

RECURSOS HÍDRICOS E AS INCERTEZAS CIENTÍFICAS: NOVOS CONCEITOS E ABORDAGENS

Ticiania M. Carvalho Studart¹, José Nilson B. Campos¹ e Ricardo Marinho de Carvalho²

Resumo. O objetivo do presente trabalho é o estudo das incertezas existentes na área de recursos hídricos. Primeiramente as fontes de incertezas são identificadas e as incertezas, propriamente ditas, classificadas segundo as mais variadas metodologias. Não se tem a pretensão de apresentar um levantamento exaustivo de toda a literatura existente na área, uma vez que o estudo das incertezas, nos mais variados campos da ciência, têm recebido crescente atenção na última década, resultando em inúmeras publicações sobre o assunto em todo o mundo. Procura-se, na verdade, apresentar o estudo das incertezas de uma maneira clara e didática, indo do geral ao específico, na tentativa de sintetizar o estado-da-arte das incertezas em recursos hídricos .e, mais especificamente, na avaliação das disponibilidades hídricas de um reservatório.

Abstract. The present paper intends to study the uncertainties embodied in Water Resources field. The sources of uncertainty are identified and uncertainty, itself, is classified according to different methodologies. There is not a intention to present a comprehensive list of the existent literature, once the study of uncertainties, in the most varied fields, have been receiving growing attention in the last decade. Enormous quantity of books and papers are being written about this subject all over the world. The main objective is to present the study of the uncertainties in a clear and didactic way, starting from the general and coming to the specific, in the attempt of synthesizing the state-of-art of uncertainties in Water Resources field, and more specifically, in the evaluations of the a reservoir's water availability.

Palavras-Chave. Incertezas, Análise de Risco, Recursos Hídricos

INTRODUÇÃO

O objetivo principal da gestão dos recursos hídricos é satisfazer a demanda, considerando as possibilidades e limitações da oferta de água. Embora configurem exceções, existem situações na engenharia de recursos hídricos as quais podem ser consideradas como não-probabilísticas. Nestes casos, uma vez que as incertezas envolvidas são muito pequenas, a abordagem determinística,

¹ Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 713, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.451-970, Fone: (085) 288.9623, Fax: (085) e-mails: ticiania@ufc.br e nilson@ufc.br

² Professor do Departamento de Eng^a de Construção Civil da Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl.710, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.451-970, Fone: (085)288.9606, ricardomarinho@mcnet.com.br

relacionando oferta à demanda, é suficiente. Este é o caso, por exemplo, de um reservatório operado por comportas, no qual existe uma relação determinística entre a vazão liberada e o nível de água no reservatório. No caso particular citado, não há qualquer motivação para utilização de técnicas de análise de risco, uma vez que os resultados são perfeitamente previsíveis (GANOULIS, 1994).

Entretanto, quando o sistema hídrico é alimentado por influxos espacial e temporalmente variáveis, as incertezas presentes na avaliação dos futuros níveis da água resultam em volumes liberados os quais não mais podem ser considerados determinísticos. Nestes casos, as incertezas têm um importante papel na gestão dos recursos hídricos e a técnica apropriada para lidar com o problema se constitui na Análise de Risco.

AS INCERTEZAS E A ANÁLISE DE RISCO

Segundo Vieira (1997) a **análise de risco** compreende duas etapas seqüenciadas:

- A qualificação ou identificação dos riscos - esta fase diz respeito ao levantamento das incertezas existentes, dos riscos associados, suas causas e formas de ocorrência.
- A quantificação ou avaliação dos riscos – esta fase materializa em números as probabilidades ou possibilidades de ocorrência de eventos indesejáveis ou falhas de projetos, bem como quantifica, sempre que necessário e exequível, as conseqüências destes eventos.

O **gerenciamento dos riscos**, por sua vez, diz respeito ao comportamento dos tomadores de decisão, através da análise sistêmica, seleção de alternativas, e minimização dos riscos envolvidos.

