

ANÁLISE DE RISCO E INCERTEZA NA TOMADA DE DECISÃO NA GESTÃO HIDROAMBIENTAL

Marcos Airton de Sousa Freitas¹

Resumo - Tomar decisão consiste em escolher a melhor alternativa de acordo com critérios estabelecidos, a partir de uma certa quantidade de informações, com o propósito de atingir um objetivo estabelecido. Nos sistemas de recursos hídricos, por exemplo, existe a aleatoriedade básica dos processos hidrológicos, ou a incerteza hidrológica, que estabelece a disponibilidade de água. Há também a incerteza inerente aos processos econômicos, sociais e ambientais, que determina as demandas de água. Existem, pelo menos, duas abordagens no tratamento da incerteza (explicitamente estocástica e implicitamente estocástica). Na abordagem implicitamente estocástica, o problema é resolvido supondo que os eventos sejam conhecidos total ou parcialmente (análise de risco). Em ambos os casos a análise de risco é de fundamental importância. Demonstra-se, por meio desse artigo, a aplicabilidade desses conceitos e técnicas com ênfase em recursos hídricos e meio ambiente.

Abstract - Taking decision consists of choosing the best alternative criteria in accordance with established, from a certain amount of information, with the intention to reach an established objective. In water resources systems, for example, there exists random hydrological processes, or the hydrological uncertainty, that establishes the water availability. There is also the inherent uncertainty to the economic, social and environmental processes, that determine the water demands. There exist, at least, two approaches in the treatment of the uncertainty (explicitly and implicitly random). In the implicitly random approach, the problem is decided assuming that the events are known total or partially (risk analysis). In both cases the risk analysis is of basic importance. It is demonstrated, for way of this article, the applicability of these concepts and techniques, with emphasis in water resources and environment.

Palavras-chave: gestão hidroambiental, análise de risco, incerteza.

¹ Agência Nacional de Águas – ANA. Setor Policial Sul, Quadra 3, Lote 5, Bloco B, Brasília – DF. Telefone: (61) 445-5367. E-mail: masfreitas@ana.gov.br

INTRODUÇÃO

Um dos fatores que podem complicar uma tomada de decisão racional é a **incerteza**. A maior parte das decisões, sobretudo as mais importantes, é tomada com base em algum tipo de previsão, o que, por si só, já coloca o fator incerteza no processo de decisão. Mesmo que o problema não exija alguma previsão, outro fator complicador, é a insuficiência de informações (ANDRADE, 2000). Dessa forma, torna-se importante fazer uma avaliação do grau de incerteza existente no processo de decisão, ou seja, procurar uma estimativa do **risco** envolvido.

Na Engenharia Civil, bem como em outras áreas, há uma tendência, cada vez maior, de se projetar de forma econômica, no entanto dentro de níveis de segurança especificados. Muitas vezes, é necessário analisar a previsão da performance de um sistema para o qual existe pouca ou nenhuma experiência. Na elaboração de um projeto de engenharia são feitas idealizações do sistema a ser representado. Tradicionalmente, os carregamentos aos quais o sistema está submetido são modelados por representações geométricas ou analíticas simples, assim como os materiais e suas propriedades são considerados estáveis e definidos de maneira única (HARR, 1987).

Entretanto, os carregamentos não são completamente conhecidos. Há incertezas, por exemplo, quanto à frequência e intensidade de terremotos, a variação das vazões superficiais e subterrâneas, a ação e variabilidade dos ventos e ondas etc. De acordo com YEN (1988), o planejamento, o projeto e a operação de sistemas de recursos hídricos e ambientais estão sujeitos inevitavelmente às incertezas, relacionadas aos seguintes aspectos: geofísicos; variabilidade da demanda; operacionais; medições; inabilidade do modelo de simulação ou do método de projeto etc.

As palavras “risco” e “incerteza” assumem, na maioria das vezes, significados distintos, embora em muitos casos apareçam como sinônimos. De acordo com o Novo Dicionário Aurélio da Língua Portuguesa, em sua 9ª edição, os termos são definidos da seguinte forma:

- RISCO: [Do baixo latim *risiku*, *riscu*, este provavelmente do latim *resicare*, “cortar”; ou do esp. Risco, “penhasco alto e escarpado”]. S.m. 1. Perigo ou possibilidade de perigo. 2. Jur. Possibilidade de perda ou de responsabilidade pelo dano.
- INCERTEZA: [De in-+certeza]. S.f. Falta de certeza; hesitação; indecisão, perplexidade, dúvida.

YEVJEVICH (1976) apud VIEIRA (1979) define os termos risco e incerteza conforme o que segue:

- RISCO: “probabilidade de excedência ou não excedência da distribuição de probabilidade de variáveis aleatórias quando relacionadas a sistemas de recursos hídricos na natureza, tanto naturais quanto artificiais ou uma combinação de ambos”.

- INCERTEZA: “todo tipo de erros envolvido na relação do homem com a natureza, notadamente na determinação de informação em variáveis randômicas, no uso de métodos de resolução de problemas e na tomada de decisão.”

Consoante ANDRADE (2000), **risco** é definido como uma estimativa do grau de incerteza que se tem com respeito à realização de resultados futuros desejados. Assim, por exemplo, quanto mais ampla for a faixa de valores previsíveis para o retorno de um investimento, tanto maior será o grau de risco do investimento.

Existem três princípios de incertezas, aplicáveis somente nas situações, onde emergem deficiências de informações, dependendo da teoria qual a incerteza é conceitualizada (KLIR, 1995): princípio de incerteza mínima; princípio da incerteza máxima; e o princípio da invariância da incerteza.

O problema mais difícil, numa análise de risco, é justamente a estimativa das probabilidades. A probabilidade é, desta forma, uma medida de incerteza. Assim, mesmo que o problema seja novo para o gestor, ele sempre terá informações a respeito (sem informação alguma o problema fica realmente difícil), que lhe dão uma certa sensibilidade acerca da incerteza dos fatores envolvidos. Com um pouco de esforço de imaginação, ele pode quantificar o grau de certeza (ou incerteza) que tem sobre cada fator. Com isso, estará definindo, em termos numéricos, a probabilidade de ocorrência do fator que ele acha razoável.

Outro problema na tomada de decisão consiste da escolha da melhor alternativa de acordo com critérios estabelecidos, a partir de uma certa quantidade de informações, com o propósito de atingir um objetivo estabelecido. A multidimensionalidade é, atualmente, a principal característica dos problemas de tomada de decisão do mundo real, tendo objetivos econômicos, ambientais, sociais e técnicos. Junto com a multidimensionalidade dos objetivos (e restrições também) devemos observar a incerteza. Matematicamente a incerteza refere-se à probabilidade do resultado de um experimento aleatório (BELCHIOR et al., 1997).

