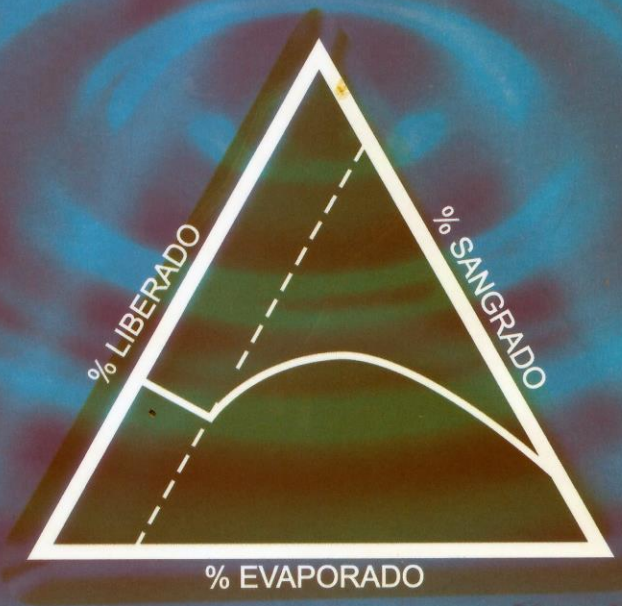
Dimensionamento de Reservatórios

O Método do Diagrama Triangular de Regularização



Nilson Campos

Dimensionamento de reservatórios

O método do diagrama triangular de regularização

Nilson Campos

Dimensionamento de reservatórios

O método do diagrama triangular de regularização

Fortaleza – Ceará

2015

© Copyright – 2015 by José Nilson B. Campos

Coordenação Editorial Nilson Campos

Projeto Gráfico e Capa Nilson Campos

Catalogação

Bibliotecária: Aparecida Porto

CRB -3/770

Campos, José Nilson B.

C21d Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização/Nilson Campos.

Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2005.

112p.

1. Reservatórios – águas I. Título

ISBN: 85-7563-100-4 CDD: 627.8

Índice para Catálogo Sistemático

1. Água – armazenagem: 627.8
2. Engenharia dos reservatórios: 627.8
3. Recursos Hídricos: 627.8
4. Reservatórios: 627.8

Agradecimentos

Tudo se constrói a partir de alguma coisa e, a menos dos poderes de Deus, nada se constrói do nada. Também, nada se constrói sozinho. A solidão é necessária para o pensar. A colaboração e parcerias são indispensáveis para o crescer e o realizar. O sucesso de um empreendimento tem vários autores que não devem ser esquecidos. Dessa forma, quero agradecer:

À família que me criou, e com a qual fui criado, meu pai Nanges Campos, minha mãe, Alice Bezerra Campos e meus irmãos Neuma, Neide, Newton e Nelson. Vocês fizeram, e mesmo os que se foram, ainda fazem parte de minha vida.

À família que construí em parceria com minha Rosemary. Aos meus queridos filhos: minhas joias, grande e pequena, Luciana e Vanessa, e a meu pequeno rapaz Ricardo. Ao meu genro Fábio e minha nora Lícia que se juntaram como tanto amor à nossa família.

A meus professores que me ensinaram o valor do saber. A todos agradeço em nome dos que me ensinaram as disciplinas de recursos hídricos: Vicente Vieira, Genésio Martins, Antônio Gouveia, Francisco Matias Filho, Neil Grigg e José Salas.

A meus colegas e alunos que me ajudaram na construção dos conhecimentos que estão inseridos no livro: Ticiana Studart, com sus excelente tese de doutorado e sua constante parceria em muitos trabalhos, a Francisco de Assis de Souza Fiolho, Henrique Lima e José Carlos de Araújo, parceiros do em trabalhos sobre

incertezas. A Luís Sérgio do Nascimento por parcerias em trabalhos sob as formas de reservatórios.

Ao Departamento Nacional de Obras Contra as Secas, onde tomei contato com problemas do Semiárido e com a busca de soluções. Foi durante meu período nessa instituição que iniciei o desenvolvimento dos fundamentos utilizados na construção do DTR. O DNOCS prestou inumeráveis serviços à sociedade brasileira, foi a instituição onde foi construída a base metodológica e empírica da Hidrologia do Nordeste brasileiro.

À Universidade Federal do Ceará, instituição que me acolheu durante muitos anos e onde consegui grandes parceiros para o desenvolvimento de muitas pesquisas e estudos. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, ambiente propício para atrair muitos estudantes para trabalhar e pesquisar o tema recursos hídricos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Metodológico, por propiciar recursos para o desenvolvimento de várias pesquisas para a construção do conhecimento.

Existem duas coisas simples: relatar o passado e predizer o futuro. Mas, ver com clareza um dia depois do outro – essa já é uma outra questão.

Armand Salacrov

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 17
1.1 Objetivos do livro 19
1.2 Escopo 19
1.3 Organização do livro 20
2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS 22
2.1 A abordagem universal 23
2.2 A abordagem regional: rios intermitentes do Nordeste brasileiro 26
2.2.1 O trabalho de Francisco de Aguiar – estimativa de deflúvios 27
2.2.2 A análise do método de Aguiar 29
2.2.3 A capacidade do reservatório segundo Aguiar 30
2.2.3 A capacidade do reservatório segundo Aguiar 31
3. DESENVOLVIMENTO DO DIAGRAMA TRIANGULAR DE REGULARIZAÇÃO 41
3.1 Definições básicas 42
3.2 Construção dos diagramas triangulares 45
3.2.1 Geração sintética dos deflúvios. 45
3.2.2 A equação do balanço hídrico do reservatório 46
3.3 O diagrama triangular de regularização 50
4. APLICAÇÕES DO DIAGRAMA TRIANGULAR DE REGULARIZAÇÃO 53
4.1 O diagrama triangular de regularização 53
4.2 Etapas do dimensionamento 54

4.3 Estudo de caso: o açude Pereira de Miranda 55
4.3.1 Cálculo das disponibilidades em Pereira de Miranda 56
4.4. As trocas evaporação, sangria e regularização. .. 59
4.4.1 Efeito da variação da capacidade do reservatório. 59
4.4.2 Efeito da variação do fator adimensional de evaporação..... 62
5. SOBRE A EFICIÊNCIA DE PEQUENOS E GRANDES RESERVATÓRIOS 65
5.1 O papel do fator adimensional de evaporação 66
5.2. Os estudos empíricos 67
5.2.1 – A Pesquisa na bacia do rio Jaguaribe 68
Obtenção dos dados hidrológicos e morfométricos 68
5.2.2 – A Pesquisa com 67 reservatórios do Nordeste . 72
5.3 Síntese..... 73
6. INCERTEZAS EM DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS 78
6.1. Uma tipologia de incertezas..... 79
6.2 A variabilidade dos deflúvios no dimensionamento: análise histórica 80
6.3 O coeficiente de variação e o tamanho da série de observações 82
6.4 Estudo de caso: reservatório do Castanhão 83
6.4.1 Variabilidades da vazão regularizada 85
6.4.2 Sobre A Vazão Regularizada em Estado De Equilíbrio..... 86
6.4 Síntese do capítulo 87

7. AS FORMAS DOS RESERVATÓRIOS E A VAZÃO REGULARIZADA 91
7.1 Representação da curva cota x volume por equações 92
7.1.1Os modelos matemáticos analisados 92
7.1.2 Comparação entre os modelos..... 94
7.1.3 Síntese da seção..... 97
7.2. As classes dos lagos segundo Hånkanson 97
7.2.1 Classes de reservatórios segundo Hånkanson: um estudo de caso..... 101
7.2.2 Erros na estimativa da vazão regularizada segundo a forma do reservatório 101
7.3 Síntese do capítulo 102

PREFÁCIO

A aceitação do livro dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização, por muitos setores da academia e da prática da Engenharia, foi a principal motivação para rever, ampliar e publicar um novo livro. Nesta edição foram introduzidos conceitos e resultados obtidos de pesquisas após a publicação do Livro em 1996.

A linha de pesquisa foi continuada com a colaboração de muitos colegas professores, estudantes de Doutorado e Mestrado e alunos de iniciação científica. Nesse processo, cabe ressaltar os auxílios recebidos em vários projetos do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico (CNPq) e Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (FUNCAP).

Os principais tópicos inseridos foram: Os procedimentos de cálculo do fator de forma dos reservatórios baseado em várias pesquisas com reservatórios do Nordeste brasileiro; A contextualização do volume regularizado em estado de equilíbrio dentro dos conceitos de incertezas hidrológicas e considerando-se os regimes dos rios do Nordeste; Os conceitos de morfometria, formas de reservatórios segundo a classificação de Hånkanson foram inseridos. As relações entre a classificação de Hånkanson e a avaliação dos volumes regularizados por reservatórios constitui-se uma novidade na literatura da Hidrologia.

Esperamos que essas contribuições desenvolvidas no âmbito da Universidade Federal do Ceará possam ser de bom uso para fins didático e de aplicações em Engenharia, em instituições que lidam com o Gerenciamento de Recursos Hídricos.

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais problemas enfrentados por planejadores de recursos hídricos diz respeito ao entendimento do processo de transformação temporal e espacial dos deflúvios, providos de maneira irregular pela natureza, para atender aos padrões de consumo de água requeridos pela Sociedade. Desde os primórdios da civilização, a técnica da estocagem de águas em reservatórios barragens tem sido utilizada para essa finalidade. Dessa maneira, quanto maior o entendimento desse processo, mais econômicos e eficientes serão as obras hídricas projetadas.

Um reservatório superficial, ou açude, consiste em uma intervenção do Homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios aos padrões demandados pela sociedade. O açude atua como um veículo que transporta a água ao longo do tempo: os excedentes dos períodos úmidos são estocados para uso nos períodos de estiagem (Figura 1.1).

As águas dos deflúvios naturais retidas pelos reservatórios dele efluem de três formas distintas: por evaporação a partir da superfície do lago; por sangria através do vertedouro e através da tomada de água, para ser usada pela sociedade.

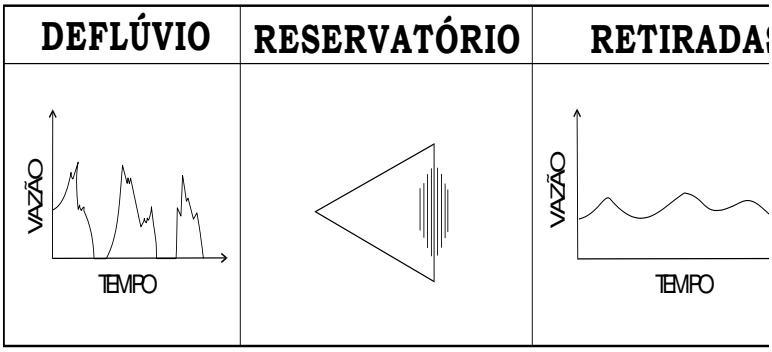


Figura 1.1 Representação esquemática do funcionamento de um reservatório

A sangria forma a parte dos deflúvios a qual o reservatório, por ser de tamanho finito, não consegue controlar. As águas extravasadas retornam ao leito do rio a jusante e, caso não sejam usadas ou armazenadas em outro reservatório, transformam-se em perdas da bacia hidrográfica para o oceano. Contudo, no percurso para o oceano, essas águas executam um papel de diluição de possíveis poluentes que sejam lançados no leito dos rios.

A águas evaporadas a partir do lago consistem em perdas irreversíveis da bacia hidrográfica. Essas águas são transferidas para a atmosfera para, em algum outro lugar não previsível, retornarem à superfície da terra sob alguma forma de precipitação. No contexto do Nordeste Semiárido essas perdas são consideradas indesejáveis pelo pouco benefício que prestam ao local onde ocorrem. Talvez o maior benefício desse processo seja o microclima formado em torno do lago. Contudo, essas perdas devem ser entendidas como um inevitável preço a ser pago pelo transporte da água ao longo do tempo. Pois, guardar a água para as secas é uma política adotada pelos sertanejos e gestores de água, necessárias devido à grande variabilidade dos rios da região. A crítica feita aos sertanejos por manterem os açudes evaporando é infundada. Afinal, eles é que vão enfrentar as agruras das secas quando elas vierem. A estratégia mais eficaz para reduzir as perdas por evaporação começa com a escolha adequada do local onde construir a barragem.

As águas regularizadas constituem a parte dos deflúvios naturais, controladas pelo açude, que proporcionam benefícios à sociedade. A regularização pode ser entendida como um ajustamento da oferta à demanda. A demanda em água se dá em um determinado local, em tempo específico, com um dado padrão de qualidade. Nos locais de clima de duas estações, como o Nordeste, a quase totalidade da demanda ocorre na estação seca, enquanto que as disponibilidades naturais acontecem na estação úmida. Essa regularização de águas é que torna possível a sobrevivência de razoáveis contingentes humanos nos sertões do Semiárido. Regularizar a máxima quantidade de água, respeitando as limitações impostas pela natureza e pela economia do País, deve se constituir um objetivo do hidrólogo projetista de açudes no Semiárido.

1.1 Objetivos do livro

O presente trabalho apresenta a metodologia de dimensionamento hidrológico de açudes que reúne simplicidade, completude e uma boa base teórico-conceitual. A simplicidade e completude foram atingidas com o desenvolvimento do Diagrama Triangular de Regularização (DTR), inspirado no Diagrama de Classificação de Solos do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. A base teórica provém da aplicação dos modernos métodos da hidrologia estocástica e de conceitos clássicos da hidrologia determinística.

O DTR, além de instrumento para o dimensionamento hidrológico, pode ser usado para entender as trocas regularização x evaporação x sangria que ocorrem no processo de estocagem de águas superficiais. Além desses objetivos, e como aplicação do método, procurou-se contribuir à resposta de algumas questões clássicas que vêm sendo debatidas entre estudiosos do Nordeste. Dentre essas estão incluídas: pequenos ou grandes açudes, quais os mais eficientes; as causas que fizeram os técnicos da região adotar a prática de dimensionar os açudes com capacidade de acumular duas vezes o volume afluente anual.

1.2 Escopo

O método do DTR aborda o comportamento de um reservatório isolado alimentado por deflúvios anuais serialmente independentes. Para

avaliar a operação do reservatório, foi utilizada a regra do modelo mutuamente exclusivo que considera o ano dividido em duas estações: a úmida e a seca. Na estação úmida ocorrem todas as entradas de água no sistema e saídas só ocorrem por sangria no vertedouro; na estação seca ocorrem as retiradas para fins utilitários e as perdas por evaporação. Admitiu-se também que durante a estação úmida as perdas por evaporação oriundas do espelho d'água seriam compensadas pela precipitação pluvial sobre a bacia hidráulica. A retirada e a evaporação foram consideradas constantes ao longo dos anos. O volume regularizado foi calculado para o caso de uma garantia anual de 90%.

1.3 Organização do livro

O Capítulo II mostra uma breve retrospectiva histórica sobre o desenvolvimento da teoria da estocagem de águas segundo dois enfoques: o primeiro, de caráter universal, aborda os principais marcos no desenvolvimento da Teoria; o segundo discorre sobre a história específica da evolução dos métodos de dimensionamento de açudes nos rios intermitentes do Nordeste Semiárido.

O Capítulo III apresenta os conceitos e definições básicas seguidos por uma descrição da metodologia. Apresenta-se, com destaque, a descrição dos modelos de geração das séries sintéticas de vazões bem como o método empregado na solução da equação do balanço hídrico do reservatório. Segue-se a fundamentação teórica para o desenvolvimento do diagrama triangular de regularização.

O Capítulo IV apresenta os resultados obtidos na pesquisa e um resumo das principais conclusões auferidas. São feitas algumas aplicações qualitativas e quantitativas da metodologia. Questões clássicas do processo de estocagem de águas são analisadas sob a ótica do Diagrama Triangular de Regularização.

O Capítulo V apresenta a aplicação da equação adimensional do balanço hídrico de um reservatório na busca de colaborar com os conhecimentos científicos sobre o secular debate sobre a pequena e grande açudagem. São apresentados resultados de duas pesquisas desenvolvidas com reservatórios do Semiárido brasileiro. O fator adimensional de evaporação é um indicador chave nessa questão.

O Capítulo VI apresenta conceitos básicos sobre incertezas em recursos hídricos e particularmente em Engenharia Hidrológica. Os conceitos de variabilidade dos volumes regularizados e de estado de equilíbrio são apresentados.

O Capítulo VII trata da simplificação do modelo ao representar a morfometria do reservatório/lago por equações matemáticas. Os resultados de pesquisas indicando a melhor maneira de obter a equação matemática são apresentados.

2. MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

O dimensionamento de um reservatório é um processo de tomada de decisão. Uma pessoa, ou um grupo de pessoas, com conhecimentos das condições sociais, ambientais, políticas, econômicas e de engenharia, decidem qual o tamanho de um determinado reservatório que melhor atende aos objetivos que lhe são atribuídos. Esse processo pode ser visto nas seguintes etapas: 1) coletam-se os dados; 2) transformam-se os dados em informações através da análise; 3) através da síntese as informações são transformadas em conhecimento; 4) adicionando-se ao conhecimento, a experiência e a capacidade de julgamento dos decisores, respeitando-se a ética, pode-se chegar a uma sábia decisão. Assim, chega-se ao tamanho do reservatório que melhor atende as suas finalidades aos menores custos financeiro, social e ambiental.

Do ponto de vista da engenharia, o processo tem duas fases principais: a fase hidrológica na qual são avaliadas alternativas possíveis de capacidades dos reservatórios e suas consequências em termos de vazão regularizada e volume acumulado. Nessa fase são traçadas as curvas do sistema sintetizando as relações entre capacidade, vazão regularizada e garantia do fornecimento de água. Em uma segunda fase incorporam-se os conhecimentos dos hidráulicos, geotécnicos, engenheiros ambientais, sociólogos e hidrólogos e são avaliados os benefícios e os custos das alternativas.

A partir desse ponto, busca-se a síntese, ou o conhecimento propriamente dito, para que os gestores públicos e futuros usuários da obra, possam tomar uma sábia decisão.

O presente capítulo apresenta um resumo dos métodos de dimensionamento de reservatórios. A apresentação é feita sob duas óticas: a dos conceitos gerais, desenvolvidos ao longo do mundo que, por razões evidentes, prioriza as condições de rios perenes; a dos conceitos regionais desenvolvidos para o Nordeste brasileiro que aborda rios intermitentes sujeitos a altas taxas de evaporação. Busca-se propiciar aos leitores interessados alguns conhecimentos que os permitam enveredar no campo da teoria do dimensionamento e operação de reservatórios; teoria que cresce em importância à medida que as águas se tornam mais escassas.

2.1 A abordagem universal

O primeiro grande marco na teoria de dimensionamento de reservatórios se deu na Inglaterra quando Rippl (1883) apresentou o diagrama de massas. A técnica proposta por Rippl usava implicitamente o conceito de reservatório de tamanho infinito e tinha aplicação restrita a locais onde a evaporação fosse desprezível. O método de Rippl estima a capacidade de um reservatório necessária para regularizar uma vazão igual à vazão afluente média anual. O método rapidamente obteve rápida aplicação e ainda hoje, decorrido mais de um século, mantém muitos simpatizantes.

Seguindo essa linha, diversos trabalhos relevantes contribuíram ao aperfeiçoamento da metodologia, podendo ser citados: Hazen (1914), Sudler (1924) e Hurst (1950). Hurst quando responsável pelo dimensionamento dos grandes lagos da bacia do Rio Nilo, desenvolveu os conceitos de "range" e déficit. A partir de então, o método de Rippl recebeu um novo tratamento e passou do empírico para o racional. Hurst criou a hoje denominada teoria

do *range*. Vários pesquisadores atuaram nessa teoria, dentre esses o Prof. Fujicai Yevjevich é o grande expoente.

Contudo, talvez por herança do método de Rippl desenvolvido em regiões temperadas, a teoria do *range* não tratava devidamente o problema da evaporação. A aplicação dessa nova teoria às regiões de climas quentes e rios intermitentes requeria adaptações e a introdução de "correções. É interessante observar que Hurst, em seu trabalho original, argumentou que em locais onde a evaporação fosse muito acentuada, a construção de reservatórios superficiais não seria justificável.