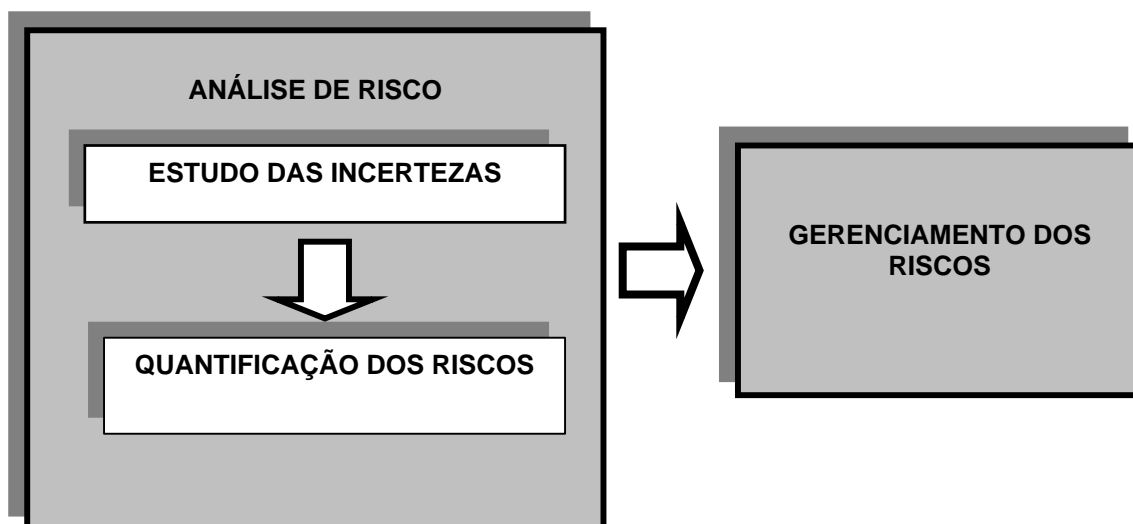


Figura 1. Estudo das incertezas e quantificação dos riscos como elementos da Análise de Risco e etapas precedentes ao Gerenciamento dos Riscos (Fonte: Studart, 2000)

Assim sendo, embora o objetivo principal da análise de risco seja o gerenciamento do sistema hídrico, isto não será possível caso as incertezas não tenham sido identificadas e os riscos quantificados *a priori* (Figura 1). No que diz respeito à análise das incertezas, são duas as

metodologias mais citadas na literatura: a de abordagem probabilística e a fundamentada na teoria dos conjuntos difusos.

O ESTUDO DAS INCERTEZAS

O mundo está repleto de incertezas. As incertezas podem advir de uma informação incompleta ou de discordâncias entre diferentes fontes da informação. Podem advir de uma imprecisão lingüística, ou podem se referir a uma variabilidade natural. Mesmo diante de uma informação completa, as incertezas podem estar presentes devido a simplificações ou aproximações para tornar os modelos mais tratáveis matematicamente. As incertezas podem ser acerca do que se gosta, sobre que atitude tomar, sobre o que irá acontecer... Pode-se estar incerto até do grau da própria incerteza.

Apesar de tudo, aprendeu-se, inconscientemente, a conviver com as incertezas do dia-a-dia, desenvolvendo diferentes critérios e preferências para definir regras de decisões sob sua presença, tais como ouvir previsões de tempo, escolher entre viajar de carro ou avião, ou escolher um dado caminho para o trabalho.

Obviamente, as incertezas não se limitam a atuar na vida privada de cada um. Elas estão presentes nas pequenas e grandes decisões, nas situações individuais e nas que envolvem a coletividade. Entretanto, continuou-se lidando com elas, anos a fio, de forma amadorística.