Tal propriedade aleatória está ligada ao ambiente e aumenta com a quantidade de variáveis e imprecisões contidas na descrição específica do sistema, que geralmente é complexa e incompleta. A insuficiência de informação é fator determinante no grau de incerteza em determinado sistema, assim como a introdução de informação de natureza irrelevante no problema. No entanto, a quantidade de incertezas pode ser reduzida pela obtenção de novas informações relevantes, como o resultado de algumas ações, tais como observação de um fato novo, execução de um experimento, obtenção de um registro histórico (KLIR, 1995).

Nos sistemas de recursos hídricos existe a aleatoriedade básica dos processos hidrológicos, ou a incerteza hidrológica, que estabelecem a disponibilidade de água. Há também a dos processos econômicos, sociais e ambientais que determinam as demandas de água (PORTO et al., 1997).

Existem abordagens especializadas no tratamento da incerteza hidrológica, as quais podem ser divididas, de acordo com a maneira como a aleatoriedade é inserida, temos duas grandes classes: explicitamente estocástica e implicitamente estocástica.

As abordagens explicitamente estocásticas inserem os modelos probabilísticos que descrevem a aleatoriedade do futuro na formulação do problema decisório, que será resolvido por otimização. Existem abordagens explicitamente estocásticas com Programação Linear, mas as necessidades de simplificação do problema são grandes, entre outros motivos, pela própria restrição de linearidade. Uma característica desta abordagem é que uma regra decisória é produzida de forma direta como resultado do processo computacional, associando as decisões que são buscadas ao estado do sistema (PORTO et al., 1997).

Na abordagem implicitamente estocástica o problema é resolvido supondo que os eventos são conhecidos (total ou parcialmente). Nesta temos duas situações, caso haja dados suficientes para montar uma série amostral, esta será usada. Vale ressaltar que esta série é obtida através da observação cronológica dos eventos hidrológicos (chuva, vazão, temperatura etc). Se não se têm dados suficientes para montar uma série histórica, deve-se simular uma ou n séries sintéticas através de modelos estocásticos de simulação.

As incertezas que envolvem todas as atividades humanas, em particular as ações ou intervenções relacionadas a recursos hídricos, subentendem, geram ou implicam em riscos, entendendo-se por risco a probabilidade ou a possibilidade da ocorrência de valores, eventos ou fenômenos indesejáveis ou adversos. Assim, as medidas, observações e tomadas de decisão do administrador de recursos hídricos contêm variadas formas de incertezas, e propiciam a convivência continuada e inevitável com inúmeros tipos de riscos (VIEIRA, 1999).

Essa convivência precisa ser explicitada para ensejar a identificação e a quantificação da intensidade desses riscos e, se possível, sua prevenção, minimização ou mitigação.

A Análise de Risco, como instrumento de gestão, compreende de um modo geral, quatro etapas ou fases: identificação ou qualificação dos riscos; quantificação dos riscos; minimização dos riscos; e mitigação ou remediação dos efeitos dos riscos.

Por outro lado, os riscos a serem avaliados e gerenciados podem ser classificados em: físicos ou estruturais, econômicos, sociais e ambientais, os quais, por sua vez, podem se desdobrar em componentes e sub-componentes, em sucessivos níveis de detalhamento. A Tabela 1 apresenta as atividades, as incertezas, os riscos e as medidas mitigatórias na gestão de secas em bacias hidrográficas.

Tabela 1: Atividades e Riscos na Gestão de Secas em Bacias Hidrográficas

| ATIVIDADES | INCERTEZAS | RISCOS | MEDIDAS |
|--|---|---|--|
| Estimativas das Disponibilidades | <ul style="list-style-type: none"> - Metodologias adotadas para avaliação das disponibilidades (variabilidade das disponibilidades futuras) | <ul style="list-style-type: none"> - Definições e conceituações errôneas - Superestimativa das disponibilidades | <ul style="list-style-type: none"> - Aprimorar Sistema de Informação (Banco de Dados) - Quantificar os riscos |
| Estimativas das Demandas | <ul style="list-style-type: none"> - Metodologias adotadas para avaliação das demandas (variabilidade das demandas futuras) | <ul style="list-style-type: none"> - Definições e conceituações errôneas - Subestimativa das demandas | <ul style="list-style-type: none"> - Cadastro de usuários atualizado - Utilizar metodologias adequadas à região (ex.: melhor estimativa da evapotranspiração – irrigação) - Quantificar os riscos de demanda insatisfeita |
| Estudos de Eventos Históricos (séries observadas e reconstituídas) | <ul style="list-style-type: none"> - Conceituação de secas - Dados hidrometeorológicos (erros e inadequação da amostra) - Insuficiência de dados | <ul style="list-style-type: none"> - Conceituação imprópria - Superestimativa / subestimativa | <ul style="list-style-type: none"> - Atualizar conhecimento e aprimorar métodos - Quantificar os riscos |
| Avaliação dos Parâmetros Característicos de Secas (Duração, Severidade, Magnitude) e Análise de Frequência | <ul style="list-style-type: none"> - Situação operacional das redes climatológicas e hidrológicas - Estimativa dos volumes dos reservatórios e água subterrânea - Estimativa das demandas | <ul style="list-style-type: none"> - Superestimativa / Subestimativa dos parâmetros - Metodologias inadequadas | <ul style="list-style-type: none"> - Atualizar conhecimento e aprimorar métodos - Quantificar os riscos - Aprimorar sistema de coleta de dados - Levantamento batimétrico (C-A-V) |
| Previsão de Secas | <ul style="list-style-type: none"> - Identificação das causas das secas - Dados climáticos - Estrutura dos modelos de previsão - Parâmetros dos modelos | <ul style="list-style-type: none"> - Superestimativa / Subestimativa - Modelos inadequados | <ul style="list-style-type: none"> - Quantificar os riscos - Atualizar conhecimento e aprimorar modelos |
| Monitoramento de Secas | <ul style="list-style-type: none"> - Identificação dos índices de secas - Coleta, processamento e transmissão dos dados - Incertezas operacionais | <ul style="list-style-type: none"> - Parâmetros (índices) de monitoramento inadequados - Falta de recursos financeiros | <ul style="list-style-type: none"> - Identificar e aperfeiçoar índices adequados à região - Aprimorar Sistema de Informação (BD) - Elaborar mapas de vulnerabilidade e de riscos |
| Análise dos Impactos das Secas | <ul style="list-style-type: none"> - Quantificação das solicitações - Quantificação da capacidade do sistema (bacia hidrográfica) | <ul style="list-style-type: none"> - Quantificação subestimada ou superestimada | <ul style="list-style-type: none"> - Quantificar os riscos - Modelar a relação índice de seca aos impactos correspondentes |
| Ações Mitigadoras | <ul style="list-style-type: none"> - Tempo hábil para implementação - Previsão de custos - Adequação das ações - Integração entre os órgãos federais, estaduais e municipais - Qualificação dos agentes administrativos e usuários de água | <ul style="list-style-type: none"> - Ineficiência das ações - Déficit orçamentário - Desarticulação das ações - Corrupção - Falta de comunicação - Decisões inadequadas | <ul style="list-style-type: none"> - Melhoria do sistema institucional e legal - Quantificar os riscos da não consecução das ações - Associar índice de seca ao impacto e às ações exigidas - Estabelecer orçamentos e cronogramas - Efetuar controle sistemático sobre o andamento das ações |
| Planejamento (curto, médio e longo prazo): | <ul style="list-style-type: none"> - Definições de objetivos - Estabelecimento das metas e instrumentos | <ul style="list-style-type: none"> - Objetivos conflitantes - Estratégias | <ul style="list-style-type: none"> - Efetuar monitoramento das ações - Estabelecer estratégias e |