Uma nova e revolucionária abordagem nos estudos de reservatórios se deu com o trabalho de Moran (1954). Moran, baseado em hipóteses que retratavam a natureza dos rios intermitentes do norte da Austrália, desenvolveu a teoria do armazenamento (*theory of storage*), que posteriormente passou a ser denominada teoria estocástica dos reservatórios. A teoria de Moran admite que o volume estocado por um reservatório segue uma cadeia Markoviana para, a partir desse conceito, calcular as probabilidades de esvaziamento dos reservatórios (não mais frequências empíricas sujeitas a grandes variações amostrais). O trabalho de Moran chamou a atenção dos estudiosos do assunto e, seguindo seus passos, muitos contribuíram com suas pesquisas ao aperfeiçoamento da teoria.

Alguns pesquisadores criticaram o trabalho de Moran afirmando que o modelo por ele proposto "só se aplicava aos rios intermitentes". Tratava-se, evidentemente, de uma visão parcial

do problema[1] visto que a correção veio com a introdução de modelos que só se aplicavam aos rios perenes.

Uma outra linha metodológica, com larga aplicação no dimensionamento dos reservatórios, desenvolveu-se maneira lenta e reuniu os avanços da teoria das probabilidades e a evolução, em capacidade e velocidade, dos computadores digitais: são os chamados métodos experimentais ou simulações Monte Carlo (Yevjevich, 1967). Esses métodos consistem em admitir que os deflúvios naturais obedecem a uma determinada lei de probabilidade (log-normal, gama, modelos autor-regressivos, etc.), e a partir de aí gerar traços sintéticos de vazões e simular a operação do reservatório. A análise do desempenho do reservatório através de simulações fornece os elementos necessários à tomada de decisão sobre sua capacidade. A grande vantagem do método Monte Carlo é a versatilidade da técnica de simulações que permite ensaiar quase que qualquer regra que se possa imaginar para operação de um reservatório.

Segundo Yevjevich (1967), os métodos de dimensionamento de reservatórios podem ser classificados em: empíricos, analíticos e experimentais. Classificam-se como empíricos aqueles relacionados aos períodos críticos ou a uma série histórica - o diagrama de Rippl e a simulação de operação do reservatório com a série histórica de observações podem ser enquadrados nessa classe. Os métodos empíricos são considerados na literatura científica como os mais pobres dos três acima referidos.

1Quando um cientista faz hipóteses simplificadoras da natureza com vistas a reproduzi-la através de equações, ele tem dois objetivos: tornar os cálculos matemáticos computacionalmente viáveis e não se afastar demasiadamente da "vida real." Entretanto, a vida real de cada pessoa vem do ambiente que a rodeia. Como o desenvolvimento científico se deu, quase que totalmente, em climas temperados havia o preconceito que toda teoria devia contemplar àquela condições ambientais.

Classificam-se como analíticos os métodos que assumem que os deflúvios seguem uma dada lei de probabilidade (log-normal, gama, modelos autor-regressivos, etc.) e calculam o desempenho do reservatório através de cálculos analíticos. Esses métodos apresentam como limitação a impossibilidade de tratarem regras de operação complexas. A teoria de matrizes de transição (Moran 1954, 1955) e a teoria do *range* (HURST 1950) estão inseridas nessa classe.

Os métodos experimentais são os que admitem que os deflúvios seguem uma certa lei de probabilidade, geram séries sintéticas de vazões e executam a operação simulada do reservatório. Para esses métodos, a própria capacidade do reservatório para atender com uma dada garantia uma certa retirada é uma variável aleatória. A limitação desses métodos consiste no esforço computacional requerido, principalmente quando os deflúvios apresentam uma alta variabilidade interanual. Contudo, o grande avanço nos recursos computacionais tem atraído mais e mais aplicações nessa metodologia.

Yevjevich et al. (1965) argumentaram que a tendência universal no dimensionamento de reservatórios seria a aplicação dos métodos experimentais com o auxílio dos métodos analíticos, pois estes poderão reduzir os esforços computacionais daqueles. De fato, hoje, mais de 50 anos após a previsão de Yevjevich os métodos experimentais continuam ganhando espaço. Porém, muitos estudos ainda se resumem aos métodos empíricos e pouco se vê da associação entre métodos analíticos e experimentais.

2.2 A abordagem regional: rios intermitentes do Nordeste brasileiro

O primeiro grande reservatório construído no Nordeste brasileiro foi o açude Cedro. Na época em que foi projetado, havia inúmeras carências nos aspectos técnicos, recursos humanos e de

informações básicas sobre a hidrologia regional. Dessa maneira somente a sorte, que acabou por não acontecer, poderia fazer com que àquele reservatório fossem dadas dimensões ideais segundo os padrões da Hidrologia moderna. O Cedro teve seu primeiro projeto elaborado pelo Engenheiro Jules Revy em 1882. No ano de 1889 a Comissão de Açudes e Irrigação do Governo Federal fez algumas modificações no projeto que foi iniciado em 1890. O açude foi concluído em 1906 com capacidade para acumular 126 hm^3 que equivale, segundos dados conhecidos em 1979, a oito vezes o volume afluente médio anual, caracterizando um superdimensionamento.

A base de informações para o desenvolvimento da técnica de dimensionamento de reservatórios no Nordeste nasceu com a criação, em 1908, da Inspetoria de Obras Contra as Secas (IOCS), hoje Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). A partir de então teve início um processo de instalação das redes fluviométricas e pluviométricas no Nordeste que permitiram a formação de uma base de dados para dimensionar e gerenciar os reservatórios da região.

2.2.1 O trabalho de Francisco de Aguiar – estimativa de deflúvios

O primeiro marco da história dos métodos de dimensionamento de açudes no Nordeste brasileiro é, sem sombras de dúvidas, o trabalho do Engenheiro Francisco de Aguiar (1934). Aguiar atuou, principalmente, em três linhas: 1) na estimativa do volume afluente médio anual em uma dada bacia hidrográfica; 2) no desenvolvimento de um método para determinar a capacidade e o volume regularizado por um açude; 3) na determinação da cheia secular que deve ser considerada no dimensionamento do vertedouro de um açude.

Estimativa do deflúvio anual - Com base em algumas observações de chuvas e vazões escoadas Aguiar desenvolveu uma fórmula polinomial que permite o cálculo da lâmina escoada média uma bacia hidrográfica conhecidas a precipitação média e a características geomorfológicas da bacia. A fórmula, bastante simples, ganhou imediatamente uma aceitação geral e até hoje ainda tem alguns adeptos. Entretanto, a não ser por uma questão de balizamento, já não é possível, ou justificável, o dimensionamento de um açude de algum porte através dessa relação[2].

A fórmula de Aguiar tem a forma

$$Rmm = 28{,}53H - 112{,}95H^2 + 351{,}91H^3 - 118{,}74H^4 \quad (2.1)$$

onde ***H*** denota a pluviosidade média anual na bacia hidrográfica em metros; ***Rmm*** representa a lâmina média escoada na bacia hidrográfica.

Para levar em consideração a geomorfologia da bacia hidrográfica, Aguiar introduziu um coeficiente de correção do rendimento do escoamento superficial ***U*** cujos valores constam na Tabela 2.1.

Dessa forma, o volume médio escoado em uma bacia hidrográfica pode ser estimado pela relação

$$V_a = (1/1000) \times Rmm \times U \times S \quad (2.2)$$

onde V_a denota o volume afluente médio anual em metros cúbicos e ***S*** a área da bacia hidrográfica em metros quadrados, ***Rmm*** a

---

2Aguiar foi tão importante para o desenvovimento dos estudos hidrológicos do Nordeste que mantém fãs incondicionais que consideram um desrespeito a substituição da sua fórmula. Entretanto, deve-se considerar a intervenção do homem nas bacias hidrográficas. Uma bacia hidrográfica com diversos açudes já não pode ser vista como algo muito simples. Estudá-las requer os conhecimentos de um especialista em Hidrologia.

lâmina anual média escoada na bacia em milímetros e ***U*** fator de correção que introduz fatores geomorfológicos da bacia hidrográfica.

Tabela 2.1 Valores do coeficiente de correção do escoamento superficial para diferentes classes de bacias hidrográficas segundo Aguiar

TIPO	BACIA HIDROGRÁFICA	U
1	**Pequena íngreme e rochosa**	**1,3 e 1,4**
2	**Bem acidentada sem depressões evaporativas**	**1,2**
3	**Média**	**1**
4	**Ligeiramente acidentada**	**0,8**
5	**Idem, com depressões evaporativas**	**0,7**
6	**Quase plana, terreno argiloso**	**0,65**
7	**Idem, terreno variável**	**0,6**
8	**Idem, terreno arenoso**	**0,5**

2.2.2 A análise do método de Aguiar

Esta seção apresenta uma análise crítica do método de Aguiar, considerando-o no tempo e no espaço no qual foi concebido. A análise é feita em dois segmentos: o primeiro contempla a fórmula polinomial que determina a lâmina escoada na bacia hidrográfica; o segundo aborda a sistemática de determinação da capacidade de acumulação de um açude.

A fórmula polinomial do escoamento superficial - A fórmula foi desenvolvida na época em que predominavam as fórmulas empíricas e, como tal, tinha as limitações das fórmulas: empíricas, ou seja, validade restrita às condições das observações dos dados usados na sua geração. No caso, tratava-se de bacias cristalinas em seções de rios sem importantes barragens a montante. Dentro

desse contexto, o que se tem observado, com os dados hoje disponíveis é que as lâminas escoadas calculadas pela fórmula de Aguiar não levam a valores destoantes em relações aos valores observados, para bacias com pouca interferência antrópica.

Campos e Lima (1994) avaliaram a aplicação da fórmula polinomial de Aguiar comparativamente a 13 bacias com observações fluviométricas (Tabela 2.2). Examinando-se a tabela, observa-se que os erros maiores ocorreram em bacias parcialmente sedimentares do alto Jaguaribe. Observe-se, entretanto que essas bacias foram tratadas como médias e para bacias planas ou quase planas, Aguiar recomendava um coeficiente de correção variando de 1,40 a 0,50. Para as bacias cristalinas, o maior erro foi de 12,6%, que, para uma fórmula empírica de hidrologia, pode ser considerado muito pequeno. Pode-se concluir que a fórmula polinomial de Aguiar é um excelente indicador do escoamento superficial de bacias cristalinas do Vale do Jaguaribe.

2.2.3 A capacidade do reservatório segundo Aguiar

Para determinar a capacidade de um açude Aguiar propôs a seguinte metodologia:

1. Seleciona-se uma série de precipitações anuais na bacia hidrográfica a estudar;
2. Ordena-se em forma crescente e divide-se a série de chuvas em duas partes: a série de máximas com média HM e a série de mínimas com média Hm;
3. Calculam-se, pela fórmula do polinomial, as respectivas lâminas escoadas R_M e Rm;
4. Calcula-se o volume acumulável multiplicando-se a lâmina das máximas RM pela área da bacia hidrográfica;
5. Calcula-se o volume regularizável, multiplicando-se a lâmina das mínimas, ***Rmm***, pela área da bacia hidrográfica.

Aguiar considerou que três fatores determinam a capacidade de um reservatório: a intermitência, o volume afluente médio e a variabilidade dos deflúvios anuais. Argumenta ele que se todos os anos os deflúvios fossem iguais, um açude com capacidade igual ao deflúvio médio anual seria capaz de reter todas águas da estação úmida para usá-las na estação seca. A certeza que escoaria um volume V_a tornaria desnecessário manter um estoque de águas para uso interanual.

O afastamento da lâmina média das máximas para média das médias é que efetua a estocagem para compensar a variabilidade interanual. Se dois locais têm o mesmo valor para o deflúvio médio anual, o local de maior variabilidade terá, certamente, um maior valor para a média das máximas e, consequentemente, irá requerer uma maior capacidade de acumulação. Em resumo, o método de Aguiar para dimensionamento da capacidade de um açude, embora empírico, apresentava base conceitual.

2.2.3 A capacidade do reservatório segundo Aguiar

Para determinar a capacidade de um açude Aguiar propôs a seguinte metodologia:

- Seleciona-se uma série de precipitações anuais na bacia hidrográfica a estudar;
- Ordena-se em forma crescente e divide-se a série de chuvas em duas partes: a série de máximas com média HM e a série de mínimas com média Hm;
- Calculam-se, pela fórmula polinomial, as respectivas lâminas escoadas R_M e Rm;
- Calcula-se o volume acumulável multiplicando-se a lâmina das máximas R_M pela área da bacia hidrográfica;

- Calcula-se o volume regularizável, multiplicando-se a lâmina das mínimas, ***Rmm***, pela área da bacia hidrográfica.

Tabela 2.2: Coeficientes de rendimento em 13 bacias do vale do Jaguaribe segundo Aguiar e segundo a SUDENE

Bacia hidrográfica	Chuva média (mm)	Rendimento SUDENE	RendimentoAguiar	Erro (%)
Arneiroz	594	6,2	6,3	1,6
Jucás*	610	6,4	6,5	+1,6
Cariús*	763	9,6	8,3	-10,4
Suassurana	689	8,3	7,8	-6,0
Patu	817	9,4	10,4	+10,6
Senador Pompeu	703	8,7	8,1	-7,4
Quixeramobim	785	8,7	9,7	+11,5
Cedro	778	9,5	9,5	0
Pedras Brancas	743	9,7	8,8	-9,3
Orós	671	7,3	7,5	+2,7
Lavras-Patos *	893	6,2	12,2	+96,8
Içó *	876	7,4	11,8	+59,4
Joaquim Távora	718	9,3	8,3	-10,7
Nova Floresta	718	9,5	8,3	-12,6
Riacho do Sangue	696	8,5	7,9	-1,6

Os dados referem-se à década de 1960.
* bacias parcialmente sedimentares

Aguiar considerou que três fatores determinam a capacidade de um reservatório: a intermitência, o volume afluente médio e a variabilidade dos deflúvios anuais. Argumenta ele que se todos os anos os deflúvios fossem iguais, um açude com capacidade igual ao deflúvio médio anual seria capaz de reter todas águas da estação úmida para usá-las na estação seca. A certeza que escoaria um volume V_a tornaria desnecessário manter um estoque de águas para uso interanual.

O afastamento da lâmina média das máximas para média das médias é que efetua a estocagem para compensar a variabilidade interanual. Se dois locais têm o mesmo valor para o deflúvio médio anual, o local de maior variabilidade terá, certamente, um maior valor para a média das máximas e, consequentemente, irá requerer uma maior capacidade de acumulação. Em resumo, o método de Aguiar para dimensionamento da capacidade de um açude, embora empírico, apresentava base conceitual.

EXERCÍCIO 01 – Utilizando o método de dimensionamento do Engenheiro Aguiar estime a capacidade de acumulação e o volume anual regularizado para o açude Piranhas na Paraíba, considere os dados de precipitação pluvial e morfométricos apresentados em seguida.

Área da bacia hidrográfica (S) = 1.120 km^2;

Coeficiente de rendimento da bacia (U) = 1,0;

A série histórica de precipitações anuais na bacia na Tabela 2.3

Solução

1- Ordenar a série em ordem ascendente de formas a criar duas subséries: a) uma formada pelos 10 valores maiores, denominada série de máximos; b) outra formada pelos 10 valores menores, denominada série de mínimos.

2- Calcular a médias H, H_M e H_m relativas às séries: total, de máximas e de mínimas respectivamente.

$H = 911,2$ mm

$H_M = 1189,8$ mm

$H_m = 632,7$ mm

Tabela 2.3 Séries históricas de precipitações pluviométricas anuais, Piranhas –Açu, utilizada por Aguiar no dimensionamento do reservatório.

Ano	Precipitação (mm)	Ano	Precipitação (mm)
1913	1151,6	1923	808,0
1914	804,5	1924	1779,1
1915	523,3	1925	1041,2
1916	1252,3	1926	891,6
1917	1304,3	1927	760,2
1918	1109,5	1928	561,2
1919	218,7	1929	1220,1
1920	861,7	1930	660,6
1921	1000,6	1931	683,0
1922	1147,3	1932	446,0

3- Calcular, usando a fórmula de rendimento da bacia hidrográfica, os volumes afluentes médio (Va), da série de máximas (V_M) e da série de mínimos (V_m)

$$Va = R(mm) \times U \times S,$$

$$V_M = R_M(mm) \times U \times S,$$

$$V_m = R_m(mm) \times U \times S.$$

Sendo ***R*** calculado pela equação 2.1, U igual a 1,0 e ***S*** = 1120 km^2.

Após homogeneizar as unidades, obtém-se:

Volume acumulável = 256 Mm^3,

Disponibilidade anual = 48 Mm^3,

Volume afluente anual = 131 Mm^3.

2.2.4 A prática de dimensionamento de reservatório do DNOCS

O DNOCS, como principal órgão de projeto e construção de barragens no Nordeste Brasileiro, definiu muitas práticas de projeto para o Semiárido. A partir de algum tempo posterior ao trabalho de Aguiar, o DNOCS passou a dimensionar açudes através da seguinte metodologia:

1) Determinar, pela fórmula do Engenheiro Aguiar, do volume médio anual escoado ao açude (V_a);

2) Fazer a capacidade do açude igual a duas vezes o volume afluente anual ($2V_a$).

Nesse ponto houve, para fins de dimensionamento de açudes, uma valorização do lado empírico em detrimento da linha mais conceitual já iniciada pelo trabalho de Aguiar. Caminhou-se, fortemente, em direção à simplicidade. Provavelmente foi essa simplicidade que fez com que essa prática ganhasse imediatamente aceitação e longevidade.

Contudo, não se pode dizer que os resultados da aplicação dessa prática tenham sido danosos ao Nordeste. A observação mostrou que o $2V_a$ resultou em açudes que nem sangram com alta frequência, quase anual, deixando *escapar* muita água para o mar, nem com baixa frequência, um ano em cada cinco ou mais, com indícios de superdimensionamento. Pode-se dizer que o $2V_a$ já cumpriu o seu papel. Resta à comunidade técnica agradecê-lo e partir para frente.

Deve-se, todavia, ter em mente que um açude é uma obra de regularização de águas e quem planejá-la sem um competente estudo hidrológico comete o mesmo erro que cometeria quem projetasse uma casa ignorando que ela é feita para ser habitada por pessoas.

A história do 2Va - A pratica de dimensionar os reservatórios com capacidade de acumular duas vezes o volume afluente foi por muito tempo atribuída ao Engenheiro Aguiar. Por vezes essa relação empírica era denominada por alguns de fórmula de Aguiar. Contudo não há indícios que essa tenha sido uma recomendação de Aguiar. Há dois motivos: 1) Aguiar desenvolveu sua própria metodologia de dimensionamento que é melhor elaborada que essa relação e tem uma lógica matemática; 2) não consta nos trabalhos de Aguiar nenhuma recomendação para adotar o 2Va. Além do mais, Aguiar tinha convicção da importância da variabilidade interanual dos deflúvios no processo de dimensionamento. Não há razões para acreditar que Aguiar desenvolveria uma relação desconsiderando essa importante característica do regime dos rios.

Para determinar a verdadeira razão dessa "fórmula" seria necessária uma exaustiva pesquisa nos acervos técnicos do DNOCS. Não há mesmo a certeza que essa pesquisa daria, sem margens de dúvidas, a resposta procurada. O que se sabe é que houve um

tempo em que os açudes eram dimensionados segundo a metodologia de Aguiar descrita no início desse Capítulo. Posteriormente o DNOCS passou a adotar a prática do 2Va.

Uma possível explicação da origem da prática do 2Va, vem da história da Hidrologia. O *Bureau of Reclamation* tem sido, desde muito tempo, uma referência mundial em termos de projetos de barragens. Padrões estabelecidos pelo Bureau sempre foram respeitados em todo o mundo e, em consequência, indutores de padrões de muitas instituições, incluindo o DNOCS. A barragem mais famosa do "Bureau", a *Hoover Dam*, foi construída entre os anos de 1930 e 1935, ao custo de US$ 174.000.000,00, tem capacidade para acumular duas vezes o volume médio anual escoado pelo rio Colorado[3]. É possível que os técnicos do DNOCS tenham adotado esse número como padrão.

Há ainda uma outra explicação, talvez menos provável. Aguiar (1934) dimensionou sete reservatórios no Nordeste (Tabela 2.4) onde a relação capacidade de acumulação sobre volume afluente anual varia de 1,71 (Açude Piranhas) a 2,48(Açude Cedro)[4]. O valor médio dessas sete relações é de 2,07. A simplificação de adotar uma relação constante igual a 2,0 é também uma explicação. A busca da primeira aplicação da regra empírica do 2Va ainda é uma tarefa a ser executada por historiadores da Hidrologia.