Segundo Bernstein (1997), somente há poucas décadas se começou a ter, em termos mundiais, um interesse em se entender, quantificar e administrar as mais variadas situações de risco, convertendo o futuro incerto - de ameaça - em oportunidade. O autor traduz muito bem esta transição, ao afirmar que *“a idéia revolucionária que define a fronteira entre os tempos modernos e o passado é o domínio do risco: a noção de que o futuro é mais do que um capricho dos deuses e de que homens e mulheres não são passíveis ante a natureza. Até os seres humanos descobrirem como transpor esta fronteira, o futuro era um espelho do passado ou o domínio obscuro de oráculos e adivinhos que detinham o monopólio sobre o conhecimento.”*

Como bem adverte Arrow (1992), *“o nosso conhecimento do funcionamento das coisas, na sociedade ou na natureza, vem a reboque de nuvens de imprecisões. Grandes males têm se seguido a uma crença de certeza”*, o que significa que, a administração do risco deverá obrigatoriamente ser precedida pela identificação e o estudo aprofundado das incertezas inerentes ao processo em enfoque. É, sobretudo, a valorização de se reconhecer a vastidão do seu desconhecimento.

Como bem avalia Ermoliev (1993), a incerteza é uma característica inerente a qualquer estudo voltado para o futuro e a tendência na tomada de decisão sob a incerteza é adiar a decisão até que as incertezas sejam dissipadas, o que obviamente, nem sempre é possível.

Segundo Canter (1996) são quatro as atitudes que se pode tomar em um cenário de incertezas: ignorar-las completamente (uma atitude pouco prudente a se tomar); tentar evitá-las, através de medidas mitigadoras (o que reduz os impactos negativos de eventos incertos, mas não elimina a fonte dos riscos); tentar reduzi-las através de aprofundamento da pesquisa, coleta de mais dados e informações durante a fase de planejamento (algumas incertezas são reduzidas, outras não podem ser eliminadas) e, finalmente, incorporar os riscos e incertezas ao processo de planejamento.

Definição de Incerteza

Incerteza é um termo difícil de definir, englobando múltiplas conceituações. A variedade de fontes de incertezas gera, sem dúvida, sérias confusões. Vários são os significados atribuídos aos verbetes “*incerteza*” e “*incerto*” nos vários dicionários da língua portuguesa. O dicionário Aurélio mostra vários significados para a palavra “*incerto*”: *não certo, indeterminado, impreciso, duvidoso, aleatório, ambíguo, vago, inconstante e variável*. O substantivo “*incerteza*” deriva dos conceitos acima descritos e pode ser sintetizado como “*o estado (ou qualidade) de estar incerto*”.

Como bem avalia Kundzewicz (1995), não existe consenso acerca do que significa realmente o termo “*incerteza*”, o qual vem agregando em torno de si os mais variados significados e conotações, em função da formação daquele que o conceitua, os quais muitas vezes não são consistentes com seu significado coloquial.

No presente trabalho adota-se o conceito de “*incerteza*” proposto por Vieira (1997), o qual afirma que, no sentido mais amplo, “*as incertezas são as fontes geradoras dos riscos*”.

Tipos de Incertezas

É importante distinguir claramente os diferentes tipos e fontes de incertezas, uma vez que os mesmos necessitam ser tratados de diferentes formas.

Vários autores na literatura têm analisado diferentes tipos de incerteza e feito várias distinções, tais como objetivas e subjetivas, primárias e secundárias, naturais e tecnológicas. As mais variadas classificações de tipos de incertezas podem ser encontradas em Morgan & Henrion (1993).

Segundo Kundzewicz (1995), os hidrólogos, de uma maneira geral, afirmam que já dominam as incertezas há muito tempo. E pondera que esta afirmação pode ser considerada verdadeira no sentido de reconhecer que os mesmos sempre foram obrigados a conviver com as incertezas e, por conseguinte,, desenvolveram ferramentas para lidar com elas. A determinação da cheia máxima de T_r anos é um exemplo. Mas pergunta: quão incertos são estes números? Ou ainda, fazendo um trocadilho: são confiáveis as estimativas de confiabilidade?

As incertezas e os recursos hídricos

Várias têm sido as tentativas de identificar os variados tipos de incertezas no campo da Hidrologia e dos Recursos Hídricos. Plate e Duckstein (1987) identificaram os grupos de incertezas no dimensionamento hidráulico. Eles classificaram as incertezas em incertezas hidrológicas, incertezas na amostragem e incertezas na função densidade de probabilidade escolhida. Identificaram ainda as incertezas hidráulicas, as incertezas no modelo (equações empíricas) e incertezas estruturais, associadas ao material utilizado e o projeto estrutural.