| | | | |
|---|---|---|--|
| 1. Plano Emergencial de Combate à Seca (curto prazo) 2. Plano de Convivência com a Seca (médio e longo prazos) | - Efetiva capacitação dos técnicos e usuários | - inexecutáveis Metas e produtos superestimados | - instrumentos operacionais Efetuar controle sistemático sobre o andamento dos trabalhos |
|---|---|---|--|

CRITÉRIOS DE DECISÃO SOB CONDIÇÕES DE INCERTEZA

Existem várias definições e conceitos de decisão. Basicamente, decisão é o curso de ação escolhido, como o meio mais efetivo ou eficiente à disposição, para obter o resultado esperado e resolver o problema. Não cabe aqui a discussão relativa à classificação das decisões, entretanto, a introdução de decisão racional é requerida.

Pode-se enunciar que uma decisão racional é aquela que, de forma efetiva e eficiente, garante a realização dos objetivos premeditados, para os quais os meios e os recursos foram alocados (ANDRADE, 1990).

Tal definição está centrada em três pontos importantes para caracterizar a racionalidade de uma decisão: satisfação dos interesses humanos envolvidos; modificação dos meios necessários aos objetivos procurados; e consistência do curso de ação. Logo, uma decisão é tão mais racional de acordo com o grau de envolvimento destas características no processo.

Em certos casos não se tem como calcular as probabilidades envolvidas no processo de decisão, quer pela falta de informação (séries) ou porque o problema é demasiadamente novo. Em vista desta complicação faz-se necessário o uso da probabilidade subjetiva.

Sabe-se que a probabilidade é medida de incerteza. O bom senso diz que mesmo que o problema seja inteiramente novo, os recursos humanos envolvidos dispõem de informação que às vezes pode ser puramente subjetiva. Tal informação deve conter “pistas” para que se possa aferir, através da sensibilidade, o grau de incerteza ou certeza que tem sobre cada fator. Feito isso, estará definido, numericamente, a probabilidade do fator, é importante mencionar que a subjetividade nos dá apenas um rumo a seguir, pois o erro nesta aferição pode ser além do esperado.

Contudo, a aferição destas probabilidades subjetivas a problemas do mundo real nem sempre é possível, dada à quantidade de fatores envolvidos e a discordância da subjetividade. Nessas situações, tendo sido determinados os resultados possíveis, associados aos diversos eventos que poderão ocorrer, o tomador de decisões se depara com um problema de escolha de alternativa que poderá resultar em sucesso, caso ocorra um evento favorável, mas que poderá resultar em fracasso quando o evento ocorrido seja desfavorável. Alguns critérios podem ajudar a iluminar a melhor alternativa.

O critério Minimax ou Maximin supõe que em determinado modelo ocorrerá o pior evento possível, contudo o Minimin ou Maximax dita o oposto, sempre ocorre o melhor resultado. Para equilibrar esta balança é que surgiu o critério de Hurwicz, este procura delimitar um meio termo entre os dois extremos anteriores. O critério de Savage procura determinar os arrependimentos máximos que poderão ocorrer, para cada um dos eventos, quando é feita uma escolha (ANDRADE, 1990).

Método de Monte Carlo

O método de Monte Carlo é um processo de operar modelos estatísticos de forma a lidar experimentalmente com variáveis descritas por funções probabilísticas (ANDRADE, 1990). Tal método nada mais é que uma simulação matemática. Em Pesquisa Operacional temos dois tipos de modelos para resolução de problemas, modelo de otimização e modelo de simulação.

Um modelo de simulação tem por objetivo representar o mundo real (sempre uma parte dele). Este modelo pode ser usado quando o tomador de decisões tenta prever o que aconteceria ao sistema real em determinadas condições, condições estas que estão sob seu controle, o que muitas vezes é impossível no mundo real.

Com o Método de Monte Carlo pode-se gerar inúmeras séries sintéticas. Estas séries seriam semelhantes do ponto de vista estatístico, tendo suas propriedades como média, desvio padrão, assimetria etc, iguais ao da série real (observada) com erro controlável. Assim, pode-se mimetizar o comportamento do modelo. Basta que se tenha uma série histórica, para se extrair suas propriedades estatísticas. É fácil perceber a importância da otimização na resolução de problemas. A robustez do método, aliado a sua simplicidade, apontam para uma diversa gama de aplicações.

APLICAÇÕES

Nesta seção demonstra-se a aplicabilidade dos conceitos vistos anteriormente, com ênfase em recursos hídricos e meio ambiente.

Critérios de Decisão

Em determinada fazenda deseja-se cultivar uma área. Esta depende muito da quantidade de precipitação que ocorre na região. Necessário se faz escolher o mês em que se deve começar a plantar. Obviamente, a chuva tem seu grau de incerteza, variando suas precipitações mês a mês. Sabe-se também que se chover demais pode arruinar a cultura. Logo tem que se escolher um mês dentre várias situações (eventos) de chuva, ponderando-se a precipitação que melhor se adapte a cultura. Suponha que ocorreram os seguintes eventos (valores em milímetros) apresentados na Tabela 2:

Tabela 2: Eventos de chuvas ocorridos na região.

| Mês | Evento1 | Evento2 | Evento3 | Evento4 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| Janeiro | 48,46 | 42,49 | 57,23 | 177,38 |
| Fevereiro | 32,14 | 43,67 | 53,48 | 107,83 |
| Março | 25,30 | 26,14 | 53,27 | 76,56 |
| Abril | 28,39 | 40,04 | 105,80 | 154,84 |
| Mai | 17,20 | 21,71 | 89,73 | 107,43 |
| Junho | 25,83 | 38,42 | 69,23 | 72,09 |
| Julho | 40,32 | 54,98 | 79,60 | 152,61 |
| Agosto | 23,35 | 44,12 | 41,91 | 30,78 |
| Setembro | 28,12 | 48,43 | 73,23 | 102,15 |
| Outubro | 26,43 | 37,76 | 89,07 | 121,53 |
| Novembro | 26,30 | 32,52 | 110,49 | 48,52 |
| Dezembro | 32,04 | 37,54 | 100,04 | 86,91 |