---

3 Dados da Compton´s Interactive Encyclopedia- Version 2.01VW- !994 Compton´s New Media Inc. and its licensors- Compact Disc Digital Data.

4 Na realidade, na época o açude Cedro já havia sido construido com 126 milhões. Ao estimar o volume recomendável para aquele reservatório em 67 milhões de metros cúbicos, Aguiar detectou o superdimensionamento do mesmo.

Tabela 2.4 Açudes do Nordeste dimensionados por Aguiar pelo método do Engenheiro Aguiar

Açude	U	V_a (hm^3)	C (hm^3)	C/V_a
Orós	0,70	1719	3000	1,75
Gal. Sampaio	0,80	155	322	2,08
Feiticeiro	1,00	11	25	2,27
Cedro	1,30	27	67	2,48
Pilões	0,80	75	150	2,00
Piranhas	1,00	146	250	1,71
Cruzeta	1,00	37	81	2,19

H = pluviosidade média anual na bacia; H_M = chuva média das máximas; U = coeficiente de rendimento médio da bacia; V_a = deflúvio médio anual ao boqueirão; C = volume acumulável pelo açude.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, Francisco Gonçalves. "Estudo Hidrométrico do Nordeste Brasileiro" Departamento Nacional de Obras Contra as Secas" Boletim Técnico. 36 n. 2 jul. /dez. 1978. Reimpressão.

Cadier, E., Albuquerque, C.H.C., Araújo Filho, P.F., Nascimento, P.H.P., Montgailladr, M. "Dimensionamento de Pequenos Reservatórios Superficiais do Nordeste Semi-Arido" In: II Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Anais 1, pp.202-213, Foz do Iguaçu, novembro de 1989.

Campos J.N.B. " A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers under High Evaporation Rate", Dissertação de Doutorado , Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 1987.

Campos, J.N.B. "Estudo Comparativa da Eficiência Hídrica entre Grandes e Pequenos Reservatórios para a Região Nordeste" Revista Tecnologia n.11, Universidade de Fortaleza, Fortaleza 1990.

Campos, J.N.B. "Regularização de Vazões em Rios Intermitentes" Tese para concurso de Professor Titular apresentado a UFC. Fortaleza, Ce, 1990

Campos, J.N.B e Lima, H.V.C . "Dimensionamento de reservatórios no Semi-Árido: o paradigma 2Va. Revista Engenharia ano IX, nº 11. Universidade Federal do Ceará - Centro de Tecnologia, Fortaleza, Ce 1994.

Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos. Plano Estadual de Recursos Hídricos- V.4 Atlas. Imprensa Oficial do Ceará. Fortaleza, Ce.. 1994

Fiering, M.B. "Queuing Thery and Simulation in Reservoir Designing." Transactions of the American Society of Civil Engineers vol 127, Part I, 1962.

Guerra, P. "Açudes e irrigação - Vida sertaneja" In: Seccas contra as seccas" 3 ed. Coleção Mossoroense Vol.XXIX p. 127

HAZEN, A. "Storage to be Provided in Impounding Reservoirs for Water Supply". Transactions, American Society of Civil Engineers, vol.77, 1914.

Hurst, H.E. "Long-term storage capacity of reservoirs." Proceedings of American Society Society of Covil Engineers separate no. 11. April 1950..

Kelman J. "Modelos estocásticos no gerenciamento de recursos hídricos" In: Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos" Nobel ABRH, São Paulo, 1987.

McMahon, T.A. e R.G. Mein. "Reservoir Capacity and Yield" Amsterdam, Oxford: Elsevier Scientific. 1978

Molle, François, "Potentialites des açudes du Nordest bresilien pour un usage in irrigation" SUDENE Recife 1985.

Moran,P.A.P." A Probability Theory of Dams and Storage System." Australian Journal of Applied Science vol. 5, 1954.

Moran,P.A.P "A Probability Theory of Dams and Storage System." Australian Journal of Applied Science vol.6, 1955.

RIPPL, W. – " Capacity of Storage Reservoirs for Water Supply". Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers vol. 71, 1883.

SUDLER, C.E. – " Storage Required for the Regulation of Streamflow". Transactions of the American Society of Civil Engineers vol.91, 1927.

Yevjevich, V. "Stochastic Processes in Hydrology"Water Resources Publications. Fort Collins, Colorado,1972.

Yevjevich, V. " Lectures notes from course in Water Storage Capacity and Design" Colorado State University. Fort Collins, 1978.

3. DESENVOLVIMENTO DO DIAGRAMA TRIANGULAR DE REGULARIZAÇÃO

Com a crescente escassez de água frente às necessidades, e as inevitáveis limitações financeiras, cada vez a mais os planejadores de recursos hídricos têm buscado aprimorar as técnicas de dimensionamento de reservatórios. Hoje existe um ramo da ciência denominado teoria da estocagem (*Theory of Storage*), objeto de estudos e aplicações de engenheiros e estatísticos. Os métodos científicos e os computadores evoluíram bastante e fizeram ultrapassada a época em que o estudo hidrológico de um reservatório se resumia à aplicação de simples regras empíricas.

De acordo com as modernas técnicas de planejamento, o estudo hidrológico de um açude interanual deve cumprir, bem, as seguintes etapas:

- Determinação das características estatísticas do regime do curso d'água afluente ao reservatório;
- Elaboração de um estudo incremental do tamanho do açude, isto é, verificar perdas e ganhos que acontecem quando se varia a prospectiva capacidade do reservatório;

- Seleção, à luz dos resultados da etapa anterior, da capacidade do reservatório que melhor atende aos objetivos da barragem.

Nessa busca de melhor determinar a capacidade de um açude, deve-se deixar para trás modelos demasiadamente simples que não representam bem o processo de estocagem interanual de águas e, também, evitar o exagero pelo lado da complexidade. A complexidade de uma formulação nem sempre implica em ganhos para a precisão dos resultados e para o processo de tomada de decisão. O hidrólogo deve ter sempre em mente o seu papel de técnico e não de decisor.

Os estudos hidrológicos devem fornecer informações suficientemente claras para que pessoas não especialistas no assunto, porém com uma indispensável dose de bom senso, possam avaliá-las e participar da decisão. Não são boas políticas: a atitude simplista que tenta misturar conceitos imiscíveis e nivela o leigo ao especialista, nem a complexidade que exagera no preciosismo e, tornando-se autista, sai do alcance dos decisores.

É dentro da ótica da simplicidade, sem fugir a uma base técnico-científica, que se desenvolveu o Diagrama Triangular de Regularização.

3.1 Definições básicas

Visando propiciar um melhor entendimento do desenvolvimento metodológico, apresentam-se nesse capítulo a conceituação e simbologia dos principais parâmetros e variáveis usadas no desenvolvimento metodológico. O entendimento desses termos é indispensável para compreensão do conteúdo exposto no restante do trabalho.

Volume afluente médio anual (μ). Representa o volume médio que anualmente escoa para o reservatório.

Volume anual regularizado (M). É entendido como o volume programado para retirar anualmente do reservatório sempre que houver disponibilidade. Esse volume está associado a uma garantia. Por exemplo, M_{90} significa que o volume anual regularizado tem 90% de garantia anual, isto é: existe disponibilidade para retirada desse volume em 90% dos anos.

Nível de garantia anual (*Ga*). Representa a probabilidade de o reservatório prover sem restrições, em um ano qualquer, o volume anual regularizado ***M***. Essa garantia pode ser estimada pelo valor assintótico - ***N*** suficientemente grande - da frequência (***1-n/N***).100, onde: ***n*** representa o número de anos em que o reservatório deixa de atender integralmente à demanda; ***N*** representa o número total de anos de operação. No presente texto, as palavras garantia e garantia anual são usadas com o mesmo significado.

Probabilidade de falha anual (F_a). Representa a probabilidade de o reservatório não dispor de um volume suficiente para atender à demanda ***M*** mais as perdas por evaporação a partir do lago. Esse valor representa o complemento percentual para 100% do nível de garantia anual.

Capacidade do reservatório (K). Representa o volume total acumulado no reservatório quando o nível da água se encontra na cota da soleira do seu sangradouro.

Fator adimensional de capacidade (f_K). Representa a razão entre a capacidade do reservatório (***K***) e o volume médio afluente anual (μ). O termo capacidade adimensional também é aplicado para o mesmo conceito.

Fator de forma do reservatório (α). A forma da bacia hidráulica do lago pode ser representada pela equação $Z(h) = \alpha h^3$; onde

$Z(h)$ denota o volume da reserva quando a superfície do lago encontra-se na altura h; h é medido em relação ao ponto mais profundo do açude, isto é: $Z(0) = 0$. O adimensional α, fator de forma, pode ser obtido pela divisão entre a capacidade do reservatório (K) e a altura da água na cota do sangradouro (h_{MAX}) elevada ao cubo (Campos, Nascimento e Studart, 2004).

Fator adimensional de evaporação (f_E). Obtido da equação adimensional do balanço hídrico (Campos, 1987), é igual a ($3\alpha^{1/3}.E_L/\mu^{1/3}$), onde E_L representa a lâmina evaporada durante a estação seca.

Fator adimensional de retirada (f_M). Representa a razão entre o volume regularizado (**M**) e o volume afluente médio anual (μ).

Retirada efetiva da reserva (R). É definido como o valor esperado do volume anual de água efetivamente retirado do reservatório. O valor de R é igual à soma dos volumes retirados ao longo do período de estudo dividido pelo número total de anos. Obviamente tem-se $0 \leq R < M$, ou $R = c.M$, onde $0 \leq c \leq 1.0$. Como aproximação $R_{90} \approx 0,95M_{90}$., onde o subscrito 90 representa o nível de garantia anual.

Eficiência de regularização do reservatório (η_M). Representa a percentagem do volume afluente anual que é efetivamente utilizada para atendimento à demanda. É igual a (R/μ)100.

Volume mínimo do reservatório (Z_{MIN}). Representa o valor do volume do reservatório abaixo do qual cessam as retiradas continuando, porém, as perdas por evaporação. Sempre que esse volume é atingido, antes de atender à demanda total do ano, fica caracterizada a ocorrência de uma falha.

Volume útil do reservatório (Z_{UTIL}). Representa a diferença entre a capacidade do reservatório (***K***) e o volume mínimo do reservatório ($\boldsymbol{Z_{MIN}}$).

3.2 Construção dos diagramas triangulares

Para a construção dos diagramas triangulares utilizou-se o método Monte Carlo. Esse método consiste na geração de séries sintéticas de deflúvios, seguida pela operação simulada do reservatório obedecendo a regras pré-estabelecidas. A versatilidade de modelos matemáticos para geração dessas séries e para a simular a operação de reservatórios fez com que esse método fosse o escolhido.

Em resumo, o método adotado consta dos seguintes passos: 1) geração sintética dos deflúvios segundo os padrões da área onde se pretende aplicar o modelo; 2) operação simulada do reservatório seguindo, também, os padrões da região que se destina o modelo. Essas etapas são descritas nas seções que se seguem.

3.2.1 Geração sintética dos deflúvios.

Os rios intermitentes do Nordeste brasileiro apresentam, como característica marcante a alternância entre uma estação úmida, com duração entre três e seis meses, seguida de uma longa estação secas, com os rios completamente secos. Essas características fazem com que os deflúvios anuais sejam serialmente independentes. Nessa situação, as séries de vazões anuais podem ser obtidas a partir da geração de números aleatórios seguindo uma dada função densidade de probabilidade.

As funções de probabilidade mais usadas na Hidrologia para geração de vazões são a gama e a log-normal de dois ou três parâmetros. Poder-se-ia utilizar qualquer uma dessas duas funções sem que se pudesse afirmar que uma fornece melhores resultados que a outra. Então, para manter homogeneidade com um modelo

anteriormente desenvolvido, optou-se por adotar para fins de geração de vazões anuais a função densidade gama de dois parâmetros.

A função densidade gama tem a seguinte apresentação:

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}.\ e^{(-x/\beta)}}{\beta^{\alpha}.\ \Gamma(\alpha)} \qquad (3.1)$$

onde α e β são os parâmetros de forma e de escala da distribuição e $\Gamma()$ representa a função gama.

A média e a variância da distribuição podem ser calculadas pelas relações $\mu = \alpha/\beta$ e $\sigma^2 = \alpha/\beta^2$ respectivamente.

3.2.2 A equação do balanço hídrico do reservatório

O balanço hídrico de um reservatório pode ser representado pelas equações:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - M - \left(\frac{A_{t+1} + A_t}{2}\right)E - S_t \qquad (3.2)$$

e

$$S_t = max\left(Z_t + I_t - M - \left(\frac{A_{t+1} + A_t}{2}\right)E - K;0\right) \qquad (3.3)$$

sendo $\boldsymbol{Z_t}$ = volume da reserva no início do ano $\boldsymbol{t}$; $\boldsymbol{I_t}$ = volume afluente ao reservatório durante o período **t**; $\boldsymbol{A_t}$ = área do lago do reservatório no início do período **t**; $\boldsymbol{E_v}$ = lâmina evaporada do lago durante o período $\boldsymbol{t}$; $\boldsymbol{M}$ = volume retirado do reservatório durante o período ***t***; $\boldsymbol{K}$ = capacidade do reservatório; $\boldsymbol{S_t}$ = volume perdido por sangria durante o período ***t*.**

Obs.: dispensaram-se os subscritos de E e M por serem valores considerados constantes ao longo dos anos; a equação só pode ser solucionada iterativamente visto V_{t+1} ser dependente de A_{T+1}.

Para retratar a morfologia da bacia hidráulica utilizaram-se as seguintes equações:

$$Z(h) = \alpha \, \mathrm{h}^3 \tag{3.4}$$

e

$$A(h) = 3\alpha \, \mathrm{h}^2 \tag{3.5}$$

sendo $Z(h)$ volume de acumulação quando o nível da água encontra-se a uma altura h, α o fator de forma da bacia hidráulica e $A(h)$

Utilizando-se essas equações, a Eq.[3.2] pode ser reescrita:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - 3\alpha^{1/3} - \left(\frac{Z_{t+1}^{2/3} + Z_t^{2/3}}{2} \right) E - S_t \tag{3.6}$$

Dividindo-se todos os termos da equação anterior pelo deflúvio médio anual(μ) obtém-se:

$$Z_{t+1} = z_t + i_t - m - f_E \left(\frac{z_{t+1}^{2/3} + z_t^{2/3}}{2} \right) - m - s_t \tag{3.7}$$

com

$$f_E = \frac{3\alpha^{1/3} E}{\mu^{1/3}} \tag{3.8}$$

onde f_E representa o fator adimensional de evaporação, z o volume acumulado adimensional(Z/μ), i o deflúvio adimensional

($\boldsymbol{I/\mu}$), m a retirada adimensional ($\boldsymbol{M/\mu}$); e $\boldsymbol{s}$ a sangria adimensional ($\boldsymbol{S/\mu}$).

Solução da equação do balanço hídrico

A equação do balanço foi resolvida através de um processo de integração numérica conforme descrito a seguir.

Atribui-se um valor para a retirada $\boldsymbol{M}$ e simula-se a operação do reservatório para a respectiva série sintética de vazões. Para cada ano, calculam-se os valores dos volumes evaporados, sangrados e utilizados de acordo com a sequência:

Estação úmida - . Como, por hipótese, não existem retiradas nem perdas por evaporação, a única maneira de saída d'água do reservatório é a sangria. Então a regra de operação pode ser definida pela equação

$$Z_2 = Z_1 + I_t \quad \text{se } Z_1 + I_t < K$$

$$= K \quad \text{caso contrário;}$$

o volume sangrado nessa etapa é calculado pela fórmula abaixo e totalizado

$$D_S = \text{máx}(Z_{t+1} - Z_t; 0).$$

Estação seca - . Nessa estação considerou-se que a retirada se dá sempre que a reserva esteja acima de $\boldsymbol{Z_{MIN}}$ e concomitantemente com as perdas por evaporação. Nestas condições existem anos em que somente parte da demanda $\boldsymbol{M}$ pode ser atendida.

O procedimento usado para cálculo foi;

Passo 1 - divide-se a retirada e a evaporação anual em $\boldsymbol{L}$ partes

Passo 2 - retira-se da reserva, se houver disponibilidade, um volume correspondente a M/L e calcula-se o volume restante, isto é:

$Z_2 = Z_1 - M/L$ se $Z_1 - M/L > Z_{MÍN}$

$Z_2 = Z_{MÍN}$, nos demais casos;

Obs: caso não haja disponibilidades no reservatório para atender a demanda, considera-se a ocorrência de uma falha no ano;

Passo 3 - calcula-se e totaliza-se o volume efetivamente utilizado nesta etapa $DM = Z_1 - Z_2$;

Passo 4 - calcula-se a altura da água no reservatório $h_2 = (Z_2/\alpha)^{1/3}$.

Passo 5 - retira-se do reservatório uma lâmina de evaporação igual a E_I/L e calcula-se a nova altura do lago

$h_3 = h_2 - E_I/L$ se $h_2 - E_I/L > 0$; $h_3 = 0$ nos demais casos;

Passo 6 - calcula-se o volume da reserva correspondente à altura h_3, $Z_3 = \alpha . h^3$.

Passo 7- calcula-se o volume consumido por evaporação nesta etapa $DE = |Z_3 - Z_2|$ e totaliza-se este volume.

Passo 8 -volta-se ao passo 2 e prossegue-se até completar as L fases da integração.

Passa-se, então, ao cálculo da estação úmida seguinte, e no final ter-se-á obtido o somatório dos volumes sangrado, evaporado e retirados e também a frequência de falhas.

Após a conclusão dos 2000 anos, verifica-se se a frequência de falhas está na faixa 10,05% - 9,95% ou se o erro em retira é menor

que 0,5 unidade. Caso afirmativo, aceita-se o valor de M, caso contrário atribui-se novo ***M*** volta-se ao passo 1 para novo cálculo.

3.3 O diagrama triangular de regularização

Considerando-se o balanço de massas de um reservatório em um tempo longo, tem-se:

$$\sum I = \sum E + \sum R + \sum S + \Delta Z \tag{3.9}$$

onde ***ΣI, ΣM, ΣS e ΣV*** representam as somas dos volumes afluente, retirado, sangrado e evaporado enquanto ***ΔZ*** representa a diferença entre o volume ao final do último ano da simulação e ao início do primeiro ano da simulação.

Dividindo-se todos os termos da Equação pelo número de anos (***N***) tem-se:

$$\frac{\sum I}{N} = \frac{\sum E}{N} + \frac{\sum R}{N} + \frac{\sum S}{N} + \frac{\Delta Z}{N} \tag{3.10}$$

visto que, para ***N*** suficientemente grande, ***ΔZ/N*** tende a zero e os demais termos tendem para seus valores esperados, têm-se

$$\mu = E\{R\} + E\{E\} + E\{S\} \tag{3.11}$$

onde ***E{}*** representa o operador valor esperado e μ representa o deflúvio médio anual.

A divisão do volume afluente em três partes, totalizando 100%, sugere a utilização do diagrama triangular para estudar como essa divisão se processa em função dos parâmetros estatís-

ticos dos deflúvios, das características morfológicas do reservatório. Para construir esses diagramas, utilizou-se o seguinte procedimento:

- Fixou-se um valor para o coeficiente de variação dos deflúvios anuais (C_V) e geraram-se séries sintéticas de 2000 anos de extensão, com média igual a 100, a partir de uma população gama de dois parâmetros;
- Admitiu-se para o reservatório um volume inicial igual a 50% do deflúvio médio anual;
- Fixaram-se valores de f_K e f_E e, para cada ponto (C_V,f_K,f_E) simulou-se a operação do reservatório com a série sintética e obtiveram-se os percentuais evaporado, sangrado e utilizado para uma garantia de 90%;
- Para cada valor de C_V, elaborou-se um diagrama com os percentuais obtidos no item anterior e traçou-se isolinhas de f_K e f_E.