Bernier (1987) fez distinção entre as incertezas naturais, devidas à aleatoriedade dos processos naturais e as incertezas tecnológicas, as quais envolvem erros de amostragem e na adequabilidade do modelo adotado.

Beck (1987) examinou detalhadamente as incertezas na estrutura do modelo, na estimativa dos parâmetros e a propagação dos erros nas estimativas.

Klir (1989) analisou incerteza versus complexidade: ao se reduzir a complexidade, a incerteza aumenta. Segundo o autor, a incerteza está relacionada à informação, sendo reduzida a medida que mais dados são coletados, através de informação direta e geração de experimentos, entre outros.

Ganoulis (1995) adota classificação semelhante a de Plate e Duckstein (1987), agrupando as incertezas em quatro categorias: incertezas hidrológicas, incertezas hidráulicas, incertezas econômicas (flutuações nos preços e custos) e incertezas estruturais.

Ainda segundo Ganoulis (1995), as incertezas, de um modo geral, podem ser classificadas em dois grandes grupos: incertezas aleatórias (ou naturais) e incertezas epistêmicas.

As incertezas aleatórias (ou naturais) são inerentes ao processo e não podem ser reduzidas com a utilização de modelo mais sofisticado ou com a coleta de dados adicionais.

As incertezas epistêmicas podem ser de diferentes tipos: Incerteza nos dados - devido a métodos de amostragem, erros de medição ou nos métodos de análise dos dados; Incerteza do modelo - devido a modelos matemáticos inadequados ou erro na estimativa dos parâmetros, e Incerteza operacionais - relacionadas à construção, operação e manutenção de obras de engenharia. Diferentemente das incertezas naturais, as epistêmicas podem ser reduzidas pela coleta de mais informações ou pelo aperfeiçoamento do modelo matemático.

Frey (1998) separa as incertezas no modelo definidas por Ganoulis (1994) em duas: incertezas no modelo matemático e incertezas na estimativas dos parâmetros. Segundo o autor, a estrutura matemática empregada para representar cenários e fenômenos são uma das principais fontes de incertezas, devido ao fato dos modelos serem apenas uma representação simplificada do fenômeno e que os limites de aplicação do modelo podem estar incompletos ou incorretos. Quanto às incertezas na estimativa dos parâmetros, o autor segue a mesma metodologia proposta por Morgan e Henrion (1993), que identificam as incertezas nas quantidades medidas empiricamente (medidas de

concentração de poluentes, por exemplo), nas constantes utilizadas por convenção (constante de Plank, velocidade da luz, etc), nas variáveis de decisão, nos valores dos parâmetros e nos parâmetros associados ao modelo utilizado.

As incertezas na determinação das disponibilidades hídricas de um reservatório

Vincens et al.(1975) classificam as incertezas inerentes a estes estudos em três tipos: Incetezas do Tipo I - ocasionadas pelo desconhecimento do verdadeiro modelo que rege o processo natural; Incetezas do Tipo II - geradas na avaliação dos parâmetros dos modelos matemáticos e Incetezas do Tipo III - aquelas inerentes aos processos naturais.

Incetezas do Tipo I

As incertezas do Tipo I são de difícil avaliação, uma vez que todo modelo é, inevitavelmente, uma simplificação da realidade. Os fenômenos hidrológicos apresentam comportamento tão complexo que, mesmo modelos matemáticos detalhados não conseguem reproduzir, com exatidão, os processos naturais.

Segundo Morgan e Henrion (1993), “ todo modelo é, definitivamente, falso”, uma vez que mesmo quando o modelo resulta em boas aproximações de um sistema natural, em particular, ele nunca será completamente exato. Afirma ainda que, embora se possa determinar se um modelo é melhor que outro - no que se refere à precisão de suas previsões - não se pode dizer se ele é o mais provável. Desta forma, não se pode atribuir probabilidades a modelos.