Devem ser empregados os critérios de decisão sob condições de incerteza. Assim sendo pode-se aferir um mês apropriado considerando os eventos envolvidos. Usou-se a distribuição normal inversa com probabilidade aleatória para todos os eventos, tendo como média e desvio padrão os valores mostrados na Tabela 3. Depois de adotados os critérios, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4:

Tabela 3: Média e desvio padrão dos eventos de chuva

$$\text{Evento 1: } \bar{x} = 50, \sigma = 10$$

$$\text{Evento 2: } \bar{x} = 40, \sigma = 10$$

$$\text{Evento 3: } \bar{x} = 80, \sigma = 20$$

$$\text{Evento 4: } \bar{x} = 100, \sigma = 30$$

O critério Minimax obtém o resultado do pior evento possível. Assim deve-se escolher a alternativa que determina a maior precipitação daquelas que seriam as menores possíveis, ou seja, escolher a melhor das piores. Já o critério Minimin é adotado quando se tem elevado grau de otimismo envolvido no processo. Tal critério aponta a melhor alternativa dentre as melhores, escolhendo a melhor das melhores. É fácil notar que os dois critérios discutidos são opostos. Ainda por cima são extremos em suas escolhas. Neste caso tem-se o critério de Hurwicz, o qual admite um elevado grau de flexibilidade, dependendo do grau de otimismo do tomador de decisões, fornecendo uma regra de decisão bastante precisa.

Tabela 4: Escolha do mês segundos vários critérios

| Mês | Maximin | Maximax | Hurwicz | Savage |
|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| Janeiro | 42,49 | 177,38 | 67,45 | 53,26 |
| Fevereiro | 32,14 | 107,83 | 37,85 | 69,55 |
| Março | 25,30 | 76,56 | 25,63 | 100,82 |
| Abril | 28,39 | 154,84 | 63,23 | 22,54 |
| Mai | 17,20 | 107,43 | 45,12 | 69,95 |
| Junho | 25,83 | 72,09 | 23,13 | 105,29 |
| Julho | 40,32 | 152,61 | 56,15 | 30,89 |
| Agosto | 23,35 | 44,12 | 10,39 | 146,60 |
| Setembro | 28,12 | 102,15 | 37,01 | 75,23 |
| Outubro | 26,43 | 121,53 | 47,55 | 55,85 |
| Novembro | 26,30 | 110,49 | 42,10 | 128,86 |
| Dezembro | 32,04 | 100,04 | 34,00 | 90,47 |
| Valor | 42,49 | 177,38 | 67,45 | 22,54 |
| Escolha | Janeiro | Janeiro | Janeiro | Abril |

Sua formulação é a seguinte:

$$H(a_i) = v \cdot (\max(c_{ij})) - (1 - v) \cdot (\min(c_{ij})) \quad (1)$$

sendo:

a_i = alternativa de decisão;

c_{ij} = precipitação da alternativa i caso ocorra o evento j;

Tem-se ainda a variável “v”, chamada de coeficiente de otimismo. Esta variável afere diretamente o grau de otimismo do gerente. Se $v = 0$, o pessimismo é extremo, e se $v = 1$ tem-se otimismo extremo. Nesta aplicação adotou-se $v = 0,5$, que é um valor moderado.

O critério de Savage determina os arrependimentos máximos que poderão ocorrer, para cada um dos eventos. Determina-se uma matriz de arrependimentos, sendo arrependimento a diferença de precipitação de cada opção para a precipitação máxima do evento. Os elementos são calculados assim:

$$r_{ij} = \max(c_{ij}) - c_{ij} \quad (2)$$

Depois de calculada a matriz de arrependimentos (Tabela 5), escolhe-se o arrependimento máximo de cada opção (mês). A alternativa escolhida deverá ser aquela que minimiza o arrependimento máximo, como pode ser constatado na tabela da página anterior.

O resultado da aplicação usando os quatros critérios foi o seguinte:

- Minimax: Janeiro;
- Minimin: Janeiro;
- Hurwicz: Janeiro;
- Savage: Abril;

Tabela 5: Matriz de arrependimentos

| Matriz de Arrependimentos | | | |
|---------------------------|-------|-------|--------|
| 0,00 | 12,50 | 53,26 | 0,00 |
| 16,32 | 11,31 | 57,01 | 69,55 |
| 23,16 | 28,84 | 57,22 | 100,82 |
| 20,07 | 14,94 | 4,69 | 22,54 |
| 31,26 | 33,27 | 20,76 | 69,95 |
| 22,62 | 16,56 | 41,26 | 105,29 |
| 8,14 | 0,00 | 30,89 | 24,77 |
| 25,11 | 10,86 | 68,58 | 146,60 |
| 20,33 | 6,55 | 37,27 | 75,23 |
| 22,02 | 17,22 | 21,42 | 55,85 |
| 22,16 | 22,46 | 0,00 | 128,86 |
| 16,42 | 17,44 | 10,45 | 90,47 |

A escolha do mês de Janeiro pelos três primeiros critérios não é coincidência. Atentando-se para o modus operandi, observa-se que eles têm abordagem semelhante. Já o critério de Savage tem abordagem bem diferente dos demais, pois trata do arrependimento. Vale ressaltar que a escolha do critério depende do tomador de decisões e sempre haverá um critério que melhor se aplica a um determinado problema.

Nesta aplicação o mês escolhido foi Janeiro. É importante perceber que estes critérios tentam aproximar uma escolha que geralmente é subjetiva em uma escolha exata. Nem sempre se consegue tomar decisões racionais usando subjetividade. A quantidade de eventos envolvidos aqui foi reduzida para efeito didático, mas pode-se usar os critérios junto com simulação matemática para obter um resultado onde há insuficiência de dados. Poder-se-ia simular n eventos usando o método de Monte Carlo e depois usar os critérios para escolher a melhor alternativa.

Método de Monte Carlo Associado às Árvores de Decisão

Como foi citado a priori, o método de Monte Carlo é bastante útil em análise de risco, principalmente quando temos outra técnica aliada à simulação. Usando árvores de decisão podemos explorar um conjunto de posicionamentos possíveis objetivando a resolução do problema.

Uma árvore de decisão é um grafo usado para representar os níveis e camadas do processo decisório. Estrutura das mais usadas na Ciência da Computação, a árvore pode representar muito bem os “caminhos” de decisão e suas respectivas conseqüências, no entanto deve-se estabelecer critérios para construção da árvore.

- A simplicidade da árvore deve ser mantida a todo custo, sob pena de não conseguirmos usá-la corretamente, as informações representadas nos vértices devem ser objetivas e necessárias.
- O modelo de análise de risco precisa ser claro, para que possamos representá-lo na árvore.
- Os recursos humanos envolvidos na tomada de decisão precisam estar conscientes da construção da árvore em todos os aspectos, de forma a assegurar que todas as estratégias estejam presentes, o grau de modelagem esteja correto e para que os resultados alcançados possam ser discutidos.