Os diagramas obtidos têm o formato mostrado na Figura 3.2

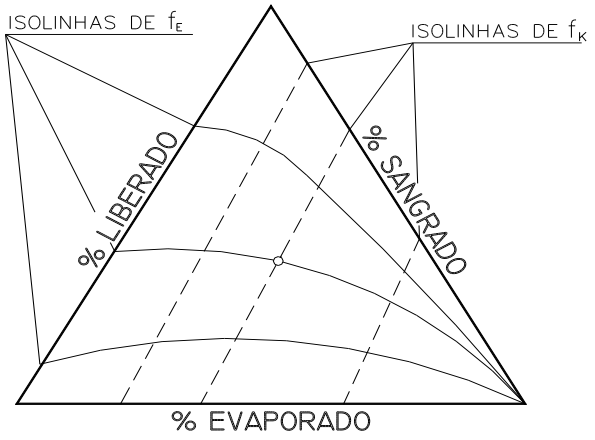


Figura 3.2 Representação esquemática do Diagrama Triangular de Regularização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMPOS, J. N. B. A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under high evaporation rate. Dissertação de doutorado. Colorado State University, Fort Collins, Co, 1987.

CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. V.; STUDART, T. M. C. Desvios nas estimativas de vazões regularizadas resultantes da representação das relações cota x área x volume por equações matemáticas. In: XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica, 2004, São Pedro - SP. XXI Congresso Latino Americano de Hidráulica. Campinas, SP: International Association of Hydraulic Resources, 2004.

4. APLICAÇÕES DO DIAGRAMA TRIANGULAR DE REGULARIZAÇÃO

Este capítulo apresenta aplicações do método do Diagrama Triangular de Regularização e analisa a maneira como os diagramas auxiliam no entendimento das trocas entre a evaporação, a sangria e a regularização e como essas trocas variam com os parâmetros: fator adimensional de evaporação, fator adimensional de capacidade e coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Apresenta-se ainda a utilização do diagrama de regularização como elemento auxiliar ao dimensionamento de reservatórios.

4.1 O diagrama triangular de regularização

Os diagramas triangulares de regularização foram traçados para uma reserva intangível: $Z_{MIN} = MIN(0{,}20\mu;\ 0{,}05K)$ e $Z_{MIN} = 0{,}0$. Foram traçados 11 gráficos (ver Anexo 1) correspondentes a valores de CV = 0,6; 0,7; 0,8;...,1,5 e 1,6. Para cada gráfico, os valores de f_K = 0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0; 10,0 e 90,0 e valores de f_E = 0,05; 0,10; 0,15; ...;0,95 e 1,00.

4.2 Etapas do dimensionamento

O uso do Diagrama de Regularização como ferramenta auxiliar ao dimensionamento de reservatórios é restrito aos casos em que o projetista deseja uma garantia anual de 90% no fornecimento da água. As etapas do dimensionamento são:

- Determinar através de séries históricas de vazões, ou de regionalização[5], os parâmetros estatísticos que caracterizam os deflúvios anuais, quais sejam: média, desvio padrão e coeficiente de variação;
- com os dados da tabela cota x volume, determinar o coeficiente de forma do reservatório(α) através da relação $K/hmax^3$;
- determinar os valores do coeficiente adimensional de evaporação $f_E = 3\alpha^{1/3}.E_l/\mu^{1/3}$ e fator adimensional de capacidade $f_K = K/\mu$;
- Selecionar o diagrama correspondente ao C_V determinado na etapa 1 e, a partir do ponto de encontro das isolinhas de f_E e f_K, determinar os percentuais de sangria evaporação e utilização.

5 O Atlas do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará, , contém, município, o valor da lâmina escoada em todo o Estado. No caso de não haver condições de obter-se o valor do coeficiente de variação dos deflúvios anuais pode-se adotar um valor médio regional de em torno de 1,0

4.3 Estudo de caso: o açude Pereira de Miranda

Seja determinar os volumes anuais regularizado, sangrado e evaporado pelo açude Pereira de Miranda no estado do Ceará do qual são conhecidos os seguintes dados:

1) Deflúvio médio anual ($\boldsymbol{\mu}$) 205,23 hm^3;

2) Coeficiente de variação dos deflúvios anuais (***CV***) 0,91;

3) Capacidade do reservatório (***K***) 395,00 hm^3.

Tabela 4.1- Relações cota x volume acumulado x altura da água no açude Pentecostes no estado do Ceará.

Cotas(m)	Volume(m^3)	Altura(m)
36	0	0
40	1.000.000	4
45	25.000.000	9
50	100.000.000	14
55	255.000.000	19
58	395.638.000	22

Fonte: Macedo,M.V.A. 1981. OBS: valores extraídos da curva cota área volume.

4.3.1 Cálculo das disponibilidades em Pereira de Miranda

Os valores percentuais evaporados, sangrados e regularizados do volume afluente podem ser obtidos através do DTR correspondente ao coeficiente de variação dos deflúvios anuais em função do fator adimensional de evaporação e do fator adimensional de capacidade.

Tabela 4.2 - Evaporação do tanque classe "A" em Pentecostes, CE

Mês	Evaporação(mm)
Janeiro	222,9
Fevereiro	155,4
março	144,4
Abril	127,5
Maio	138,6
Junho	142,8
Julho	178,2
Agosto	234,7
Setembro	256,0
Outubro	271,0
Novembro	252,4
Dezembro	239,6

O procedimento de cálculo segue as seguintes etapas:

1. Seleciona-se o DTR correspondente ao valor de ***CV*** dos deflúvios anuais; para p Pereira de Miranda seleciona-se o DTR relativo ao ***CV*** igual a 0,90.

2. Determina-se o fator adimensional de capacidade pela relação

$f_K = K/\mu$

sendo K o volume do reservatório e μ o volume anual afluente ao reservatório, ambos na mesma unidade. Tem-se

f_K = 395,00/205,23 = 1,92.

3. Determina-se o fator adimensional de evaporação através da relação

$f_E = (3\alpha^{(1/3)}/\mu^{(1/3)})\ E$

onde α denota o fator de forma da bacia hidráulica, μ representa o volume afluente médio anual ao reservatório em metros cúbicos e E a lâmina evaporada a partir da superfície do lago durante a estação seca medida em metros.

a). estimativa do fator de forma da bacia hidráulica (□)

Esse fator é determinado na suposição que a equação da bacia hidráulica do reservatório pode ser representada pela equação

$V = \alpha\ h^3$

onde h denota a profundidade da superfície do lago medida em relação ao ponto mais profundo da bacia hidráulica e V representa o volume acumulado correspondente à profundidade de água h e α representa o fator de forma.

O valor de α pode ser estimado pela equação

$\alpha = K/h_{MAX}{}^3$

onde K igual a 395,638 milhões de metros cúbicos e $hmax$ igual 22,0 metros. Obtém-se:

α = 37.156,0

b) Estimativa da evaporação durante a estação seca.

Considera-se o período de junho a dezembro como representativo da estação sem escoamento superficial no vale do Curu. O valor da lâmina evaporada do lago é estimado como sendo 80% da lâmina evaporada do tanque classe A no mesmo período. Com os dados da Tabela tem-se

$\boldsymbol{E}$ = 0,8(142,8 + 178,2 + 234,7 + 256,0 + 271,0 + 252,4+ 239,6) = 1259,76mm.

Com os valores de E e aplica-se a equação e obtém-se

$\boldsymbol{f_E}$ = 3x(37156)$^{1/3}$ x1,25976/(205,23x10^6) $^{1/3}$ = 0,21

4. Estimativa dos volumes regularizados, sangrado e evaporado.

Utilizando-se o DTR referente ao ***CV*** procura-se o cruzamento das isolinhas de $\boldsymbol{f_E}$ e $\boldsymbol{f_K}$ para, a partir desse ponto, através de paralelas aos eixos, como mostrado no anexo , obter-se

volume efetivamente regularizado(% de $\boldsymbol{\mu}$) 48%;

volume sangrado (% de $\boldsymbol{\mu}$) 31%;

volume evaporado 21%.

Para os valores anuais médios tem-se:

$\boldsymbol{R}$ = 0,48 $\boldsymbol{\mu}$ = 0,48x 205,23 = 98,51 hm^3 /ano;

$\boldsymbol{VE}$ = 0,21 $\boldsymbol{\mu}$ = 0,21x 205,23 = 43,10 hm^3 /ano;

$\boldsymbol{VS}$ = 0,31 $\boldsymbol{\mu}$ = 0,31 x 205,23 = 63,62 hm^3 /ano.

O cálculo do volume anual regularizado é obtido pela relação

$\boldsymbol{M}$ = $\boldsymbol{R}$/0,95 = 103,70 hm^3/ano

4.4. As trocas evaporação, sangria e regularização.

No processo de estocagem de águas superficiais, o reservatório recebe os deflúvios anuais e os transforma em: sangria pelo vertedouro; em evaporação a partir da superfície do lago e em regularização para, atender as demandas da sociedade. A maneira como se dá essa divisão depende das seguintes características: regime hidrológico do rio; condições climatológicas do local; geomorfologia da bacia hidráulica e das regras de operações adotadas para o açude.

Uma vez conhecido o regime do rio, fica definido o coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Depois de estabelecer a regra de operação do reservatório - garantia anual de 90%- o DTR fica definido. Nessas condições, pode-se analisar o processo de trocas que se dá em um reservatório em função do fator adimensional de evaporação; da capacidade da reserva e do volume morto do reservatório. Essa seção analisa a influência de cada um destes termos no processo de estocagem de águas.

4.4.1 Efeito da variação da capacidade do reservatório.

Ao se incrementar a capacidade de um reservatório mantendo-se constantes o volume morto (Z_{min}) e o fator adimensional de evaporação (f_E), o efeito esperado é uma redução no volume médio de sangria. A questão a ser analisada é como esse decréscimo do volume sangrado se divide entre o volume evaporado e o volume regularizado. Contudo, nos casos em que o volume morto de um reservatório é uma parte do volume acumulado o processo torna-se mais complexo, pois o valor da reserva intangível apresenta um papel de muita importância, mormente quando na presença de altas taxas de evaporação. Desta maneira, a análise foi

desenvolvida sob duas premissas: a primeira, que foi a adotada para desenvolvimento dos onze diagramas triangulares, admite que o volume morto do açude é igual a cinco por cento da capacidade do açude até o ponto em que essa capacidade atinge a vinte por cento do deflúvio médio anual. A partir desse ponto, o volume morto passa a ser constante e igual a vinte por cento do deflúvio. A segunda admite que o volume morto do reservatório é nulo

a. Caso com volume morto não nulo Z_{MIN} = MIN(0,20μ; 0,05K) Nesta situação, para altos valores f_E a isolinha correspondente apresenta três tramos: o primeiro, ascendente, onde o volume regularizado cresce com o crescimento da capacidade do reservatório até atingir um valor máximo; o segundo, descendente, onde o volume regularizado decresce; com o incremento da capacidade até atingir um mínimo no ponto onde o volume morto atinge seu máximo igual a vinte por cento do deflúvio anual. Finalmente, o terceiro onde o volume regularizado volta a crescer lentamente (Fig. 4.1). O processo de troca acontece como descrito a seguir:

Tramo 1.Inicialmente o ganho em sangria ***DS*** se transfere para a regularização e para a evaporação. Como a reserva intangível também cresce, a reserva útil, Z_{UTIL} = K - Z_{MIN}, passa a ficar em uma altura mais elevada, portanto com maior superfície de evaporação. Esse reforço na evaporação faz com que chegue um ponto onde todo o ganho da sangria se transfira totalmente para a evaporação.

Tramo 2.Nesse tramo, onde Z_{MIN} e Z_{UTIL} são ainda crescentes, o efeito decorrente do incremento de Z_{MIN} sobre a evaporação passa a preponderar sobre o efeito do incremento de Z_{UTIL}, e a evaporação passa a consumir todo o ganho em sangria mais uma parte do volume de utilização. Esse formato da curva continua até

que Z_{MIN} alcance o valor $0{,}20\mu$ e pare de crescer (quando $f_K = 4{,}0$.).

Tramo 3. Nesse tramo, volta a haver um crescimento da reserva útil mantendo-se a reserva intangível, gerando, em consequência um acréscimo na utilização. Porém como neste tramo f_K é maior do que quatro, a utilização já está próxima de seu valor assintótico e seu crescimento é muito pequeno ou mesmo desprezível.

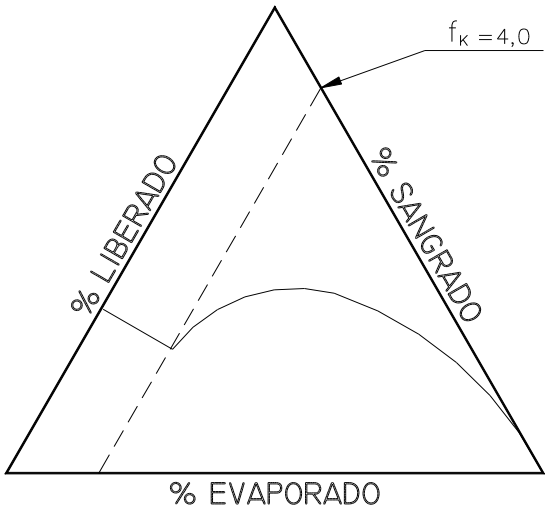


Figura 4.1 - Representação esquemática das trocas evaporação sangria e utilização quando K cresce e Z_{MIN} = (0,20m; 0,05K).

a. Caso com volume morto nulo $Z_{MIN} = 0$. Quando o volume intangível do reservatório é nulo, é lógico esperar que o aumento da capacidade do reservatório resulte em um aumento, por menor que seja, no volume regularizado. Isto é: um aumento na capacidade de um reservatório não pode implicar em redução do seu

volume regularizado. A isolinha de f_E, com f_K variável, tem o formato mostrado na Fig. 4.1. Isto é, a curva do volume regularizado é monótona, crescente e assintótica a um valor máximo. Deve ser observado que o ângulo Θ formado pela isolinha de f_E define a maneira como o ganho em sangria se distribui entre evaporação e utilização. Para $\Theta = 30°$ o acréscimo da utilização é igual ao acréscimo da evaporação. (ver Fig. 4.2)

Figura 4.2 - Representação esquemática daS trocas evaporação sangria e utilização quando K cresce e $Z_{MIN} = 0$.

4.4.2 Efeito da variação do fator adimensional de evaporação.

Ao se incrementar o valor de f_E com f_K constante o efeito evidente é aumentar o percentual de evaporação. Se analisarmos as

isolinhas de f_K nos diversos diagramas de regularização, podemos observar: a) são retas, ou quase retas, aproximadamente paralelas ao eixo de regularização, isto significa que, para um dado valor de C_V e um dado valor de f_K, o percentual de sangria é aproximadamente constante para diversos f_E; b) a quase equidistância com que isolinhas de f_E cruzam as isolinhas de f_K mostram uma acentuada linearidade entre o ganho em volume utilizado e o decréscimo do fator de evaporação.

4.5 Síntese do capítulo

Inicialmente, deve-se considerar que embora os diagramas tenham sido desenvolvidos para as condições do Nordeste brasileiro, nada impede que outros sejam desenvolvidas para condições diversas. No caso de rios perenes deve-se utilizar a regra de operação em que retiradas, evaporação, sangrias e deflúvios ocorrem simultaneamente. Igualmente, o fator adimensional de evaporação deve ser estimado a partir da evaporação líquida anual.

1) O diagrama triangular de regularização (DTR) é uma excelente ferramenta para permitir o entendimento do processo de trocas entre sangria, evaporação e regularização de águas que ocorrem no processo de estocagem de águas superficiais em açudes;

2) O DTR é de fácil aplicação e pode ser aplicado a partir de dados regionalizados de deflúvios e evaporação e de estimativas da forma da bacia hidráulica;

3) O diagrama, como desenvolvido, tem sua aplicação limitada a reservatórios operando isoladamente nas condições do Nordeste brasileiro.

Ainda há muito a desenvolver no que diz respeito ao diagrama triangular. O poder de síntese incorporado no triângulo, poderá certamente proporcionar maior interação entre os hidrólogos e profissionais de outras disciplinas. Há de se ter a clareza de que o caminho do entendimento interdisciplinar passa pelo poder de síntese dos especialistas de cada área do conhecimento humano. Esse caminho inicia com os dados coletados que se transformam em informações; passa pela sintetização das informações que geram o conhecimento; o último degrau é agregar experiência e ética ao conhecimento para que sua aplicação chegue ao patamar da sabedoria. Participar da geração do conhecimento através de uma síntese hidrológica é a contribuição que se pretende com o presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MACEDO, M.V.A. "Características físicas e técnicas dos açudes públicos do Ceará". Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Fortaleza, CE 1981.

5. SOBRE A EFICIÊNCIA DE PEQUENOS E GRANDES RESERVATÓRIOS

Na busca de solução paras as secas periódicas que flagelam uma grande parte do Nordeste brasileiro, desde o final do século XIX, a construção de açudes tem sido a política pública mais praticada por governantes. Contudo, no âmbito dessa política surgiu um interessante e recorrente debate. O que seria melhor: grandes ou pequenos reservatórios?

Em uma política de açudagem bem elaborada, açudes pequenos médios e grandes têm suas utilidades e funções a desempenhar. Na década de 1960 a SUDENE elaborou um importante trabalho que resultou na publicação da série Estudos de base do vale do Jaguaribe. O volume cinco dessa série, intitulado "Política das Águas", abordou a questão do que seria uma rede ideal de açudes (SUDENE, 1967). Aos grandes açudes cabia o papel de reserva estratégica, aos pequenos açudes caberia a distribuição espacial das reservas em água, aos médios açudes caberia uma função intermediária irrigando áreas com uma segurança, em torno de

90%. Em essência, a política incorpora a hipótese de que os grandes açudes são mais eficientes do que os pequenos.

Em alguns debates técnicos usou-se o argumento, contra os grandes reservatórios, que o mais eficiente seria a construção de pequenos e médios açudes em vez de um grande reservatório. Nesse debate surgiu a motivação para algumas pesquisas que deram base ao conteúdo do presente capítulo.

O presente capítulo apresenta uma análise os aspectos hidrológicos da eficiência hidrológica a partir de elementos da equação adimensional do balanço hídrico que deu origem à formulação do DTR.

5.1 O papel do fator adimensional de evaporação

Para entender o papel do fator adimensional de evaporação nas eficiências hidrológicas de pequenos e grandes reservatórios façamos a seguinte análise. Suponha que dois reservatórios tenham a mesma forma (α) e tenham o mesmo fator adimensional de capacidade (f_K). Assim, o reservatório que recebe um deflúvio maior (reservatório 1) terá uma capacidade maior que o que recebe menor deflúvio (reservatório 2), como representado na Figura 5.1.

Suponha agora que seja extraída de ambos os reservatórios uma mesma lâmina de evaporação (E). Observando-se a figura citada pode-se observar que o volume remanescente no reservatório 1, em percentuais do volume total, é maior do que o remanescente no reservatório 2.

Assim, pode-se concluir que em igualdade de condições de fator adimensional de capacidade, fator de forma e lâmina de evaporação, os reservatórios

maiores são mais eficientes do que os pequenos reservatórios. Porém, resta ainda analisar: o que se pode dizer quanto ao fator de forma? Não serão eles menores nos pequenos reservatórios?

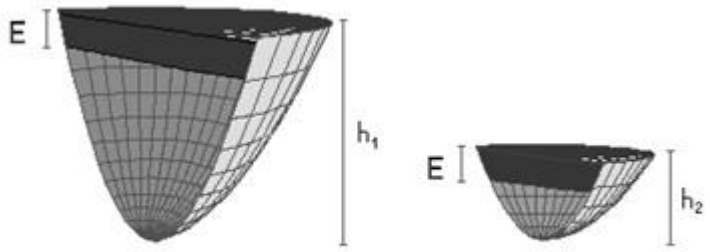


FIGURA 5.1- Representação esquemática dos reservatórios em forma de parábola cúbica com um termo. $V = \alpha h^3$.

5.2. Os estudos empíricos

Vários estudos foram procedidos com vistas a analisar a questão da eficiência hidrológica da pequena e da grande açudagem. Na presente seção apresentam-se dois estudos realizados no contexto do desenvolvimento da linha de pesquisa do DTR. Inicialmente apresenta-se a análise para 40 reservatórios do vale do rio Jaguaribe (Campos, Studart, Martinz e Nascimento, 2002) e em seguida os resultados de uma pesquisa anterior desenvolvida com uma amostra de 67 reservatórios no Semiárido brasileiro (Campos, 1990).