Em estudos hidrológicos é freqüente a necessidade de se ajustar os dados, quer sejam de vazão ou precipitação, a uma distribuição de probabilidades teórica. Nos rios intermitentes do Nordeste Brasileiro é comum as séries de vazões diárias, mensais e mesmo anuais, apresentarem valores nulos. Assim sendo, a verdadeira distribuição de probabilidades das vazões naturais é uma distribuição mista, formada pela função densidade de probabilidade (para valores não-nulos) e pela função massa de probabilidades(para os valores nulos). Isto significa que a função distribuição de probabilidades verdadeira tem três parâmetros, o que dificulta a sua aplicação.

Uma simplificação que se faz é utilizar uma função distribuição de probabilidades continua a qual preserve a média e o desvio padrão da função verdadeira.

Campos (1987) analisou a influência desta simplificação no dimensionamento de reservatórios no Nordeste do Brasil, concluindo que a utilização da função de distribuição de probabilidades contínua como substituta da função de probabilidades mista induz o hidrólogo a um erro, o qual aumenta a medida em que a probabilidade de falha diminui (ou seja, com o aumento da garantia) e em que a probabilidade dos influxos anuais serem nulos aumenta.

Incertezas do Tipo II

Mesmo que a complexidade dos fenômenos hidrológicos pudesse ser fielmente reproduzida por um modelo, restaria ainda estimar os parâmetros da população, tais como média (μ) e variância (σ^2), a partir da única informação disponível - a série histórica - e não se pode esperar que, sendo as estimativas dos parâmetros populacionais feitas a partir de amostras relativamente pequenas, não contenham uma grande dose de incerteza.

Costuma-se admitir, em estudos hidrológicos, que séries de 30 anos de dados permitem a obtenção de resultados com a precisão aceitável. Campos (1997) adverte que a validade desta assertiva depende da variabilidade do fenômeno em análise e mostra que, considerando que se 30 anos de dados sejam suficientes para um estudo de vazões no Nordeste dos Estados Unidos, o qual apresenta, em termos médios, um CV_{def} da ordem de 0,25, para que se cometa o mesmo erro em um rio do Nordeste Brasileiro, ou na Austrália, que apresentam CV_{def} próximos a 1,2, seria necessária uma série de medições de 690 anos.

Incertezas do Tipo III

As incertezas do Tipo III são aquelas inerentes aos processos naturais, e não podem ser reduzidas pelo uso de um modelo mais sofisticado ou pela coleta de mais informações. Elas, simplesmente, existem e precisam ser estudadas através de metodologias apropriadas, agregando informação valiosa ao planejamento de recursos hídricos.

Studart (2000) e Studart e Campos (2001) analisaram, através da simulação estocástica, as incertezas decorrentes do volume inicial assumido para o reservatório, do coeficiente de variação das vazões naturais, da capacidade do reservatório e do nível de garantia (G). Utilizaram como estudo de caso o Açude Caxitoré, localizado no Semi-Árido cearense; a validade do estudo, no entanto, não se restringiu unicamente ao local citado, uma vez que os autores buscaram o caráter geral ao adotarem diferentes valores de capacidades para o reservatório e diferentes distribuições temporais dos influxos, estas últimas refletidas pelos diferentes coeficientes de variação assumidos para as vazões anuais, conservadas a média e a distribuição de probabilidades. Verificaram que uma boa estimativa das reais disponibilidades de um dado reservatório, é simula-lo com uma série sintética de 5.000 anos. Observaram ainda que, quanto maior o coeficiente de variação das vazões naturais maiores as incertezas envolvidas nas estimativas.