Neste item vamos examinar uma associação do método de Monte Carlo com árvores de decisão, de forma a avaliar o risco de um conjunto de estratégias possíveis para a solução de um problema.

A árvore de decisão, ferramenta das mais antigas e utilizadas para facilitar o processo de análise de decisão. A difusão dos microcomputadores deu um novo impulso a esta técnica, por tornarem possível a associação de modelos de análise de risco e sensibilidade que dão rapidez e flexibilidade ao processo de resolução de um problema.

Para que uma árvore de decisão seja instrumento eficaz de auxílio à gerência, alguns cuidados devem ser tomados:

- A árvore deve ser simples e conter somente as informações realmente necessárias, de forma a permitir uma comunicação fácil e completa;
- Os modelos para análise de risco e sensibilidade devem ser, dentro do possível, simples e fáceis de compreender, para que seus resultados sejam bem aceitos;
- As pessoas que vão decidir devem ser envolvidas no processo de análise, de forma a assegurar que: estejam presentes todas as estratégias que devem ser analisadas; o nível de modelagem seja correto, sem simplificações ou complicações desnecessárias; e os resultados obtidos sejam bem compreendidos e discutidos.

Aplicação do Método de Monte Carlo Associado às Árvores de Decisão

Os gestores ambientais de uma determinada Unidade de Conservação ou de uma Bacia Hidrográfica estão considerando usar um helicóptero para conter acidentes ambientais (derramamentos de cargas perigosas, apagar incêndios na floresta, etc). A questão é definida na forma como os gestores decidirão a melhor forma de usar o helicóptero. Baseados em observações feitas em outros acidentes na área focada foi visto que há 70% de probabilidade de o helicóptero aplacar o acidente na área A, resultando em uma grande demanda por seus serviços. Por outro lado, temos que existe 30% de probabilidade de ocorrer uma pequena demanda pelos seus serviços, o que

poderia ocasionar prejuízos ambientais e financeiros, pois trata-se de um equipamento caro e seu uso deve ser constante de forma a “recuperar” o que foi investido e salvaguardar a área de interesse ambiental. Para tanto, os gestores imaginaram as seguintes possibilidades de decisão, que devem ser analisadas:

1. usar o helicóptero na área B;
2. usar o helicóptero na área A e se houver grande demanda usar na área B em seguida;
3. usar o aparelho na área A e continuar usando sem importar-se com a demanda.

Agora temos que apontar valores possíveis aos resultados e considerar a incerteza envolvida em cada item, usando o conhecimento e experiência dos guardas determinou-se os seguintes valores para o ganho de eficiência (em horas semanais) com o uso do helicóptero e a probabilidade de que o evento ocorra dentre os 4 identificados (Tabela 6).

Tabela 6: Possibilidades, ganhos de eficiência e probabilidades

| Possibilidades | | Ganho de Eficiência | Probabilidade(%) |
|------------------|---|---------------------|------------------|
| Possibilidade 1: | Ocorrência de pequena demanda na área A | -1 | 20 |
| | | 0 | 50 |
| | | 1 | 30 |
| Possibilidade 2 | Grande demanda na área A em usar na área B. | 1 | 20 |
| | | 3 | 30 |
| | | 5 | 50 |
| Possibilidade 3 | Ocorrência de grande demanda na área A, atender A sempre. | 1 | 20 |
| | | 2 | 40 |
| | | 3 | 40 |
| Possibilidade 4 | Usar imediatamente na área B. | -1 | 20 |
| | | 0 | 30 |
| | | 3 | 30 |
| | | 5 | 20 |

Usando os dados acima levantados podemos modelar a árvore de decisão agora, é importante listar os componentes da árvore antes de iniciarmos a fase de desenho (Figura 1).

- Quadrados: são os vértices de decisão.
- Círculos: são os vértices aleatórios.
- Histogramas: representam as probabilidades associadas aos nós aleatórios, os números internos são os intervalos de números aleatórios escolhidos para os experimentos da simulação.

Árvore de Decisão(vista lateral)

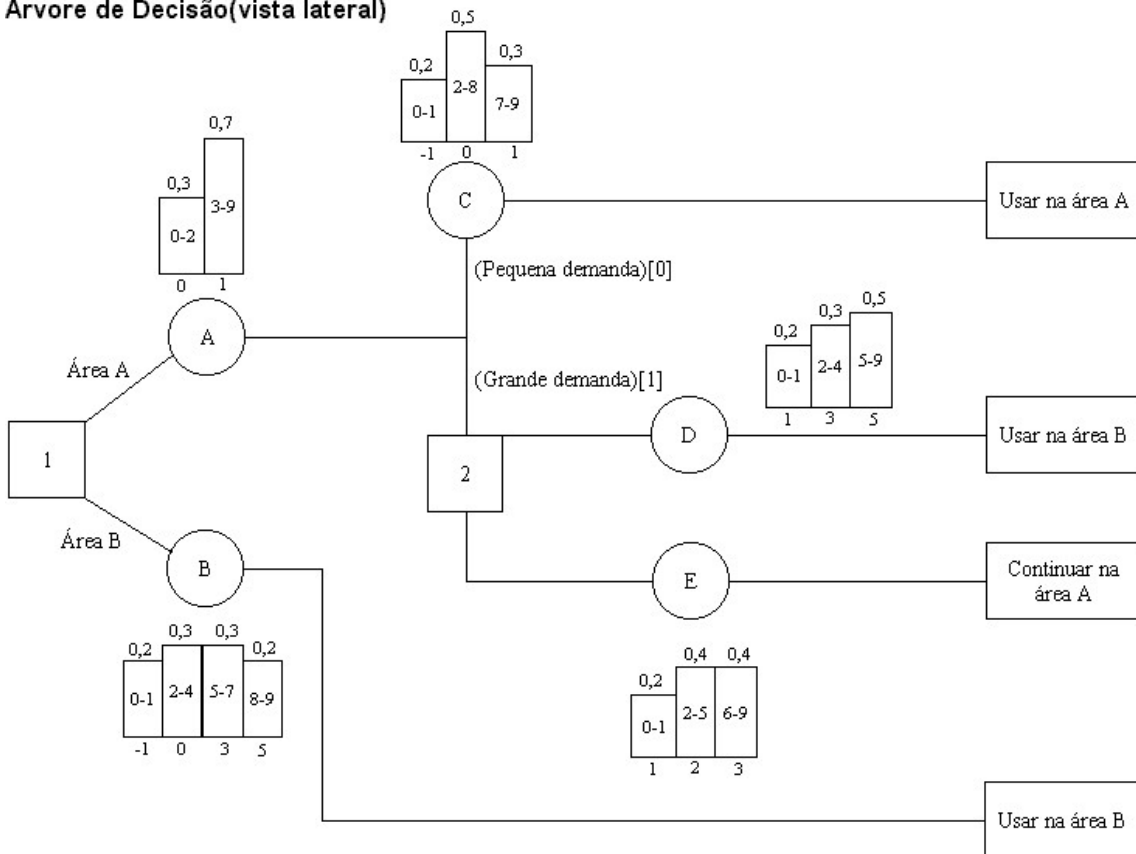


Figura 1: Árvore de decisão

Resolver o problema de simulação é estabelecer regras que determinam o comportamento do modelo, o qual deve ser bastante próximo do real. Portanto, quando o número aleatório gerado levar a um vértice de decisão, deve-se tomar todos os ramos que saem no vértice, de forma a não se interferir tendenciosamente no processo, se o número aleatório gerado levar a um vértice aleatório, deve-se tomar somente o ramo ou valor dado pelo número aleatório sorteado (ANDRADE,1990).