As metodologias entre as duas pesquisas, embora utilizando a mesma base conceitual, tiveram pequenas diferenças. A pesquisa de do ano 2002 utilizou dados do vale do rio Jaguaribe e os reservatórios foram agrupados em classes segundo suas capacidades.

No estudo de 1990 os reservatórios foram analisados sem agrupamento. No presente capítulo, a descrição mais completa da metodologia é apresentada somente para a pesquisa de 2002.

5.2.1 – A Pesquisa na bacia do rio Jaguaribe

Nessa seção são apresentados os resultados de uma pesquisa com 40 reservatórios do vale do rio Jaguaribe no Ceará (Campos, Studart, Martinz e Nascimento, op. Cit.). O procedimento estatístico aplicado constou das seguintes fases: 1) Formação da amostra, 2) separação da amostra em classes em classes segundo as capacidades dos reservatórios, 3) estudos das relações entre capacidades, eficiências hidrológicas, fatores de evaporação, perdas por evaporação e perdas por sangria.

Seleção da amostra

A amostra analisada foi formada por 40 reservatórios da bacia do rio Jaguaribe no estado do Ceará. Os dados foram obtidos do Plano de Gerenciamento de Águas da Bacia do Rio Jaguaribe (COGERH/ENGESOFT, 1999).

Obtenção dos dados hidrológicos e morfométricos

Os dados relativos às capacidades: O fator adimensional de capacidade, como pode ser visualizado no Diagrama Triangular de Regularização, influencia substancialmente o rendimento de um reservatório. Assim, para dar maior homogeneidade à análise, a pesquisa optou por adotar para todos os reservatórios estudados, uma capacidade hipotética de acumulação igual a uma vez o volume afluente médio anual ($f_K = 1$). Esta suposição retira da amostra ruídos que podem ser introduzidos pela tendência dos executores da política de açudagem de dimensionarem os açudes de rios

mais caudalosos com maiores valores dos fatores adimensionais de capacidade. Ressalte-se também que o pequeno valor de f_K resulta em aumentar significativamente o valor dos volumes sangrados pelos reservatórios comparativamente a situação real.

Os volumes afluentes médios anuais: Os valores dos deflúvios médios anuais foram obtidos do Plano de Gerenciamento de Águas da Jaguaribe (COGERH/ENGESOFT, 1999). No Plano os deflúvios foram obtidos pela modelo chuva x deflúvio MODHAC, calibrado com os valores observados constantes no banco de dados do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE. (Atualmente os dados encontram-se na Agência Nacional de Águas –ANA)

. Os valores da evaporação: Os valores de Ev, evaporação no lago durante a estação seca, foram calculados a partir dos dados das Normais Climatológicas (INMET, 1990). Como os dados referem-se a medidas pelo evaporímetro Piché, foi efetuada a correção proposta por Coelho (2000), transformando-os em valores equivalentes à evaporação no Tanque Classe A.

A seguir aplicaram-se os fatores de correção do tanque (K_A) propostos por Molle e Cadier (1992), em função da área do reservatório. Para os reservatórios com áreas superiores a 50 hectares aplicou-se K_a igual a 0,70. Para o açude Gomes, único de área do lago inferior 50 hectares, aplicou-se um K_a igual a 0,75.

Os fatores de forma. Os valores dos fatores de forma dos reservatórios foram obtidos através da relação $\alpha = K / h^3$, onde K é a capacidade do reservatório e h, a altura da superfície d'água correspondente à capacidade. Em estudo recente (Campos, Studart e Nascimento, 2001) mostraram que essa aproximação é suficientemente precisa para estimativa das vazões regularizadas.

Divisão dos reservatórios em classes

Para proceder à análise estatística os reservatórios foram agrupados em classes segundo as capacidades fictícias (igual ao volume afluente médio anual). Considerando que os reservatórios Orós e o Banabuiú apresentam deflúvios afluentes acentuadamente maiores que os demais, os autores procederam uma outra análise retirando esses dois reservatórios da amostra.

Tabela 5.1 – Divisão da amostra em classes de capacidade

Limites da classe (hm3))	Número de reservatórios na classe
0-10	12
10-20	5
20-30	5
30-50	5
50-100	5
100-200	5
200-1200	4

Estudos de regressão:

Com o objetivo de avaliar a evolução das eficiências dos reservatórios em função de suas classes de capacidades foram estudadas as seguintes regressões:

- fator de evaporação em função da capacidade igual a uma vez o volume afluente anual, para toda a amostra sem considerar os intervalos de classe;
- eficiência de regularização da classe em função da capacidade do ponto médio da respectiva classe;

- volume sangrado na classe em função da capacidade do ponto médio da respectiva classe.

A eficiência de regularização de cada classe foi estimada pela soma dos volumes regularizados dividida pela soma dos deflúvios de todos os reservatórios da classe.

Estudaram-se as correlações entre f_E e μ para os 40 reservatórios analisados. O melhor ajuste foi obtido com a curva $f_E=0{,}397\mu^{-0,24}$ (Figura 5.2). O baixo valor de r^2 (0,48) se dá, principalmente, pela pequena quantidade de açudes de grande porte na amostra (apenas quatro com deflúvio médio anual superior a 200 hm³/ano). Contudo, é possível perceber uma tendência de decrescimento de f_E com o aumento de μ

Análise dos valores extremos. No conjunto de açudes estudados o maior valor encontrado para f_E foi de 0,53 referente ao açude Nobre e o menor foi de 0,04 para o açude Gomes. Então, para que o Nobre tivesse o mesmo rendimento hidrológico que o açude Gomes seria necessário que a lâmina evaporada pelo primeiro fosse reduzida em cerca de 13,2 vezes (0,53/0,04). Esse resultado está de acordo com um estudo anterior apresentado na primeira edição desse livre. Esse fato ressalta a importância da correta escolha dos locais para construir um reservatório. Reduzir a evaporação em treze vezes é na superfície de um lago é quase que impossível com o uso das técnicas atuais.

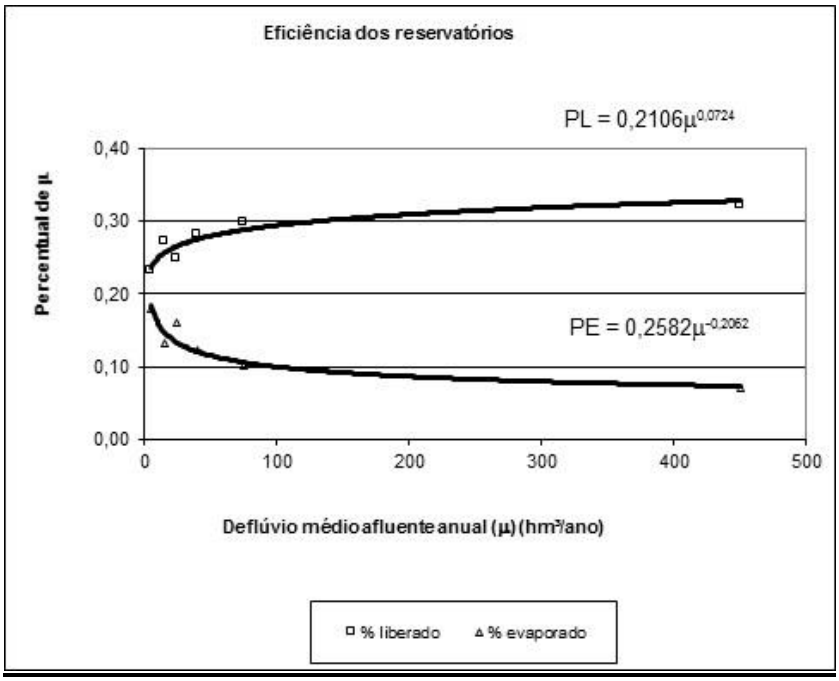


Figura 5.2 – Relação entre o fator adimensional de evaporação e o deflúvio médio em 40 reservatórios do vale do Jaguaribe no estado do Ceará.

5.2.2 – A Pesquisa com 67 reservatórios do Nordeste

Partindo-se de uma amostra de 67 reservatórios no Nordeste, Campos (1990), estudou a correlação entre f_E e μ . O melhor ajuste obtido foi com a curva $f_E = a\mu^b$.

,36). O baixo valor de r^2 indica uma alta variabilidade dos resíduais. Contudo, é possível a percepção de uma tendência de f_E decrescer quando μ cresce; esse fato pode ser visualizado na Fig. 5.3.

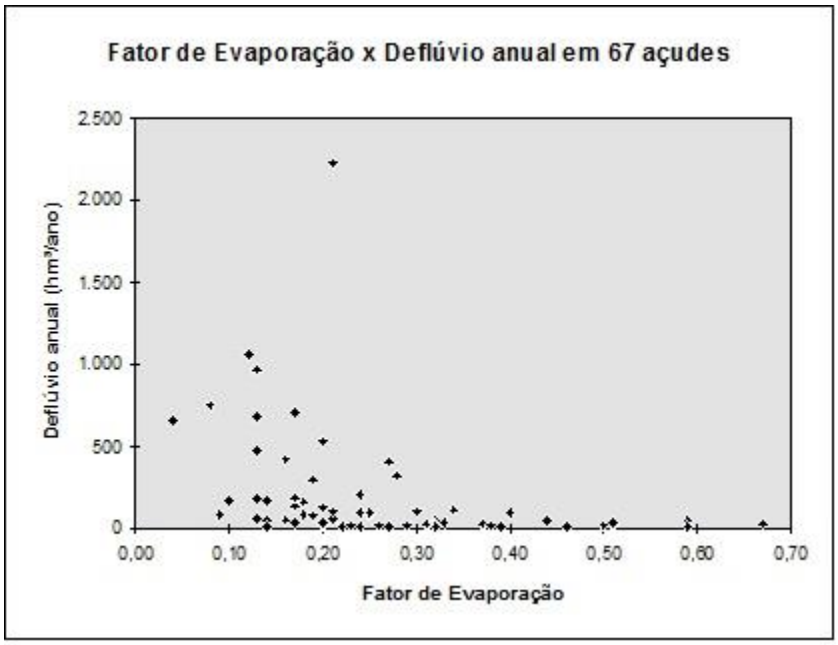


Figura 5.3 – Relação entre o fator adimensional de evaporação e o deflúvio médio anual em 67 reservatórios do vale do Jaguaribe no estado do Ceará. Fonte: Campos(1990).

5.3 Síntese

Os resultados apresentados em diversas pesquisas mostraram quantitativamente que os grandes reservatórios apresentam melhor comportamento no que se refere às perdas por evaporação do que os pequenos reservatórios. A equação adimensional do balanço hídrico, utilizada para a formulação do DTR, também mostrou ser uma excelente ferramenta para o entendimento dos processos relacionados à regularização de vazões e eficiência hidrológica dos pequenos reservatórios.

As pesquisas também mostraram a grande importância em escolher um local apropriado para a construção de uma barragem, independentemente de serem pequenos ou grandes reservatórios. Observa-se que a boa escolha pode significar uma redução virtual da evaporação em cerca de 13 vezes.

Do estudo comparativo entre pequenos e grandes reservatórios, pôde-se auferir.

1. O volume médio sangrado por um reservatório, para uma dada confiabilidade, é fortemente dependente do coeficiente de variação dos deflúvios anuais e da capacidade do reservatório, porém varia muito pouco com o fator adimensional de evaporação.
2. No que diz respeito ás perdas por evaporação, os grandes reservatórios são, em média, mais eficientes que os pequenos.
3. Para um dado valor do coeficiente de variação dos deflúvios anuais, o volume regularizado guarda relação aproximadamente linear decrescente com o fator adimensional de evaporação.
4. Ao se incrementar simultaneamente, e na mesma proporção, a capacidade de um reservatório e sua reserva intangível, o volume regularizado é inicialmente crescente, atinge um máximo e passa a decrescer;
5. O ganho em volume regularizado de um reservatório com o incremento de sua capacidade, a partir de um mesmo f_K, decresce substancialmente com o fator adimensional de evaporação; isto significa que reservatórios de alto f_E devem ser dimensionados com menores valores de f_K

6. A escolha criteriosa do local do barramento é capaz de proporcionar substanciais reduções nas perdas por evaporação a partir do lago.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campos, J.N.B. "Estudo Comparativa da Eficiência Hídrica entre Grandes e Pequenos Reservatórios para a Região Nordeste" Revista Tecnologia n.11, Universidade de Fortaleza, Fortaleza 1990.

CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C., NASCIMENTO, L. S. V. Avaliação de Erros na Estimativas de Vazões Regularizadas por Ajustamento de Equações da Tabela Cota x Volume por Equações Matemáticas. In: XXIV SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS., 2001, Fortaleza. **Anais do XXIV Seminário Nacional de Grandes Barragens.**. Fortaleza: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2001.

CAMPOS, J. N. B., STUDART, T. M. C., MARTINZ, D. D. G., NASCIMENTO, L. S. V. Contribuições ao Debate sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes Reservatórios. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre: , 2002.

COÊLHO, P. P. (2000). *Cálculo das Disponibilidades Hídricas de Pequenos Açudes no Estado do Ceará,* Projeto de Final de Curso, Universidade Federal do Ceará.

COGERH/Engesoft. *Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe*. Fortaleza,1999

INMET *Normais Climatológicas (1961–1990).* Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília 1992

MOLLE, F. e CADIER, E. **Manual de Pequenos Açudes.** SUDENE/ORSTOM. Recife, 1989.

SUDENE, "Política Das Águas In: Estudos De Base Do Vale Do Jaguaribe". Recife, 1967.

Tabela 5.3- Características dos 40 reservatórios da bacia do Jaguaribe analisados no estudo.

Açude	K (hm^3)	*A*	μ (hm^3/ano)	Ev (m)	f_E
Atalho II	108,25	2.524,78	97,78	1,02	0,09
Banabuiú	1.800,00	10.529,16	768,42	0,97	0,07
Boa Viagem	47,00	3.008,00	28,88	0,97	0,14
Broco	17,50	6.377,55	4,59	1,07	0,36
Canafístula	13,12	9.857,25	5,91	1,00	0,36
Canoas	69,25	870,99	19,31	1,08	0,12
Cedro	126,00	37.333,33	25,84	0,95	0,32
Cipoada	17,30	12.997,75	32,25	1,00	0,22
Ema	10,40	5.324,80	9,65	1,00	0,25
Favelas	30,10	10.969,39	32,38	1,07	0,22
Fogareiro	118,81	5.025,82	267,85	0,97	0,08
Gomes	2,39	121,42	48,61	1,10	0,04
Ingazeiro	11,32	2.763,67	11,57	1,02	0,19
Joaquim Távora	23,66	8.622,45	7,40	0,95	0,30
Nobre	22,09	10.054,62	1,68	0,97	0,53
Nova Floresta	7,62	2.007,16	118,84	0,95	0,07
Olho d'água	21,30	1.792,39	5,49	0,95	0,20
Orós	1.956,30	37.097,24	1.042,36	0,95	0,09
Patu	71,80	2.659,26	73,42	0,97	0,10

Tabela 5.3 cont. Principais características dos 40 reservatórios analisados na Bacia do Jaguaribe (cont)

Açude	K (hm^3)	α	μ (hm^3/ano)	Ev (m)	f_E
Pedras Brancas	434,00	22.049,48	157,21	0,97	0,15
Poço da Pedra	50,00	4.695,72	46,09	1,08	0,15
Poço de Barro	52,00	15.407,41	29,57	1,00	0,24
Prazeres	32,50	338,29	6,18	1,02	0,12
Quixabinha	32,41	1.476,40	3,29	1,02	0,24
Quixeramobim	54,00	14.501,02	354,36	0,97	0,10
R. dos Carneiros	37,18	945,96	3,61	1,02	0,20
Riacho do Sangue	61,42	12.501,53	77,54	0,97	0,16
Riacho dos Tanques	12,78	7.395,83	2,99	0,97	0,39
Riacho Verde	14,67	2.985,96	1,83	0,97	0,34
Rivaldo de Carvalho	6,42	14.858,32	12,47	1,07	0,34
Santo Ant° de Russas	29,70	29.700,00	93,32	1,00	0,21
São José II	29,15	5.933,24	14,00	0,95	0,22
Serafim Dias	43,00	39.929,77	101,39	1,07	0,24
Thomas Osterne	28,79	1.842,56	5,64	1,02	0,21
Trapiá II	18,19	1.315,83	14,44	0,97	0,13
Trici	16,50	3.673,09	25,39	1,07	0,17
Trussu	263,00	7.661,36	73,74	0,95	0,13
Várzea do Boi	51,80	23.577,61	44,38	1,07	0,26
Vinícios Berredo	434,05	22.052,02	158,50	0,97	0,15

Fonte: COGERH/ENGESOFT (1999)

6. INCERTEZAS EM DIMENSIONAMENTO DE RESERVATÓRIOS

O entendimento da vazão regularizada, obtida por simulação de uma série histórica, como variável aleatória está muito difundida nos meios científicos e acadêmicos, porém na prática da Engenharia Hidrológica esse entendimento nem sempre está presente. De fato, a vazão regularizada obtida para uma série N anos, com um volume inicial adotado na simulação (S0) é uma variável com uma média e um desvio padrão que dependem de N e S0. Somente quando o valor de N tende para infinito, denominado estado de equilíbrio, a variância da vazão regularizada tende para zero e a média tende para um valor constante independente de S0. Esse valor, característico do sistema reservatório-bacia hidrográfica, é o valor (parâmetro) estimado pelo DTR.

O presente capítulo tem por objetivo mostrar, usando dados dos rios do Nordeste brasileiro a variabilidade das vazões regularizadas em reservatórios da região e inserir no contexto os valores obtidos com a aplicação do DTR.

6.1. Uma tipologia de incertezas

Segundo o dicionário eletrônico Houaiss, incerteza significa o estado ou caráter do que é incerto, ou ainda a dúvida ou falta de certeza. Erro, na rubrica matemática, é definido como a diferença entre o valor aproximado de uma função ou grandeza e o seu valor real.

Vincens, Iturbe e Shaake (1975) classificam as incertezas encontradas em estudos hidrológicos em três tipos:

- Incertezas tipo I – São aquelas decorrentes do desconhecimento do modelo real que rege o fenômeno hidrológico em estudo;
- Incertezas tipo II – São as decorrentes do desconhecimento dos parâmetros dos modelos matemáticos;
- Incertezas tipo III – São aquelas inerentes aos processos naturais e decorrentes de suas variabilidades.

Na prática da Engenharia Hidrológica, o verdadeiro modelo que rege um fenômeno da natureza, ou comportamento de uma dada variável aleatória, nunca é conhecido. Assim, ao se afirmar que a distribuição gama representa bem o comportamento da variável vazão afluente ao reservatório Castanhão é diferente de afirmar que as vazões afluentes ao reservatório Castanhão são, de fato, pertencentes a uma distribuição gama. Em conclusão, quando não se conhece o valor real da grandeza que se pretende estimar é impossível avaliar o erro que se comete com a estimativa.

Em resumo, as incertezas do tipo I são de difícil, por vezes impossível, avaliação tendo em vista que, na grande maioria dos casos, não se conhece de fato os verdadeiros modelos que regem os processos naturais. A evolução das ciências, juntamente com o

crescimento das séries de observações das grandezas hidrológicas, deve permitir modelos cada vez mais eficientes na descrição dos processos da natureza.

As incertezas tipo II, relativas aos parâmetros dos modelos, já dispõem de tratamentos teóricos satisfatórios para muitos casos. Por exemplo, a média de séries de vazões afluentes, quase sempre presente como parâmetro em modelos estocásticos, é convenientemente tratada pelo teorema de Moivre-Laplace (ou teorema do limite central). Os erros cometidos na avaliação desses parâmetros geralmente decorrem da insuficiência de observações nas séries hidrológicas. A teoria estatística mostra que para séries de observações de mesma amplitude, o erro cometido na avaliação do parâmetro média cresce rapidamente com o coeficiente de variação da variável aleatória em estudo.

Por sua vez, as incertezas do tipo III são inerentes aos processos estocásticos. Estas não podem ser mudadas. Deve-se conhecê-las e incorporá-las ao planejamento. Suponhamos o seguinte experimento: lançar um dado 10 vezes e calcular o seu valor esperado. Nesse caso, sabe-se que, na premissa de um dado honesto o valor esperado da média é de 3,5. Se, por exemplo, o experimento gerou os seguintes valores: 1; 3; 5; 1; 2; 6; 3; 4: 2 e 1, então a média obtida foi de 4,67. A diferença entre a estimativa e o valor da população (4,67-3,5 = 1,17) é um desvio decorrente da incerteza tipo III.