CONCLUSÕES

Discorreu-se no presente trabalho sobre as várias definições de incertezas, suas classificações sob as mais variadas metodologias, dando especial atenção à área de recursos hídricos. Não se teve a pretensão de fazer um levantamento exaustivo de toda a literatura existente sobre o assunto, e sim

a de apresentar o estudo das incertezas de uma maneira clara e didática, indo do geral ao específico, na tentativa de sintetizar o estado-da-arte das incertezas em recursos hídricos e, mais especificamente, na avaliação das disponibilidades hídricas de um reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARROW, K. J. (1992). *I Know a Hawk from a Handsaw*. In: M. SZENBERG (Ed.), Eminent Economists: Their Life and Philosophies. Cambridge University Press, Cambridge.
- BECK, M.B. (1987). *Water Quality Modeling: A Review of the Analysis of Uncertainty*. In: Water Resouces Research, vol. 23 No 8, august.
- BERNIER, J.M. (1987). *Elements of Bayesian Analysis of Uncertainty in Hydrological Reliability and Risk Models*. In: DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J. (Eds), Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series, Serie E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff, Dordrecht, Netherlands.
- BERNSTEIN, P.L. (1997). Desafios aos Deuses – A Fascinante História do Risco. Rio de Janeiro, Editora Campus.
- CAMPOS, J.N.B. (1987). A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate. Fort Collins, Colorado State University. PhD thesis.
- CAMPOS, J.N.B.; SOUZA Fº, F.A.; ARAÚJO, J.C. (1997). *Errors and Variability of Reservoir Yield Estimation as a Function of the Coefficient of Variation of Annual Inflows*. In: Managing Water: Coping with Scarcity and Abundance,. Proceedings of 27th IARH Congress, San Francisco, USA.
- CANTER, L.W. (1996). *Scientific Uncertainty and Water Resources Management*. In: LEMONS, J. (Ed.), Scientific Uncertainty and Environmental Problem Solving, Blackwell Science Inc., Cambridge.
- ERMOLIEV, Y.M. (1993). Uncertainties and Decision Making. International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria.
- FREY, H.C. (1998). *Quantitative Analysis of Variability and Uncertainty in Energy and Environmental Systems*. In: AYYUB, B.M. (Ed.), Uncertainty Modeling and Analysis in Civil Engineering. CRC Press LLC, Florida.
- GANOULIS, J.G. (1994). Engineering Risk Analysis of Water Pollution. VCH Publishers Inc., New York, NY.
- KLIR, G. J. (1989). *Methodological Principles of Uncertainty in Indutive Modelling: a New Perspective*. In: ERICKSON, G. J. & SMITH, C.R. (Eds), Maximum-Entropy and Bayesian Methods in Science and Engineering Vol. I.

- KUNDZEWICZ, Z.W. (1995). *Hydrological Uncertainty in Perspective*. In: KUNDZEWICZ, Z.W.(Ed.), New Uncertainty Concepts in Hydrology and Water Resources. International Hydrology Series, Cambridge University Press, Cambridge.
- LANNA, A .E. (1997). *Introdução*. In: PORTO, R. L. (organizador). Técnicas Quantitativas para Gerenciamento de Recursos Hídricos. ABRH, Porto Alegre, 1997.
- MOLAK, V. (1997). Fundamentals of Risk Analysis and Risk Management. Lewis Publishers, CRC Press, Florida, USA.
- MORGAN,M.G. & HENRION,M. (1993). Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis. Cambridge University Press, New York.
- PLATE, E.J. & DUCKSTEIN, L. (1987). *Reliability in Hydraulics Design*. In: DUCKSTEIN, L. & PLATE, E.J. (Eds), Engineering Reliability and Risk in Water Resources, NATO ASI Series, Serie E: Applied Sci., No. 124, Nijhoff, Dordrecht, Netherlands.
- STUDART, T. M. C (2000). Análise das Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-Áridos. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará.
- STUDART, T.M.C. e CAMPOS, J.N.B. (2001). *Incetezas nas Estimativas das Vazões Regularizadas por um Reservatório*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos - RBRH, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (no prelo)..
- VIEIRA, V.P.P.B.(1997). Análise de Risco Aplicada a Recursos Hídricos. Notas de Aula. Curso de Doutorado em Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará.
- VINCENS,G.J., I. RODRIGUES-ITURBE E J.C. SHAAKE (1975). A Bayesian Framework for the use of Regional Information in Hydrology. Res.,11(3). p.405-4114, 1975.