiduos<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)
Qsinteticamediaresiduos<-matrix(nrow=1,ncol=Nseries)

for (contador in 1:Nseries)
{

medannual<-vazoes
N<-length(medannual)

#prepara os dados imputados para a aplicação dos testes
dados<-matrix(nrow=N,ncol=3)
  for (i in 1:N)
  {
    dados[i,1]<-i
    dados[i,2]<-medannual[i]
  }

matriz1<-order(dados[,2])

dados1<-matrix(nrow=N,ncol=3)
  for (i in 1:N)
  {
    dados1[i,1]<-dados[matriz1[i],1]
    dados1[i,2]<-dados[matriz1[i],2]
    dados1[i,3]<-i
  }

matriz2<-order(dados1[,1])
  for (i in 1:N)
  {
    dados[i,1]<-dados1[matriz2[i],1]
    dados[i,2]<-dados1[matriz2[i],2]
    dados[i,3]<-dados1[matriz2[i],3]
  }

}
```



```

#inicia o teste de estacionariedade
soma<-0
for (i in 1:N)
{
  soma<-soma+(((dados[i,3])-(dados[i,1]))**2)
}

rs<-(1-((6*soma)/((N**3)-N)))
E.rs<-0
Var.rs<-((1)/(N-1))
T<-((rs)/(sqrt(Var.rs)))
alfa<-0.05
z <- qnorm(1-alfa/2,0,1)

if (N<10)
{
  print("ATENCAO! Os dados disponiveis nao sao suficientes para realizar um
teste de estacionariedade confiavel (N<10).")
}

else
{
  if (abs(T)>z)
  {

    N<-length(vazoes)
    ACF<-c(acf(vazoes))
    ACFLAG1<-c(ACF$acf)

  }
  else
  {

#sendo a série imputada estacionária, gera-se quantas sintéticas de vazões o usuário pedir
N<-length(vazoes)

    ACF<-c(acf(vazoes))
    ACFLAG1<-c(ACF$acf)

    N<-length(vazoes);
    aleat2<-rnorm(N+10,0,1)
    M<-mean(vazoes)
    dp<-sd(vazoes)
    Var<-var(QAH)

    matrizintetica<-matrix(nrow=N+10,ncol=1)
    Qdado1<-matrix(M)
  }
}

```

```

Qdado2<-M+ACFLAG1[2]*(M-M)+aleat2[1]*dp*((1-
ACFLAG1[2]**2)**0.5)
      Qdados1e2<-matrix(nrow=2,ncol=1)
      Qdados1e2[1,1]<-Qdado1
      Qdados1e2[2,1]<-Qdado2
      Qdados123<-rbind(Qdados1e2,M+ACFLAG1[2]*(Qdados1e2[2]-
M)+aleat2[2]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
      Qproxdado<-rbind(Qdados123,M+ACFLAG1[2]*(Qdados123[3]-M)+
aleat2[3]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
      for (k in 4:(N+9))
      {
      Qproxdado<-rbind(Qproxdado,M+ACFLAG1[2]*(Qproxdado[k]-M)+
aleat2[k]*dp*((1-ACFLAG1[2]**2)**0.5))
      }
Qsintetica<-Qproxdado[11:(N+10)]

#atribui todas as séries geradas a uma matriz, cada série em uma coluna
for (i in 1:N)
{
Qsinteticamatriz[i,contador]<-Qsintetica[i]
}

#atribui a média de cada série a uma matriz, cada coluna com uma média
Qsinteticamedia[1,contador]<-mean(Qsintetica)

#atribui a variância de cada série a uma matriz, cada coluna com uma variância
Qsinteticavariancia[1,contador]<-var(Qsintetica)

NQsintetica<-length(Qsintetica);
ACFQsintetica<-c(acf(Qsintetica))
ACFLAG1Qsintetica<-c(ACFQsintetica$acf)

#atribui a autocorrelação média de cada série a uma matriz, cada coluna com um dado
QsinteticaACF[1,contador]<-ACFLAG1Qsintetica[2]

#incia-se a geração da série de resíduos
residuos<-(Qsintetica-QAH)
Nresiduos<-length(residuos);
ACFresiduos<-c(acf(residuos))
ACFLAG1residuos<-c(ACFresiduos$acf)

QsinteticaACFresiduos[1,contador]<-ACFLAG1residuos[2]
Qsinteticamediaresiduos[1,contador]<-mean(residuos)

}
}
}

```

```

}

#apresenta os resultados das séries sintéticas geradas e dos seus resíduos
print("Vazao media; desvio percentual (%) em relacao a media da serie original QAH")
print(mean(Qsinteticamedia))
print((((mean(Qsinteticamedia)-M)/M)*100))

print("Variancia media; desvio percentual (%) em relacao a variancia da serie original QAH")
print(mean(Qsinteticavariancia))
print((((mean(Qsinteticavariancia)-Var)/Var)*100))

print("ACF para Lag 1 medio das series sinteticas")
print(mean(QsinteticaACF))

print("Media geral de residuos")
print(mean(Qsinteticamediaresiduos))

print("Media geral de ACF para Lag 1 dos residuos")
print(mean(QsinteticaACFresiduos))

par(mfrow=c(2,2))
#acf(residuos,main="Correlograma dos resíduos da série sintética\nAno hidrológico: outubro
a setembro",xlab="Lag",ylab="Autocorrelação (ACF)")
plot(residuos, main="Resíduos distribuídos ao longo dos anos",xlab="Ordem de
ocorrência",ylab="Valor do resíduo")

#exporta as séries e os resultados para arquivos do Excel
write.csv2(Qsinteticamatriz,"Qsinteticamatriz.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticamedia,"Qsinteticamedia.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticavariancia,"Qsinteticavariancia.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(QsinteticaACF,"QsinteticaACF.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(Qsinteticamediaresiduos,"Qsinteticamediaresiduos.csv",row.names=FALSE)
write.csv2(QsinteticaACFresiduos,"QsinteticaACFresiduos.csv",row.names=FALSE)

for (j in 1:Nseries)
{
  mat<-Qsinteticamatriz[,j]
  form<-sprintf('Qsintetica %s.csv',j)
  write.csv2(mat,file=form,row.names=FALSE)
}
}

```