6.2 A variabilidade dos deflúvios no dimensionamento: análise histórica

Uma análise histórica sobre o processo de dimensionamento de reservatórios, há de mostrar que muitos autores incluíam o coeficiente de variação dos deflúvios anuais nas suas metodologias

de dimensionamento de reservatórios desde o início do século passado. Hazen (1914) foi o pioneiro nesse aspecto. No Nordeste, embora durante muitas décadas os reservatórios hajam sido dimensionados somente em função do deflúvio médio anual, já em 1934 Aguiar, ao desenvolver sua metodologia reconhecia a importância da variabilidade dos deflúvios no dimensionamento. Para ilustrar esse fato, apresenta-se a seguir uma breve revisão das abordagens de Hazen e de Aguiar.

Hazen, ao propor um índice para mensurar o desempenho de um reservatório, foi pioneiro na colocação do coeficiente de variação dos deflúvios anuais como parâmetro importante na avaliação do índice. O índice é calculado por:

$$ip = (1 - \eta) / Cv \qquad (6.1)$$

onde ***ip*** mede a performance do reservatório; η representa a razão entre o volume regularizado e o volume médio afluente e Cv denota o coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Segundo o conceito de Hazen, para uma mesma retirada, quanto menor o Cv melhor o desempenho do reservatório.

Aguiar (1934), ao desenvolver um procedimento para dimensionamento de reservatórios, considerou que três fatores determinavam a capacidade de um reservatório: o volume afluente médio anual; a intermitência dos rios e a variabilidade dos deflúvios anuais. Ao justificar a introdução do coeficiente de variabilidade dos deflúvios Aguiar argumentou que se todos os anos os deflúvios anuais fossem iguais, as capacidades dos reservatórios deveriam ser iguais ao deflúvio médio, pois bastaria estocar as águas do inverno para uso no verão.

Para considerar o efeito da variabilidade, Aguiar em sua metodologia preconizou que a capacidade do reservatório deveria ser estimada ordenando-se as séries de observações e computando-se as médias das metades superior e inferior (ver capítulo 2). Então, o açude deveria ser construído com igual à diferença entre essas duas médias.

6.3 O coeficiente de variação e o tamanho da série de observações

Pelo teorema central do limite pode-se determinar o tamanho da série observada que assegure com (1-α) 100% de confiança que o erro cometido na estimativa da média da população seja menor que uma quantidade pré-definida ε pode ser determinado pela relação:

$$n = \left(z_{\alpha/2}\sigma / \varepsilon\right)^2 \qquad 6.2$$

onde $z_{\alpha/2}$ representa a variável da normal padronizada para um nível de confiança de ($1-\alpha$) 100%, σ representa o desvio padrão da população e ε o erro cometido em valor absoluto. Para valores pré-fixados de α e ε o tamanho da série necessária em função de ***Cv*** pode ser obtido por:

$$n = KCv^2 \qquad 6.3$$

K é uma função de α e do erro admitido. Observe-se que o tamanho da série necessária cresce com o quadrado do coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Para se ter uma ideia de grandeza, no Nordeste dos Estados Unidos o valor regional para o ***Cv***

é na ordem de 0,25, valor estimado usando-se dados de 166 localidades (Vogel et al., 1995). Um estudo de regionalização do ***Cv*** no estado do Ceará aponta para uma variação do ***Cv*** de 0,8 a 1,4 que pode conduzir a uma média em torno de 1,2. Se uma série no Nordeste dos Estados Unidos com 30 anos de extensão conduz a um erro ε na estimativa do valor médio do deflúvio anual, para que se cometesse o mesmo erro em uma série do Ceará seriam necessários 691 anos de dados (Campos, 1996). Essa margem de erro, existente no processo, mostra que a introdução da incerteza é de fundamental importância para a região.

Ironicamente, são as regiões semiáridas onde menos dados são disponíveis. O que se preconiza é a aceitação do processo com altamente aleatório e a introdução da cultura da incerteza nas tomadas de decisões. Essa atitude é mais importante em regiões como o Nordeste brasileiro, parte da África e da Austrália. Em essência, a diferença entre o determinista e o probabilista é que o primeiro acha que tem certeza enquanto o segundo tem certeza que acha.

6.4 Estudo de caso: reservatório do Castanhão

Para analisar a variabilidade das vazões regularizadas, em um caso concreto, apresenta-se os resultados de um estudo do Açude Castanhão (Campos e Souza Filho 2005). O açude está situado no rio Jaguaribe, estado do Ceará e tem uma capacidade total de 6,7 bilhões de metros cúbicos, sendo 250 milhões de reserva intangível, e 4,2 bilhões de volume útil.

Ao analisarem o regime de escoamento do rio Jaguaribe em Castanhão, Campos e Souza Filho (2005) reconstituíram uma série histórica de 37 anos e definiram o regime hidrológico com os seguintes parâmetros: (SRH, 1998).

Volume afluente médio anual: 1.463,50 hm^3/ano

Coeficiente de variação dos deflúvios anuais: 1,41

Para estimativa da variabilidade da vazão regularizada do utilizaram-se as ferramentas da hidrologia estocástica e o processo de operação fictícia do reservatório Castanhão. O método foi desenvolvido nas seguintes fases:

Primeiramente foram geradas 150 séries de 30 anos de duração;

Simulou-se o açude Castanhão para as 150 séries sintéticas e obteve-se uma amostra de 150 valores da vazão regularizada pelo Castanhão com uma garantia mensal de 90%.

Determinaram-se se a média e o coeficiente de variação da vazão regularizada

Procedeu-se à simulação do reservatório com uma retirada constante igual vazão regularizada média com vistas a determinar a variabilidade da frequência de falha nas 150 séries de 30 anos.

A análise da variabilidade foi feita segundo dois enfoques. A primeira análise consistiu em fixar a frequência de falhas (10% dos meses) e calcular os valores da vazão regularizada para as 150 séries. A segunda análise consistiu em fixar a retirada igual às médias das vazões regularizadas com 90% e calcular para cada das 150 séries o valor da frequência de falhas. Os resultados obtidos nesses dois enfoques são apresentados a seguir.

6.4.1 Variabilidades da vazão regularizada

As 150 séries de vazões forneceram os parâmetros mostrados na Tabela 1. Observou-se que a série de vazões regularizadas pelo Castanhão segue, aproximadamente, uma distribuição Normal com média 1052.13 hm^3/ano e coeficiente de variação de 0,27. O coeficiente de assimetria obtido foi de -0,05. A Figura nº 1 mostra o histograma de frequência tem um comportamento muito próximo do que seria esperado de uma amostra de uma população Normal. Um estudo de frequências aponta que há uma probabilidade de 20% da vazão regularizada com 90% de garantia ser inferior a 800 hm^3/ano.

Tabela 5.2- Características da amostra de vazões regularizadas com 90% de garantia, pelo açude Castanhão, obtidas em 150 séries sintéticas de 30 anos de extensão.

Grandezas	Valor
Volume anual regularizado médio(hm^3)	1052.43
Volume anual regularizado máximo(hm^3)	1800,0
Volume anual regularizado mínimo(hm^3)	354,0
Desvio padrão(hm^3)	288,4
Coeficiente de variação(%)	27
Amplitude (hm^3/ano)	1837,5

Fonte: Campos e Souza Filho (2005)

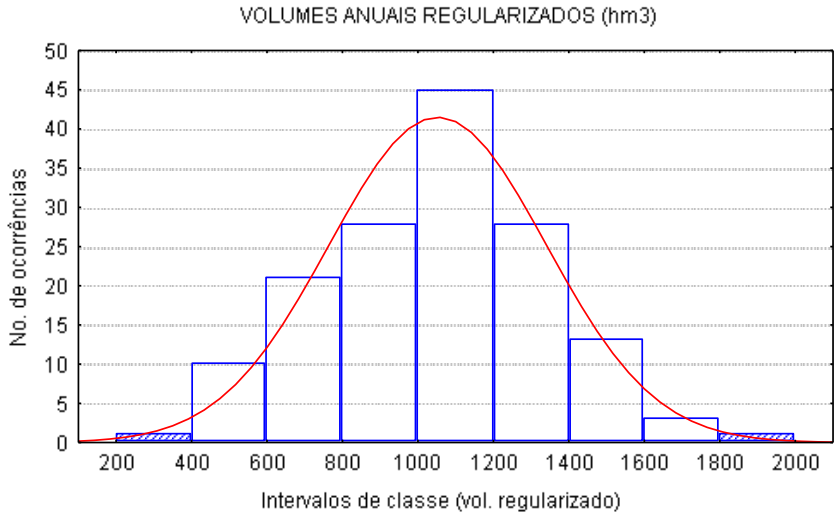


Figura 6.1 - Histograma dos volumes anuais regularizados pelo açude Castanhão obtido de simulação de 150 séries sintéticas de 30 anos. Fonte: (Campos e Souza Filho, 2005)

6.4.2 Sobre A Vazão Regularizada em Estado De Equilíbrio

Como referenciado no início do capítulo, o volume anual regularizado por um reservatório (M_T) é uma variável aleatória que depende do regime hidrológico do rio, das características morfométricas do reservatório, do regime climático do local, da garantia no fornecimento da água e também das condições iniciais do reservatório (S_0) e do horizonte de análise (N). Assim, mantendo-se todas as demais condições constantes, menos as duas últimas, tem-se:

$$E\{M_T\} = f(N, S_0) \qquad 6.3\ a$$

$$Var(M) = g(N, S0) \quad 6.3b$$

Quando o valor de N tende para infinito, tem-se

$$\lim_{n\to\infty}(E\{M_n\}) = M \quad 6.4a$$

$$\lim_{n\to\infty}(Var\{M_n\}) = 0 \quad 6.4b$$

Dessa maneira quando o horizonte de análise tende para infinito, o volume anual regularizado na fase transiente tende para um valor denominado volume anual regularizado em estado de equilíbrio, denotado por M o qual é independente das condições iniciais do reservatório. Por sua vez, a variância do volume anual regularizado tende para zero. A representação gráfica desse processo pode ser vista esquematicamente na Figura 6.2

O valor do volume anual em estado de equilíbrio, portanto livre das incertezas do tipo 3, é o calculado pelo Diagrama Triangular de Regularização.

6.4 Síntese do capítulo

Do capítulo pode-se concluir a importância do coeficiente de variação dos deflúvios anuais na determinação do volume regularizado por um reservatório. A vazão regularizada por um reservatório deve ser entendida como uma variável aleatória. Os estudos de Campos e Souza Filho (2005) evidenciaram a alta variabilidade da variável aleatória vazão regularizada em reservatórios de rios no regime Semiárido do Nordeste Brasileiro. Observe-se que o coeficiente de variação da vazão regularizada pelo reservatório do Castanhão é de 0,30, ou seja da mesma ordem de magnitude do coeficiente de variação das chuvas anuais em muitos postos pluviométricos do estado do Ceará.

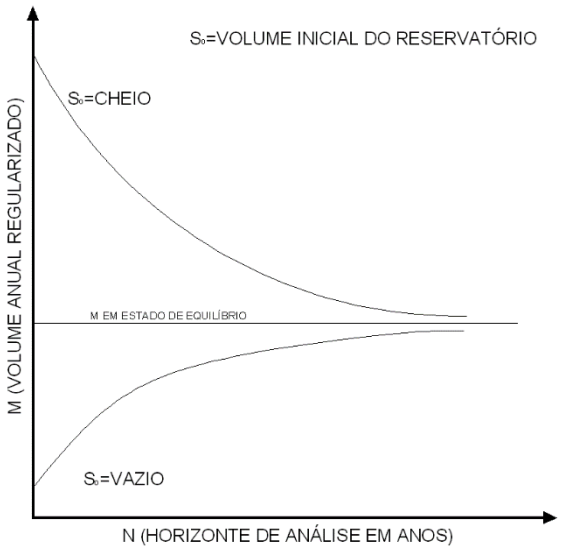


Figura 6.2 – O diagrama de vazões regularizadas e a vazão regularizada em estado de equilíbrio.

O valor obtido pelo DTR refere-se à vazão regularizada em estado de equilíbrio, valor de convergência da vazão regularizada, para todas as condições iniciais de simulação, quando o horizonte de análise tende para infinito. Esse valor é um parâmetro do sistema reservatório – bacia hidrográfica para qualquer regra de operação do reservatório.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

Aguiar, F. G.. – *Estudo Hidrométrico Do Nordeste Brasileiro*. Boletim Técnico. Departamento Nacional De Obras Contra As Secas. V.36, N.2, Julho/ Dez. De 1978

Campos, J.N.B. – *Dimensionamento De Reservatórios: O Método Do Diagrama Triangular De Regularização*. Fortaleza: Edições UFC. 1996.-51 p.

CAMPOS, J. N. B. "O Processo de estocagem de águas em reservatórios: o papel da variabilidade dos deflúvios". In: III SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RECURSOS HÍDRICOS. Salvador, Brazil., 1996.

Campos, J.N.B, Souza Filho, F.A e Araújo, J.C. Errors and variability of reservoir yield estimation as a function of the coefficient of variation of annual inflows. In: 270 Congresso da Associação internacional de Pesquisas Hidráulicas. Proceedings of theme A. p.524-529.San Francisco 1997.

Cullen, Allan H. – *Rios Prisioneiros A História Das Barragens*. Belo Horizonte. Editora Itatais Ltda. 1964.-200p.

Hazen, A. – "S*torage to Be Provided In Impounding Reservoirs for Municipal Water supply"* B. Trans. ASCE, 77 1914, P.1539 1640.

Mc Mahon, Thomas A. E Russel G. Mein.- *Reservoir Capacity And Yeld.* Elsevier Scientific Publishing Company. New York 1978.

Vogel, Richard M., **Neil M. Fennssey E Ralph A. Bolognese**.- *Storage-Reliability-Resilience-Yeld Telations For Northeastern United Stated.* Journal Of Water Resources Planning And Management Set. 1965: P.365-374.

Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará .*Relatório Técnico: Estudo Frequencial de Níveis de Água do Açude Castanhão com vistas à Proteção da Cidade de Jaguaretama. Fortaleza, 1998.*

Svanidze, G.G. *Mathematical Modeling of Hydrologic Series for Hydroelectric and Water Resources Computations*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA, 1980.

Vincens,G.J., I. Rodrigues-Iturbe e J.C. Shaake. *A Bayesian framework for the use of regional information in hydrology. Res.,11(3). 1975 p.405-4114.*

7. AS FORMAS DOS RESERVATÓRIOS E A VAZÃO REGULARIZADA

A parcimônia dos parâmetros é um dos desafios aos pesquisadores que buscam métodos e fórmulas que sintetizem os processos naturais modelados. A parametrização da equação do balanço hídrico de um reservatório implica em simplificações. Para obter os parâmetros adimensionais do método do DTR, Campos (1987) representou a tabela cota x volume do reservatório por uma parábola cúbica da forma $Z(h) = \alpha h^3$.

Como pesquisadores de ciências exatas, procuramos adaptar o nosso fenômeno às ferramentas que dispomos. A matemática é a principal delas. Assim, por conveniência do método, da parcimônia de parâmetros e da homogeneidade dimensional, a forma do reservatório é representada por uma equação de uma parábola cúbica.

Neste capítulo apresentam-se várias alternativas de estimar substituir a tabela cota x volume de um reservatório por uma

equação matemática e também uma avaliação dos erros resultantes na estimativa do volume regularizado. Adicionalmente, apresenta-se uma análise dos tipos de formas dos lagos segundo a classificação de Hånkanson.

7.1 Representação da curva cota x volume por equações

Vários pesquisadores estudaram as possíveis representações das curvas hipsográficas de reservatórios por equações matemáticas. A maior parte dos estudos analisa erros cometidos nas estimativas dos *volumes* reais dos reservatórios decorrentes da substituição das curvas por equações (Molle e Cadier, 1992; Torreão, 1997). Os parâmetros da equação são obtidos através do método dos mínimos quadrados.

Como as equações são utilizadas, em última instância, para a estimativa da capacidade de regularização dos reservatórios, Campos et. al. (2004) estimaram os erros cometidos na avaliação da vazão regularizada para $\boldsymbol{\beta}$ várias equações matemáticas em uma amostra de 45 reservatórios do estado do Ceará.

7.1.1Os modelos matemáticos analisados

A equação matemática mais utilizada para representação da curva cota x volume de um reservatório tem a seguinte forma:

$$V(h) = \alpha.h^{\beta} \qquad 7.1$$

Onde $\boldsymbol{V(h)}$ representa o volume acumulado até a altura da água $\boldsymbol{h}$ (medida a partir do ponto mais profundo) e $\boldsymbol{\alpha}$ e $\boldsymbol{\beta}$ são os parâmetros estimados a partir da tabela cota x volume.

Há várias maneiras de calcular os valores de $\boldsymbol{\alpha}$ e $\boldsymbol{\beta}$. Em alguns casos, na busca de uma equação dimensionalmente homogênea, o valor de $\boldsymbol{\beta}$ é feito igual a três - ([V] = [L^3]). No estudo referido, as aproximações da curva cota x volume foram procedidas de cinco maneiras distintas.

Modelo 1. - O valor de $\boldsymbol{\beta}$ é três e o valor de α é estimado pela equação

$$\alpha = (K)/h_{MAX}^3 \qquad 7.2$$

Sendo $\boldsymbol{K}$ a capacidade do reservatório, e $\boldsymbol{h_{MAX}}$ a altura máxima da água (medida no nível do vertedouro). Nesse caso o modelo preserva os valores de $\boldsymbol{K}$ e de $\boldsymbol{h_{MAX}}$.

Modelo 2. - O valor de $\boldsymbol{\beta}$ é três e o valor de α é estimado pelo método dos mínimos quadrados (Eq. 7.3).

$$\propto = \frac{n\sum x.y - \sum x.\sum y}{n\sum x^2 - (\sum x)^2} \qquad 7.3$$

Com os valores de y e x representando os volumes parciais (Vi) e as respectivas alturas, obtidas da tabela cota x volume.

1. Nesse modelo, preserva-se a capacidade e não se preserva o valor de $\boldsymbol{h_{MAX}}$, o qual é obtido da equação.
2. - O valor de $\boldsymbol{\beta}$ é três e o valor de α é estimado pelo método dos mínimos quadrados (Eq. 7.2), porém preserva-se o valor de $h_{MAX.}$, enquanto que o valor de K é estimado a partir da equação 7.1.
3. - O valores de α e $\boldsymbol{\beta}$ são estimados pelo sistema de equações 7.3 e 7.4.
4. $$\log(\alpha) = \bar{y} - \beta\bar{x} \qquad 7.4$$

5. Com os valores de y e x representando os volumes parciais (Vi) e as respectivas alturas, obtidas da tabela cota x volume, y e x dos volumes parciais e respectivas alturas. Nesse modelo, preserva-se a capacidade e não se preserva o valor de $h_{MAX.}$, o qual é obtido da equação 7.1.
6. – Os mesmos valores de α e β porém preserva-se o valor de $h_{MAX.}$, enquanto que o valor de K é estimado a partir da equação.

7.1.2 Comparação entre os modelos

Para avaliar o desempenho das equações Campos et. al (2004) aplicaram os cinco diferentes modelos a 45 reservatórios do Nordeste brasileiro, calcularam as vazões regularizadas e comparam os resultados com as vazões regularizadas obtidas com a utilização da curva cota x volume real. As simulações foram procedidas utilizando-se séries históricas, de curta duração, e séries sintéticas de longa duração.

Os autores avaliaram os erros médios relativos, como indicadores de viés, e as médias dos valores absolutos dos erros, como indicadores de precisão da estimativa. Os resultados mostraram que não há viés na estimativa da vazão regularizada em decorrência da substituição da tabela cota x volume pelas equações matemáticas analisadas.

Nas figuras 7.1 e 7.2 e tabelas 7.1 e 7.2 pode-se observar que em média os erros cometidos são próximos a zero. A média do erro relativo é menor que um por cento, enquanto a média do valor absoluto do erro é menor do que dois por cento.