A simulação irá determinar uma distribuição do grau de eficiência. Note que não precisamos simular a decisão 1, pois seu resultado é óbvio, se há uma pequena demanda na região A, então devemos deslocar o helicóptero para a região B (decisão 4). Essa facilidade inicial se deve ao fato de termos apenas duas regiões. Com mais regiões provavelmente teríamos que usar simulação para este item. Entretanto, ainda precisamos simular as decisões 2 e 3. Seus resultados sofrem influência direta do vértice A, para cada série simulada.

Aplicando os conceitos de simulação de Monte Carlo citados nas seções anteriores, obtivemos os resultados apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resultado da simulação de Monte Carlo associado à árvore de decisão

| N. Randômico(A) | Escolha | N. Decisão(Random) | Resultado | R2 | R3 |
|-----------------|---------|--------------------|-----------|----|----|
| 3 | D;E | 4;7 | 3;3 | 3 | 3 |
| 1 | C | 3 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | C | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | D;E | 2;5 | 3;2 | 3 | 2 |
| 0 | C | 7 | 1 | 1 | 1 |
| 3 | D;E | 1;6 | 1;3 | 1 | 3 |
| 6 | D;E | 7;6 | 5;3 | 5 | 3 |
| 1 | C | 2 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | C | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | D;E | 9;3 | 5;2 | 5 | 2 |

Onde R2 é o resultado para a decisão 2 e R3 para a decisão 3, perceba que para a decisão 1 usaremos a distribuição para a decisão 4 (mostrada acima), pois a decisão 4 determina 1 (vértice aleatório B). A primeira coluna é a de números aleatórios para o vértice A, a segunda coluna define a escolha da decisão de acordo com a árvore e seus histogramas, a terceira define o número aleatório gerado de acordo com o histograma do vértice aleatório escolhido na coluna anterior, depois temos as colunas de resultado.

Portanto, com a simulação obtivemos a distribuição de probabilidade para as decisões 2 e 3. A seguir deve-se comparar os parâmetros estatísticos, média e desvio padrão, mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Parâmetros estatísticos relativos à cada decisão

| | Decisão 1 | Decisão 2 | Decisão 3 |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| Média | 1,7 | 1,6 | 1,2 |
| Dsv.Padrão | 2,24 | 2,27 | 1,62 |

Logo, temos a média (que é o grau de eficiência esperado pelo helicóptero em cada situação) e o desvio padrão, que representa o risco de baixa eficiência envolvido em cada possibilidade. Portanto, concluímos que a melhor alternativa é a decisão 1, pois ela apresenta a maior eficiência média (1,7), mas vale a pena olhar a decisão 3, devido a seu baixo desvio padrão (1,62) é outra candidata a ser implementada.

Uma segunda aplicação diz respeito à análise de risco utilizando a teoria dos conjuntos difusos (fuzzy).

Teoria dos Conjuntos Difusos (TCD)

Antes de iniciarmos a apresentação sobre risco difuso e probabilístico, precisamos introduzir a teoria dos conjuntos difusos para que haja um melhor entendimento do assunto que iremos abordar e elucidar quaisquer dúvidas referentes às aplicações que iremos demonstrar.

A teoria dos conjuntos difusos (fuzzy) é usada para representar modelos de raciocínio impreciso, que possuem um papel essencial na notável habilidade humana de tomar decisões racionais, em ambientes de incertezas e imprecisões (ZADEH, 1988).

A principal motivação da TCD é o desejo de construir uma estrutura formal quantitativa, capaz de capturar as imprecisões do conhecimento humano, isto é, na forma como este conhecimento é formulado na linguagem natural. Esta teoria visa ser a ponte entre modelos matemáticos tradicionais, precisos, de sistemas físicos e a representação mental, geralmente subjetiva (imprecisa), destes sistemas (DUBOIS et al., 1991).

A mente humana opera com conceitos subjetivos tais como alto, baixo, velho e novo, que são incorporados em classes (conjuntos) de objetos na TCD, onde a pertinência ou não de um elemento a um conjunto dá-se de forma gradual e não abrupta (ZADEH, 1990).

Um conjunto nítido ou convencional é definido como uma coleção de objetos $x \in X$, onde X é o conjunto universo. Cada elemento pode ou não pertencer a um conjunto A , onde $A \subseteq X$. Em um conjunto difuso, representado por \tilde{A} em X , cada elemento x pode ter um grau de pertinência, usualmente no intervalo real $[0,1]^2$, em decorrência de sua função de pertinência característica (BELCHIOR et al., 1997).

Portanto, cada função de pertinência mapea elementos de um dado conjunto universo X , que é sempre um conjunto nítido, para um número real em $[0,1]$. Nos extremos tem-se que, se o grau de pertinência é 0, o elemento não pertence ao conjunto e, se é 1, o elemento pertence 100% ao conjunto. Em seguida, mostraremos os conceitos principais relacionados aos conjuntos difusos, baseados em (BELCHIOR et al., 1997):

□ Conjunto de elementos $\theta \in \Theta$: por exemplo, “item” em “estoque”.

□ Variável Lingüística V : rótulo para um atributo dos elementos $\theta \in \Theta$, como o “nível de estoque” de uma empresa.

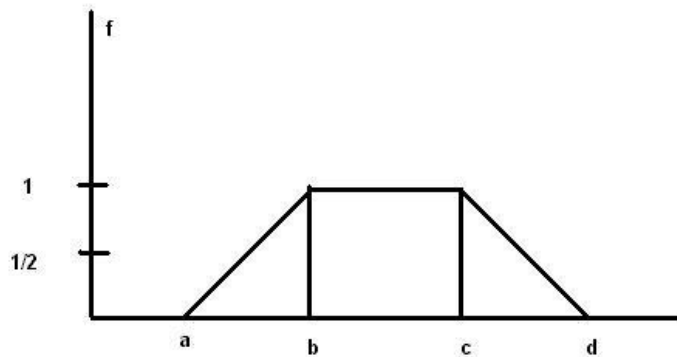
□ Termo Lingüístico T : referente a uma variável lingüística, correspondendo a um adjetivo ou a um advérbio, como “estoque baixo”, relacionado com possíveis “níveis de estoque” de uma empresa.

□ Conjunto Referencial $X \in [-\infty, \infty]$: um atributo particular de V , num conjunto de elementos $\theta \in \Theta$, como, por exemplo, “[250,750] unidades” para “nível de estoque”.

□ Grau de Pertinência $\mu_{\tilde{A}}(\theta)$: valor de pertinência de um elemento θ em relação ao conjunto de elementos, rotulado por uma variável lingüística V , e identificado pelo termo lingüístico T . Por exemplo, seja o valor de pertinência dado por um gerente a “estoque”, através do adjetivo “baixo”, envolvendo os níveis de estoque sob seu gerenciamento.

² Quando sua função de pertinência é definida neste intervalo diz-se que o conjunto é normalizado.

As funções de pertinência podem assumir diversas formas, sendo a trapezoidal (Π), ou um de seus casos particulares (como a triangular) a mais utilizada (GALVÃO et al., 1999).



$$\Pi: X \rightarrow [0,1]:$$

$$\Pi(x, a, b, c, d) = 0,$$

$$\text{se } x < a \text{ ou } (x - a)/(b - a),$$

$$\text{se } a \leq x < b, \quad 1,$$

$$\text{se } b \leq x \leq c$$

$$(d - x)/(d - c),$$

$$\text{se } c < x \leq d, \quad 0,$$

$$\text{se } x > d.$$

Figura 2: Função de pertinência trapezoidal

Existem outros conceitos³ importantes na TCD, mas não cabe aqui sua discussão, existe grande quantidade de material (alguns apontados nas referências bibliográficas deste trabalho) sobre o assunto, haja vista que não é uma teoria nova.

Risco Probabilístico e Risco Difuso (fuzzy)

A análise de risco é um grande laboratório para aplicação dos conceitos originários da Teoria dos Conjuntos Difusos, com estes conceitos a abordagem tende a ser mais realista que os modelos e métodos convencionais, que geralmente são pouco flexíveis.

A análise de um artefato ou projeto de Engenharia, geralmente de natureza física, requer a comparação entre duas variáveis comuns, uma é a solicitação λ (ou carga), a outra é a capacidade ρ (ou resistência). Naturalmente, o que se espera é que a capacidade sempre exceda a solicitação, ou seja, $\rho - \lambda > 0$, seja este um serviço simples ou complexo. Entretanto, nem sempre esta premissa é satisfeita ocasionando o que chamamos de falha.

Seja k o grau de garantia (ou coeficiente de segurança) do modelo, com $k > 1$, tem-se, $\rho = k \cdot \lambda$, sendo que ρ e λ são determinísticos. Contudo, pode-se deparar com situações em que ρ e λ sejam determinados por uma distribuição de probabilidades. Nesses casos as variáveis são denominadas aleatórias, sendo que a razão ρ / λ também é aleatória, assim como a margem de segurança M , que é a diferença $\rho - \lambda$. O risco probabilístico pode, então, ser definido como:

³ Operações, aritmética difusa, regras, transformações (fuzzification e defuzzification) etc.

$$R = P(\rho < \lambda) \quad \text{ou} \quad R = P(M < 0) \quad (3)$$

Note que P determina uma distribuição de probabilidade.

$$\tilde{M} = \tilde{\rho}(-)\tilde{\lambda} \quad (4)$$

Podemos considerar ρ e λ números difusos⁴, assim usando a definição de risco citada a priori e nos expressando em operações difusas:

O risco difuso, segundo Ganoulis (1994), pode ser definido como:

$$Rd = \frac{\int_{M < 0} \alpha(m) dm}{\int \alpha(m) dm} \quad (5)$$

Sendo:

$$\tilde{M} = \tilde{\rho}(-)\tilde{\lambda},$$

$\alpha(m)$ = função de pertinência de \tilde{M} .

É também possível uma abordagem mista, utilizando, ao mesmo tempo, variáveis aleatórias e números difusos, como, por exemplo, considerar λ uma variável e $\tilde{\rho}$ um número difuso. Nesse caso, $P(\tilde{\rho} < \lambda)$ é uma função de distribuição de probabilidades cumulativa, expressa em números difusos, ou seja, uma distribuição difusa (fuzzy probability).

Muitas variáveis em recursos hídricos têm natureza difusa ou probabilística, entre elas podemos citar vazão, nível de água, demandas etc., assim como custos e benefícios (de natureza econômica), que estão intimamente ligados com a viabilidade do projeto. Quando há dados escassos (pequenas séries estatísticas etc.) dificultando estimativas por uso de distribuições de probabilidade convencionais há a necessidade de usar estas técnicas.

As aplicações são muitas. Dentre elas pode-se citar, quantificação de danos ambientais, cálculo de riscos econômicos, graus de pertinência de impactos ambientais, cálculo de riscos ambientais difusos etc.

Aplicação de Risco Probabilístico e Risco Difuso (fuzzy)

Esta aplicação é a análise dos riscos ambientais referentes à implantação de um projeto de Engenharia em uma área verde, aqui usa-se uma estimativa dos valores antes da implementação do projeto e os possíveis valores depois do mesmo, em escala de 0 a 10 foi estimado um valor para cada fator ambiental (Tabela 9).

⁴ Um número difuso é na verdade um conjunto difuso com valores numéricos.

Tabela 9: Impacto atribuído a cada fator ambiental (antes e após a obra)

| Índice | Fator Ambiental | Depois da Obra | | | Antes da Obra | | |
|--------|-----------------|----------------|-------|-------|---------------|-------|-------|
| | | Pessimista | Médio | Ótimo | Pessimista | Médio | Ótimo |
| 1 | Fauna | 5,68 | 5,45 | 6,20 | 6,51 | 6,00 | 7,29 |
| 2 | Flora | 3,54 | 4,00 | 5,41 | 4,84 | 4,45 | 6,52 |
| 3 | Água | 4,20 | 5,00 | 6,70 | 5,78 | 4,73 | 7,17 |
| 4 | Ar | 4,70 | 4,53 | 5,93 | 4,86 | 3,47 | 6,23 |
| 5 | Solo | 5,20 | 3,80 | 6,17 | 5,80 | 5,51 | 7,54 |
| 6 | Temperatura | 4,76 | 7,10 | 6,12 | 6,45 | 7,09 | 7,19 |
| 7 | Vento | 6,20 | 6,40 | 7,26 | 7,67 | 6,73 | 8,50 |
| 8 | Erosão | 5,30 | 7,08 | 4,37 | 4,50 | 6,67 | 7,43 |
| 9 | Umidade | 6,20 | 7,45 | 8,00 | 7,72 | 5,89 | 8,07 |
| 10 | Reservatórios | 4,47 | 4,42 | 5,58 | 6,80 | 5,74 | 7,77 |

Para cada fator foi estimado um valor pessimista, provável (médio) e um valor otimista (ótimo), antes e depois da obra. Usando o conceito de número difuso triangular (NDT) calcula-se o impacto ambiental de cada fator, basta fazer a diferença entre os valores depois da obra e os valores anteriores.

$$\tilde{D}_i(-)\tilde{A}_i = \{(Pessimista_D - Pessimista_A), (Médio_D - Médio_A), (Ótimo_D - Ótimo_A)\} \quad (6)$$

Outra medida usada é a do impacto difuso médio local (em cada fator), dado por:

$$\tilde{r}_i = (Pessimista_R + Médio_R + Ótimo_D) / 3 \quad (7)$$

Figura 3: Número difuso triangular.