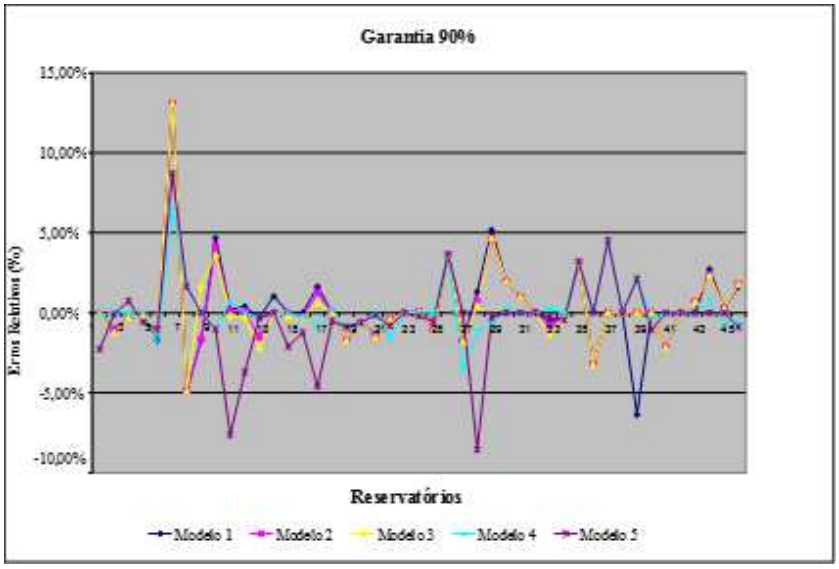


Figura 7.1 – Erros relativos, por equação, na estimativa das vazões regularizadas com 90% de garantia utilizando-se séries históricas de uma amostra de 45 reservatórios do Nordeste do Brasil

Tabela 7.1. Erro médio relativo das vazões geradas com a série histórica (em porcentagem)

Equação	Nível de Garantia			
	80 %	90 %	95 %	98 %
Modelo 1	0,19	0,27	0,15	0,08
Modelo 2	0,29	0,31	0,14	0,09
Modelo 3	0,35	0,31	0,22	0,03
Modelo 4	0,54	0,20	0,18	0,15
Modelo 5	0,31	0,34	0,30	0,36

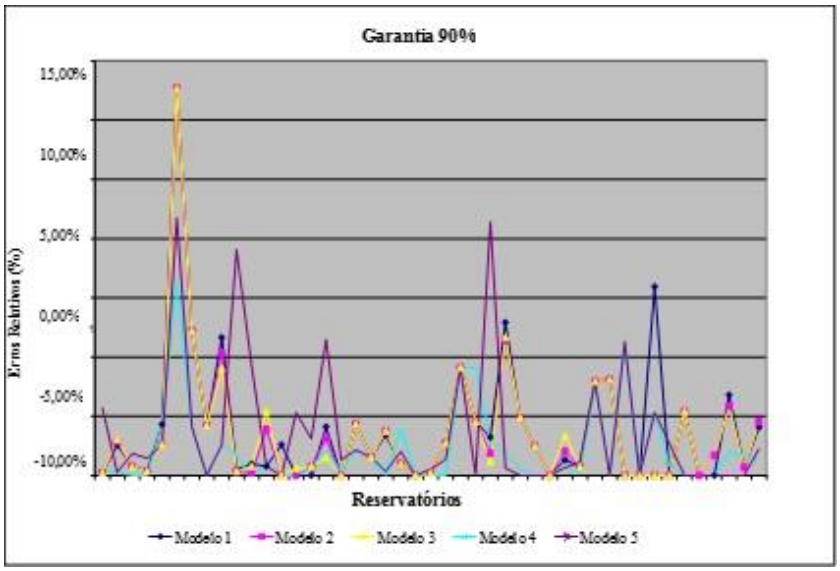


Figura 7.2 –Erros, em valores absolutos, decorrentes da substituição da tabela cota x volume por quatro modelos de equações matemática em uma amostra de 45 reservatórios do Nordeste do Brasil.

.**Tabela 7.2.** Erros em valores absolutos, nas vazões regularizadas obtidas pela substituição da tabela cota volume por uma equação matemática

Equação	Nível de Garantia			
	80 %	90 %	95 %	98 %
Modelo 1	1,79	1,60	1,50	1,18
Modelo 2	1,57	1,42	1,37	1,05
Modelo 3	1,67	1,42	1,47	1.17
Modelo 4	1,22	0,86	0,75	0,94
Modelo 5	2,27	1,43	1,28	1,47

Ao se analisarem os reservatórios individualmente nota-se que em alguns poucos casos o erro em valor absoluto supera os quatro por cento. Há um único caso em que o erro supera o valor de 12%. Resta saber quais são as características dos reservatórios que levam a esses erros mais elevados. É o que se analisa a seguir utilizando-se uma classificação dos tipos de reservatórios.

7.1.3 Síntese da seção

Os autores concluíram que:

- Não existe viés nas estimativas das vazões regularizadas utilizando-se qualquer uma das equações para a substituição das relações entre cotas e volumes, uma vez que os erros médios relativos são muito próximos de zero.
- Não há ganhos significativos em precisão (diminuição do erro em relação à utilização da curva cota-volume real do reservatório) com a complexidade da equação. A utilização do modelo 1, que oferece maior facilidade para o cálculo, pode ser utilizada sem problemas.
- A utilização de séries históricas e sintéticas não parece causar alterações significativas nos resultados sendo, portanto, as conclusões válidas para os dois casos.

7.2. As classes dos lagos segundo Hånkanson

A classificação de reservatórios mais adotada na literatura deve-se a Hånkanson (1981). Hånkanson estabeleceu um conjunto de seis curvas em um plano cartesiano onde no eixo X encontram-se os valores da área do lago em percentuais da área máxima e no eixo y os valores da profundidade em percentuais da profundidade máxima. As seis curvas delimitam cinco regiões

que Hånkanson denominou de: *Muito Convexo*, *Convexo*, *Ligeiramente Convexo*, *Linear* e *Côncavo* (Figura 7.3). Para se ter uma ideia da forma desses reservatórios foram confeccionadas curvas mostrando suas variações desde muito convexo a côncavo figuras 7.4a a 7.4d)

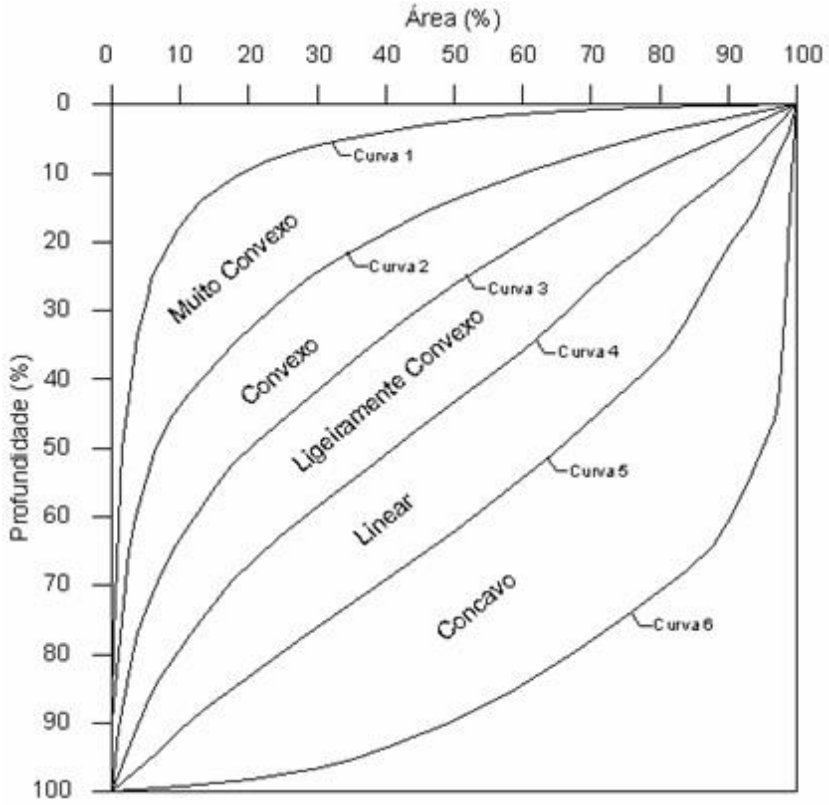
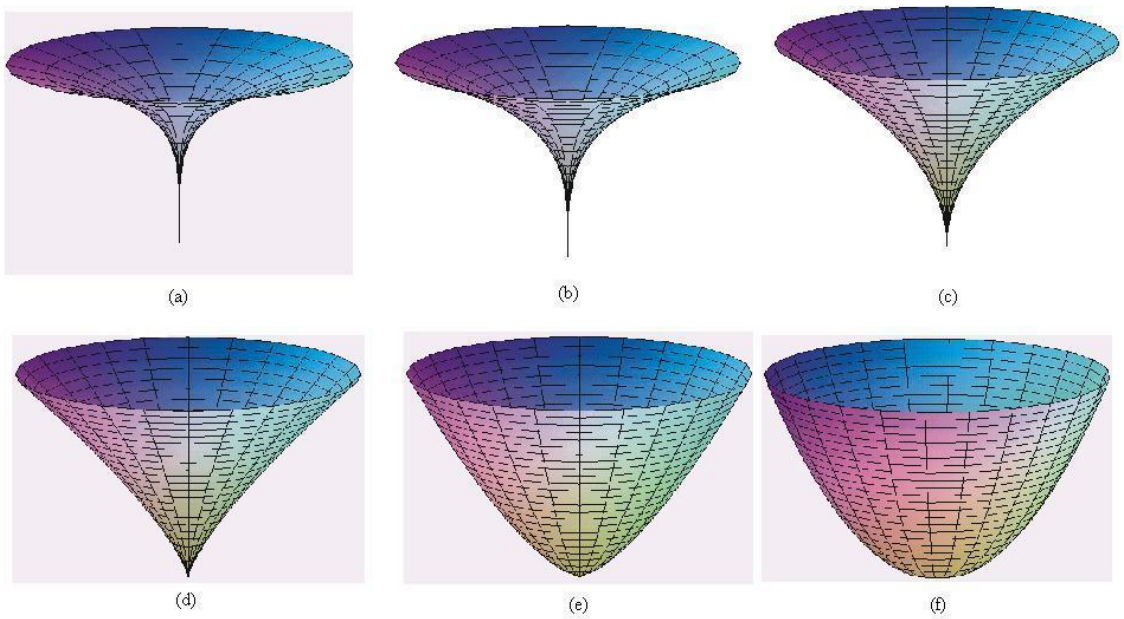


Figura 7.3 – Classes de formas de lagos segundo Hankanson .

Duas questões podem surgir: 1) Como os reservatórios de uma determinada região se distribuem entre as categorias de Hånkanson, e 2) como as diferentes classes comportam-se com relação às modelos matemáticos de representação das curvas hipsográficas? Dois estudos Nascimento et. al. (2003) e Campos et. al (2002) procuraram responder a essas questões.



3)

4) Figura 7.4 a – muito convexo, b – muito convexo-convexo, c – convexo-ligeiramente convexo, d – convexo-linear, e – linear-côncavo, f – côncavo.

7.2.1 Classes de reservatórios segundo Hånkanson: um estudo de caso.

Em uma amostra de 20 reservatórios no Nordeste brasileiro encontrou-se que os reservatórios se enquadram nas seguintes classes de Hånkanson: 19 ligeiramente convexos; 7 convexos e 4 lineares. Não houve registro de reservatórios muito convexos e côncavos. Um estudo utilizando uma amostra mais abrangente está em desenvolvimento. (Campos et. al.2002)

7.2.2 Erros na estimativa da vazão regularizada segundo a forma do reservatório

Nascimento et. al. (2003) fizeram um estudo para avaliar os erros cometidos na vazão regularizada ao se substituir a tabela cota – volume pela equação da parábola cúbica (modelo 1) para as diferentes formas de reservatórios. Os autores criaram seis reservatórios hipotéticos, cada um enquadrando-se à correspondente curva hipsográfica *cota vs. área* limítrofe de duas classes consecutivas, numeradas na Tabela 3. O estudo foi procedido para quatro garantias anuais diferentes: 80%, 90%, 95% e 98%.

As conclusões do estudo, dados da Tabela 4, foram as seguintes:

A aplicação do método aos reservatórios da classe muito convexo apresenta um erro significativo, superior a 10%, com viés positivo – superestimava da vazão regularizada;

A aplicação do método aos reservatórios da classe côncavo apresenta um erro da ordem de 4 a 5%, com viés negativo–subestimativa da vazão regularizada;

A aplicação do método aos reservatórios entre a classe ligeiramente convexo, convexo e linear, apresentam erros insignificantes – menor que 2%.

Tabela 3 - Definição dos reservatórios hipotéticos ajustados à classificação de Hånkanson.

Curva	Reservatório Hipotético	Simbologia
1	Muito Convexo	MCX
2	Muito Convexo – Convexo	MCX – CX
3	Convexo – Ligeiramente Convexo	CX – LCX
4	Ligeiramente Convexo – Linear	LCX – L
5	Linear – Côncavo	L – CV
6	Côncavo	CV

Tabela 4 – Erros médios nas estimativas das vazões regularizadas ao se transformar o reservatório para a forma cúbica para os reservatórios hipotéticos de Hånkanson.

Garantia (%)	MCV+	MCV-CV	CV-LCV	LCV-LN	LN-CC	CC
80	12,74%	5,37%	1,23%	-1,35%	-3,17%	-4,57%
90	10,62%	5,22%	1,26%	-1,30%	-2,86%	-4,30%
95	9,11%	4,69%	1,15%	-1,33%	-3,05%	-4,50%
98	8,28%	4,58%	1,00%	-1,36%	-3,12%	-4,97%

7.3 Síntese do capítulo

A representação matemática da tabela cota-volume de reservatórios por equações matemáticas do tipo $V = \alpha h^3$ é muito precisa

para reservatórios que se enquadram nas classes ligeiramente convexo, convexo e linear. Estudos preliminares indicam que a grande maioria de reservatórios do Semiárido brasileira enquadra-se nessas classes.

O fator de forma α pode ser estimado pela relação entre a capacidade do reservatório ($\boldsymbol{K}$) e o cubo da altura máxima ($\boldsymbol{h_{MAX}^3}$). Esse estimador apresenta a vantagem de preservar os valores da capacidade e da altura máxima de água e ter mesma ser da mesma ordem de precisão que estimadores mais complexos que usam o método dos mínimos quadrados. Enfim, se há dois estimadores igualmente eficientes e justos, o mais simples deve ser o escolhido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. V. ; STUDART, T. M. C. .A Busca de um Fator de Correção para o Erro no Cálculo da Vazão Regularizada em Relação à Forma do Reservatório. In: VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2002, Maceió. VI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 2002.

CAMPOS, J. N. B., NASCIMENTO, L. S. V., STUDART, T. M. C. e BARCELO, D. G. (2004) análise da substituição matemática das relações de cota vs. volume de reservatórios via simulação de Monte Carlo In: XXI CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDRÁULICA 2004, São Pedro,SP:IAHR.

HÅNKANSON, L. (1981). A Manual of Lake Morphometry. Springer Verlag, Berlin.

MOLLE, F. e CADIER, E. (1992). *Manual do Pequeno Açude*. SUDENE/ORSTOM, Recife, Pe.

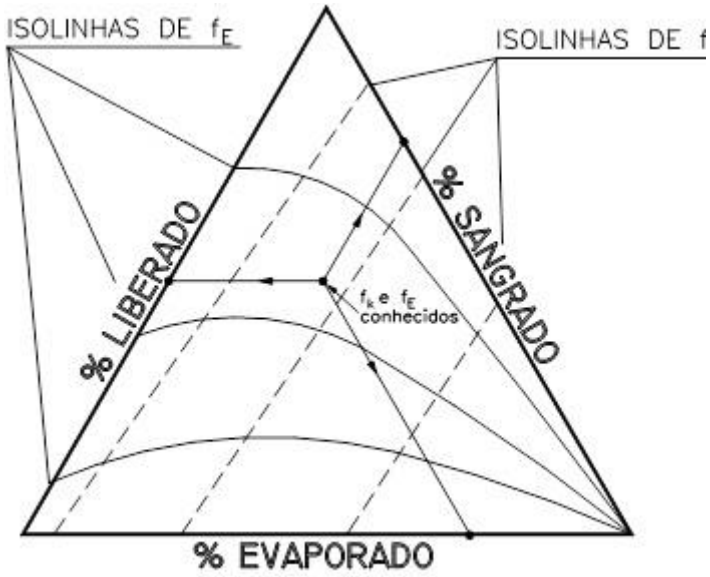
NASCIMENTO, L. S. V.; CAMPOS, J. N. B. ; STUDART, T. M. C. . MORFOLOGIA DE RESERVATÓRIOS E O VIÉS NA ESTIMATIVA DA VAZÃO REGULARIZADA. In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2003, Curitiba. XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2003.

TORREÃO, T. R. (1997). *Erros nas estimativas de volumes de reservatórios a partir* de *alturas e áreas máximas.* Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará, UFC, Fortaleza, Ceará.

ANEXO

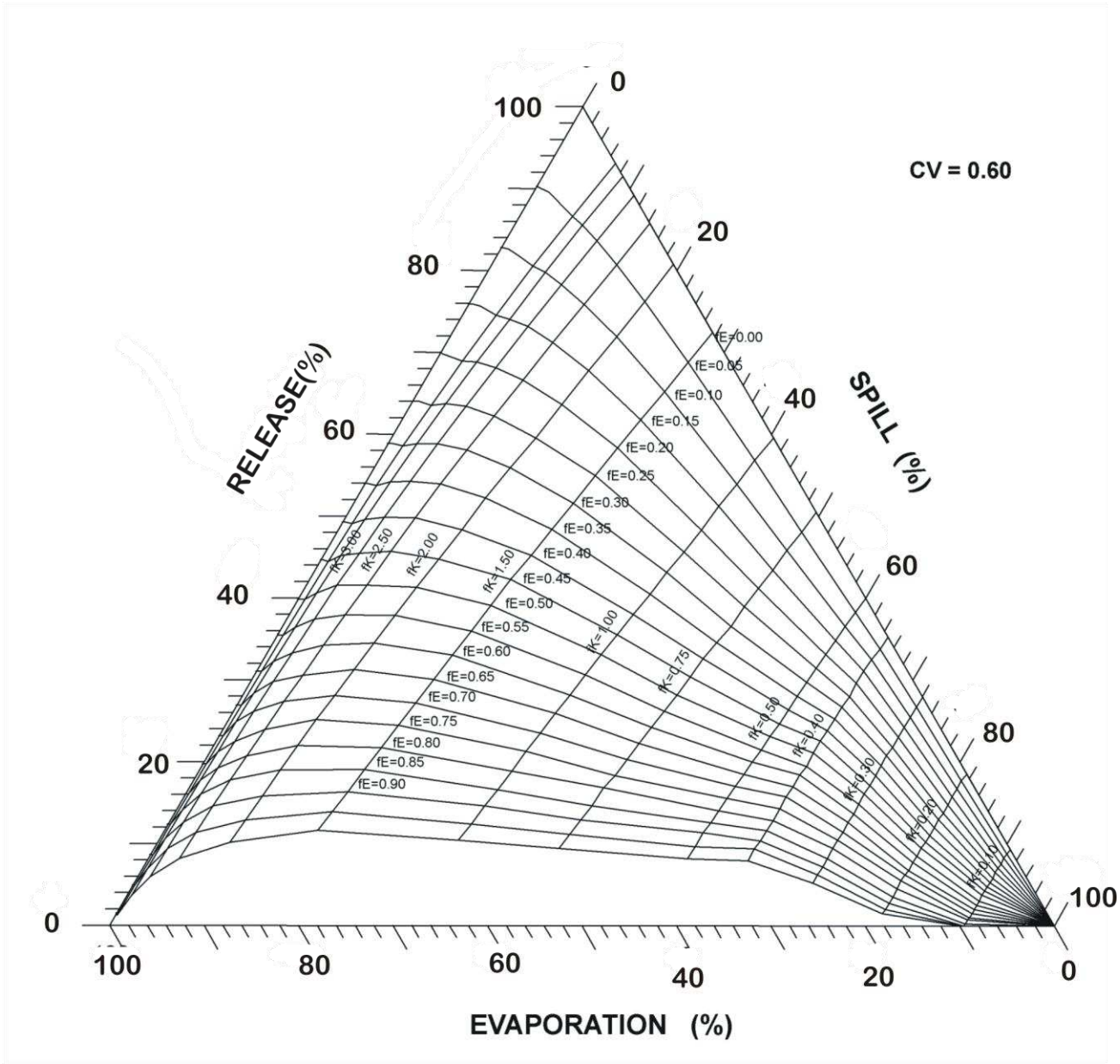
São apresentados nesse anexo os gráficos referentes aos diagramas triangulares de regularização. Para determinar os respectivos valores da utilização, evaporação e sangria, as retas para determinar o ponto de encontro devem ser obedecidas as direções mostradas na figura abaixo.