Calcula-se para todos os fatores o impacto difuso, depois o impacto difuso médio e a pertinência do impacto (para impactos negativos). O grau de pertinência é dado pelo ponto que intercepta o eixo da função no caso $x = 0$, $y =$ interseção do fator com o eixo de pertinência (vê gráfico do NDT).

Tabela 10: Risco difuso

| Índice | Impacto Difuso | | | Impacto Médio Difuso | Pertinência | Risco Difuso(%) |
|--------------|----------------|--------------|--------------|----------------------|-------------|-----------------|
| | Pessimista | Médio | Ótimo | | | |
| 1 | -0,83 | -0,55 | -1,09 | -0,82 | 1,00 | 20,19 |
| 2 | -1,30 | -0,45 | -1,11 | -0,95 | 1,00 | 15,29 |
| 3 | -1,58 | 0,27 | -0,47 | -0,59 | 1,00 | 8,54 |
| 4 | -0,16 | 1,06 | -0,30 | 0,20 | 1,00 | 2,21 |
| 5 | -0,60 | -1,71 | -1,37 | -1,23 | 1,00 | 15,41 |
| 6 | -1,69 | 0,01 | -1,07 | -0,92 | 1,00 | 9,94 |
| 7 | -1,47 | -0,33 | -1,24 | -1,01 | 1,00 | 12,89 |
| 8 | 0,80 | 0,41 | -3,06 | -0,62 | 0,88 | 6,99 |
| 9 | -1,52 | 1,56 | -0,07 | -0,01 | 1,00 | 4,94 |
| 10 | -2,33 | -1,32 | -2,19 | -1,95 | 1,00 | 23,07 |
| Média | -1,07 | -0,11 | -1,20 | | 1,00 | 10,96 |

Na última linha da planilha acima temos o cálculo da média dos impactos (para cada tipo). Para o grau de pertinência usa-se os conceitos básicos de geometria analítica, no caso ponto e reta. A média dos impactos é calculada simplesmente pela média aritmética, quanto às outras médias tem-se que usar o conceito de NDT, pois são na verdade números difusos (resulta de operações com números difusos). Agora se calcula o risco em cada fator, o qual é dado por:

$$R = \frac{(\mu_i + |x_{\text{Mínimo}}|)}{X_{\text{Máximo}} - X_{\text{Mínimo}}} \quad (8)$$

Onde $X_{\text{máximo}}$ é o valor de x do maior vértice (ponto em x) do triângulo formado pelo gráfico do NDT e $X_{\text{mínimo}}$ é justamente o menor valor de x para um vértice, μ_i é o grau de pertinência do fator.

A medida que interessa, na verdade, é a do risco médio difuso. Este valor é que indica o risco global da aplicação, o mesmo é calculado da mesma forma que o risco de cada fator (fórmula anterior), só que usando os valores médios de cada componente (calculados na última linha da planilha). Nesta aplicação, o risco médio difuso foi de 10,96%. Risco que pode ser considerado baixo.

CONCLUSÕES

Conclui-se que é essencial o uso das técnicas aqui apresentadas, principalmente na área de recursos hídricos e meio ambiente. Entende-se que é necessária a divulgação das técnicas aos tomadores de decisão. O modo como é aplicada a técnica influi para que o problema seja resolvido mais rapidamente. O uso de ferramentas apropriadas, como uma boa planilha de cálculo idem.

A seguir, são enumeradas algumas possíveis aplicações na área de recursos hídricos: avaliação da vulnerabilidade e risco de sistemas de reservatórios multiusos (geração de energia, abastecimento urbano de água, irrigação etc.); mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas e superficiais em bacias hidrográficas; mapeamento da vulnerabilidade e risco de enchentes em bacias urbanas e rurais; análise da incerteza na regularização de vazões em rios intermitentes de bacias de regiões semi-áridas; risco probabilístico e incerteza nas chuvas em determinada região; análise de risco e impacto ambiental na qualidade das águas de lagos e açudes tropicais; e análise de risco de secas hidrológicas em rios intermitentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, E. L. Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2000.

BELCHIOR, A. D., G. B. XEXÉO, A. R. C. ROCHA, Enfoques sobre a Teoria dos Conjuntos Fuzzy, COPPE, UFRJ, ES-430, 1997.

FREITAS, M. A. S.; ARAÚJO, E. W. O. - Análise de risco, complexidade e incerteza na tomada de decisão em recursos hídricos e meio ambiente, Anais do II Encontro de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade de Fortaleza, abril de 2002.

GALVÃO, C. O., M. J. S. VALENÇA (ed.) Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais, ABRH, Ed. da Universidade UFRGS, 1999.

GANOULIS, J. G. Engineering Risk Analysis of Water Pollution – Probabilities and Fuzzy Sets, Germany: VCH, Weinheim, 1994.

HARR, M. E. , Reliability-Based Design in Civil Engineering, McGraw-Hill Book Company, 1987.

KLIR, G. J., Principles of uncertainty: What are they? Why do we need them?, Fuzzy Sets and Systems, 74, 15-311, 1995

PORTO, R.L.L et al - Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos, 1ª ed, ABRH/UFRGS, 1997.

VIEIRA, V. P. B. Avaliação Quantitativa de Riscos Econômicos e Ambientais, In: Sistemas Inteligentes: Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais, Ed. ABRH/Ed. Univ. UFRS, Porto Alegre, 1999.

VIEIRA, V. P. B. Risk Assessment in the Evaluation of Water Resources Projects, Dissertação de Doutorado, Colorado State University, 1978.

YEN, B. C. Stochastic methods and reliability analysis in water resources, Adv. Water Resources, vol. 11, 1988.

ZADEH, L. – Optimality and no scalar valued performance criteria, IEEE Transactions on Automatic Control, v.59, n.8, 1963.

Nota: As opiniões apresentadas neste artigo são de responsabilidade do seu autor, podendo não significar postura ou atitude da Agência Nacional de Águas – ANA.