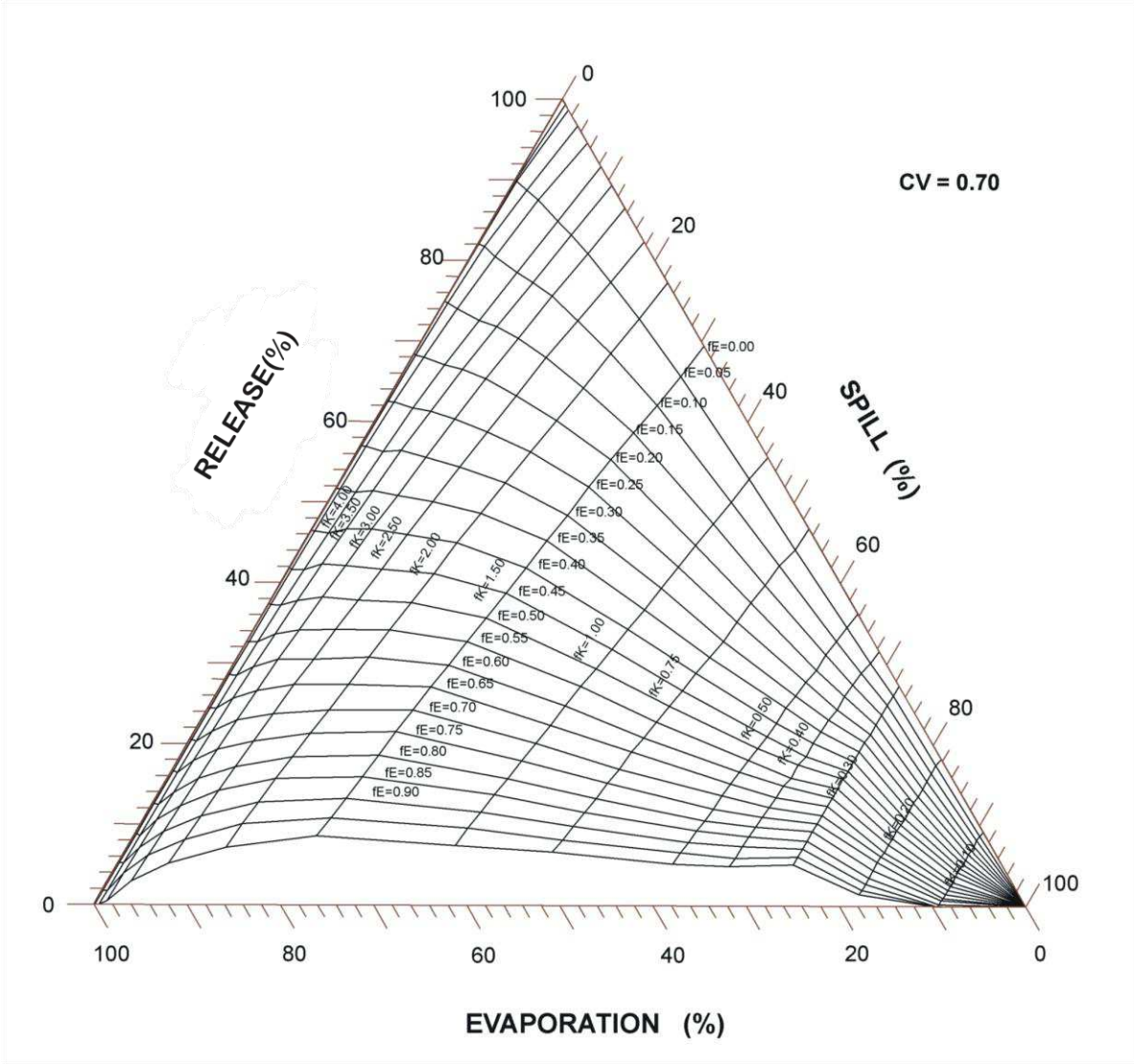
Utilizando o DTR

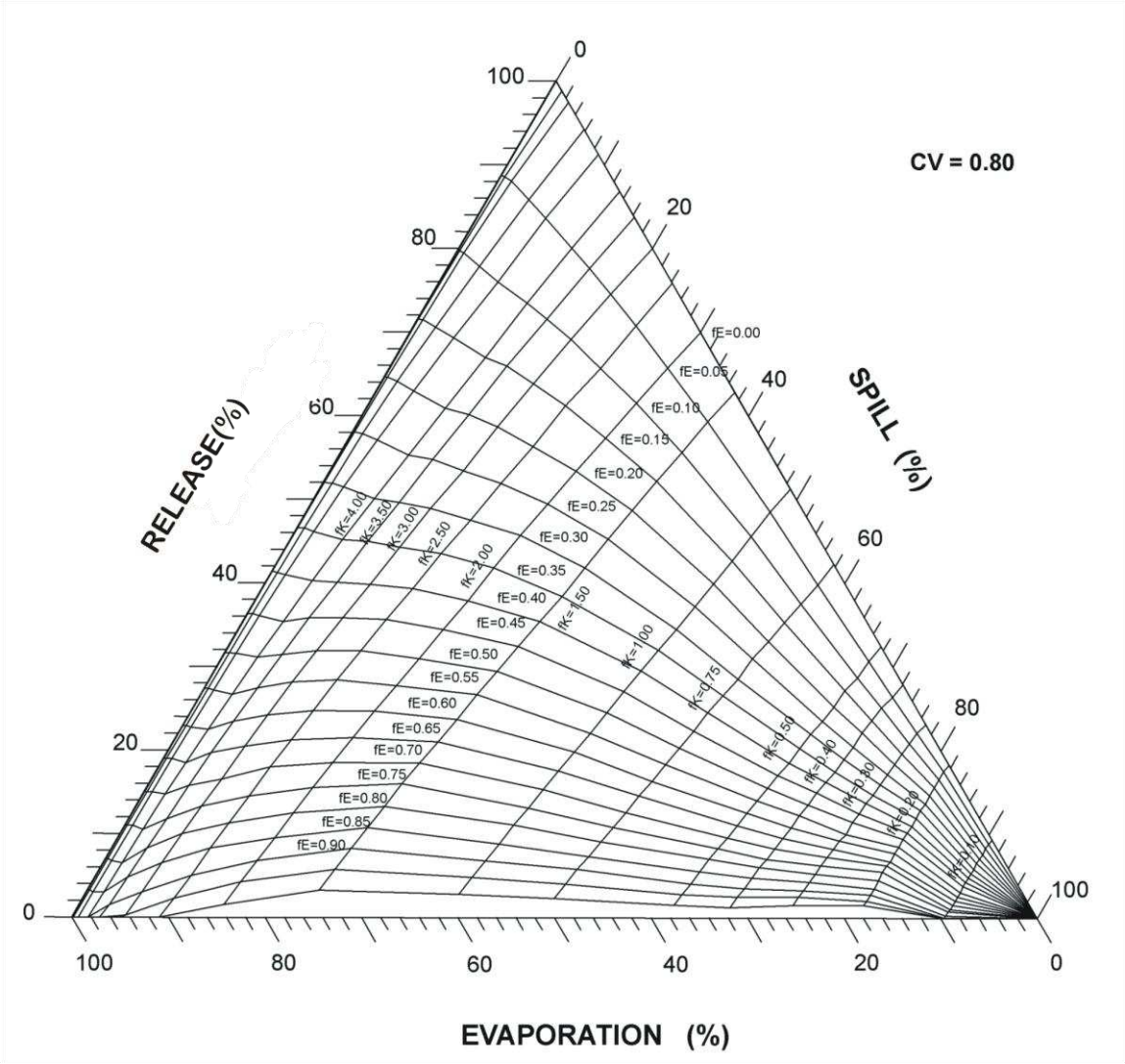


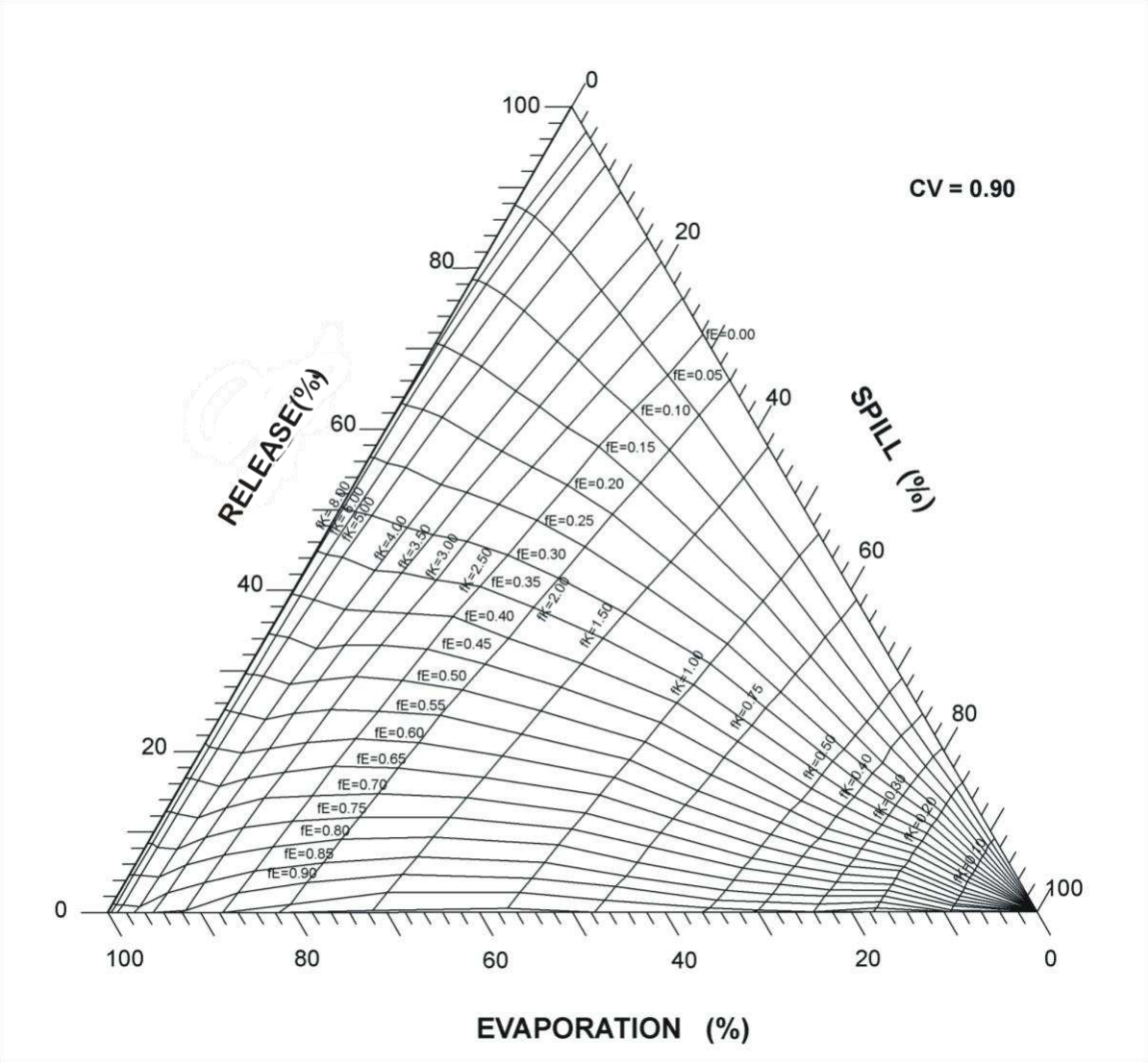
INSTRUÇÕES

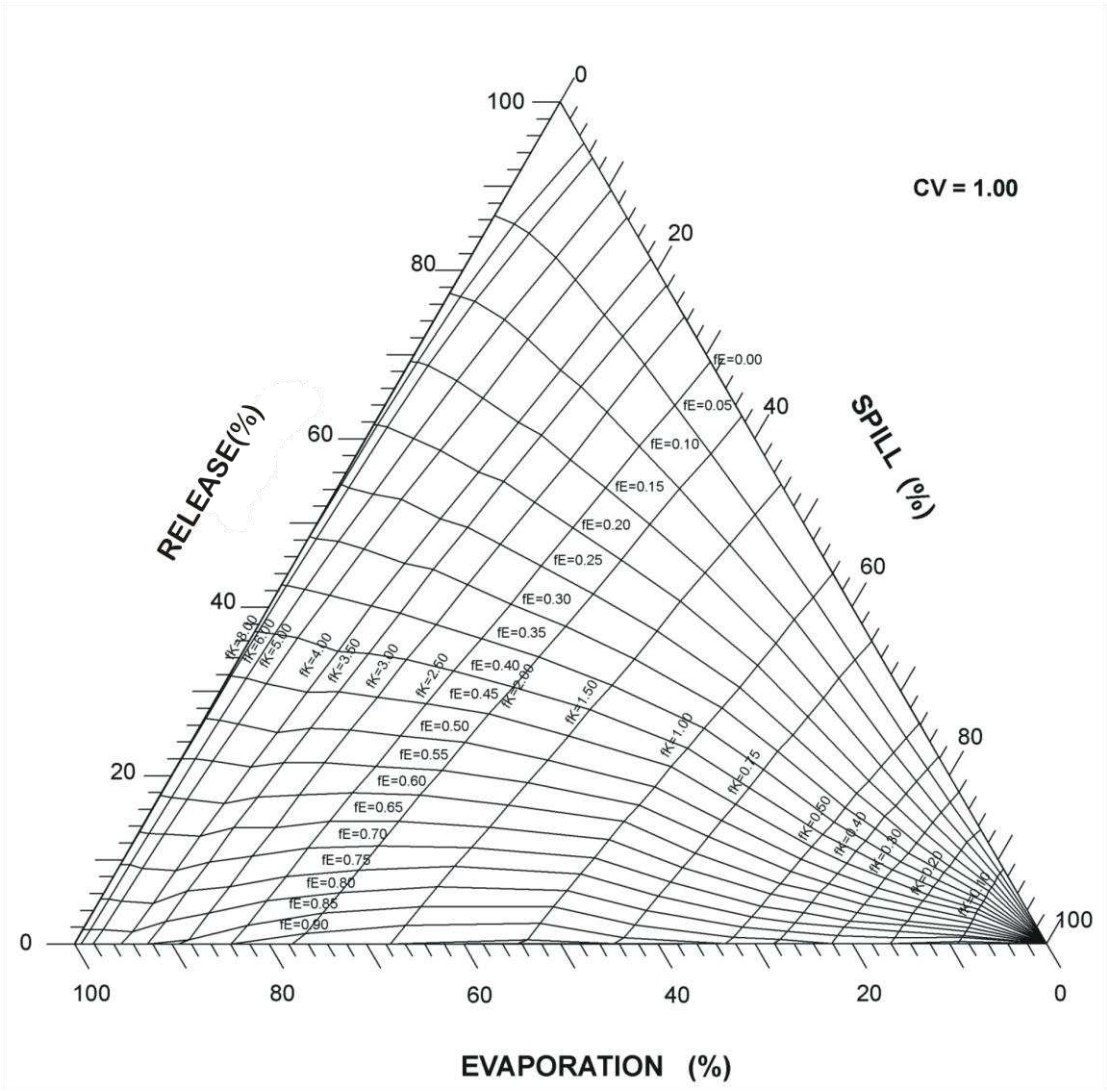
i. Escolher o ponto de encontro das isolinhas f_K e f_E;
ii. traçar uma paralela ao eixo *%evaporado* determinar no eixo *%liberado* o volume efetivamente regularizado(R%) como percentagem do volume afluente anual (μ);
iii. traçar uma paralela ao eixo *%liberado* determinar no eixo *%sangrado* o volume médio sangrado como percentagem do volume afluente anual (μ);
iv. traçar uma paralela ao eixo *%sangrado* determinar no eixo *%evaporado* o volume médio evaporado como percentagem do volume afluente anual (μ);
v. o volume regularizado M é aproximadamente igual a R/0,95

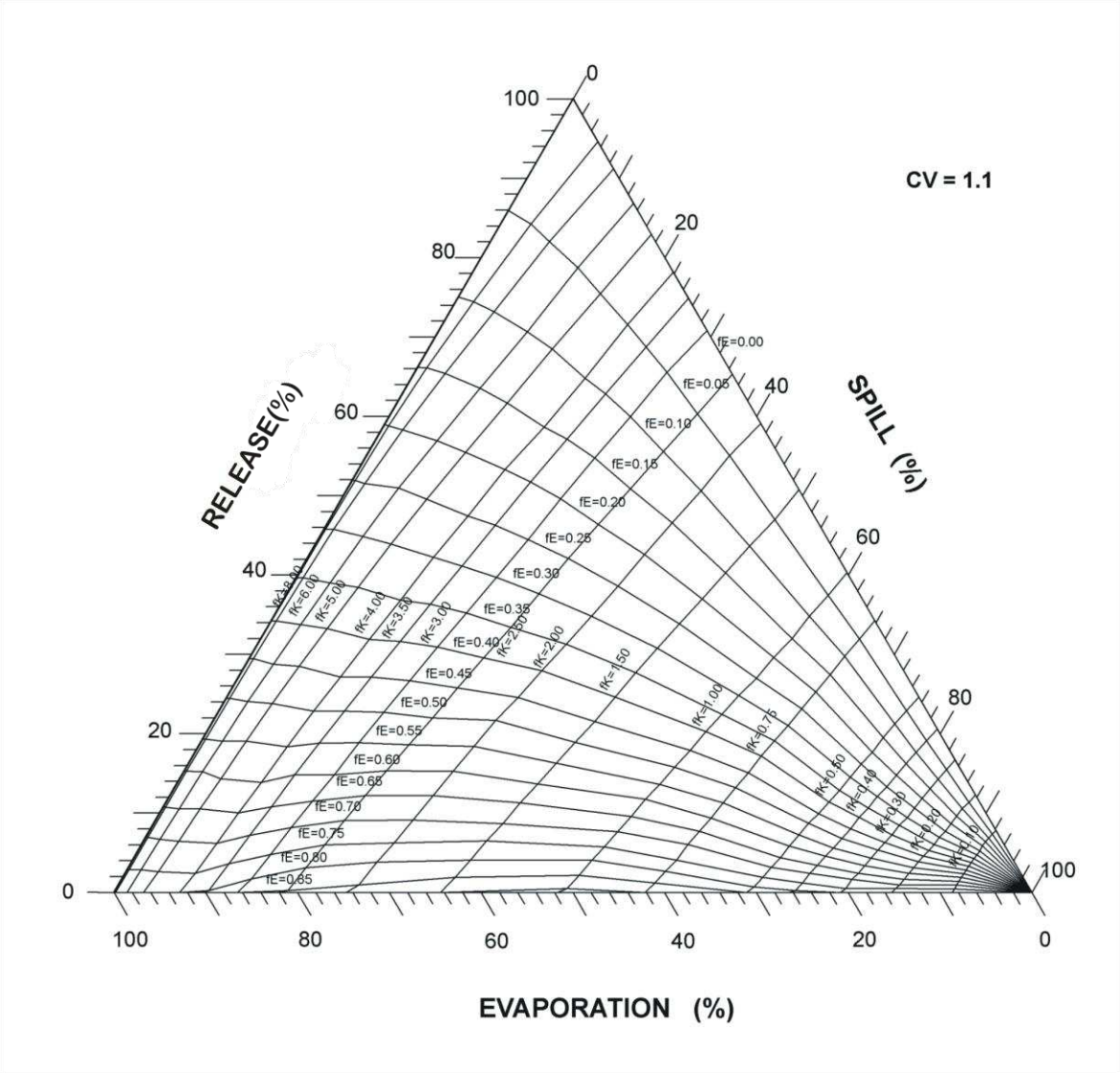

CV = 0.60
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fE=0.90
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10

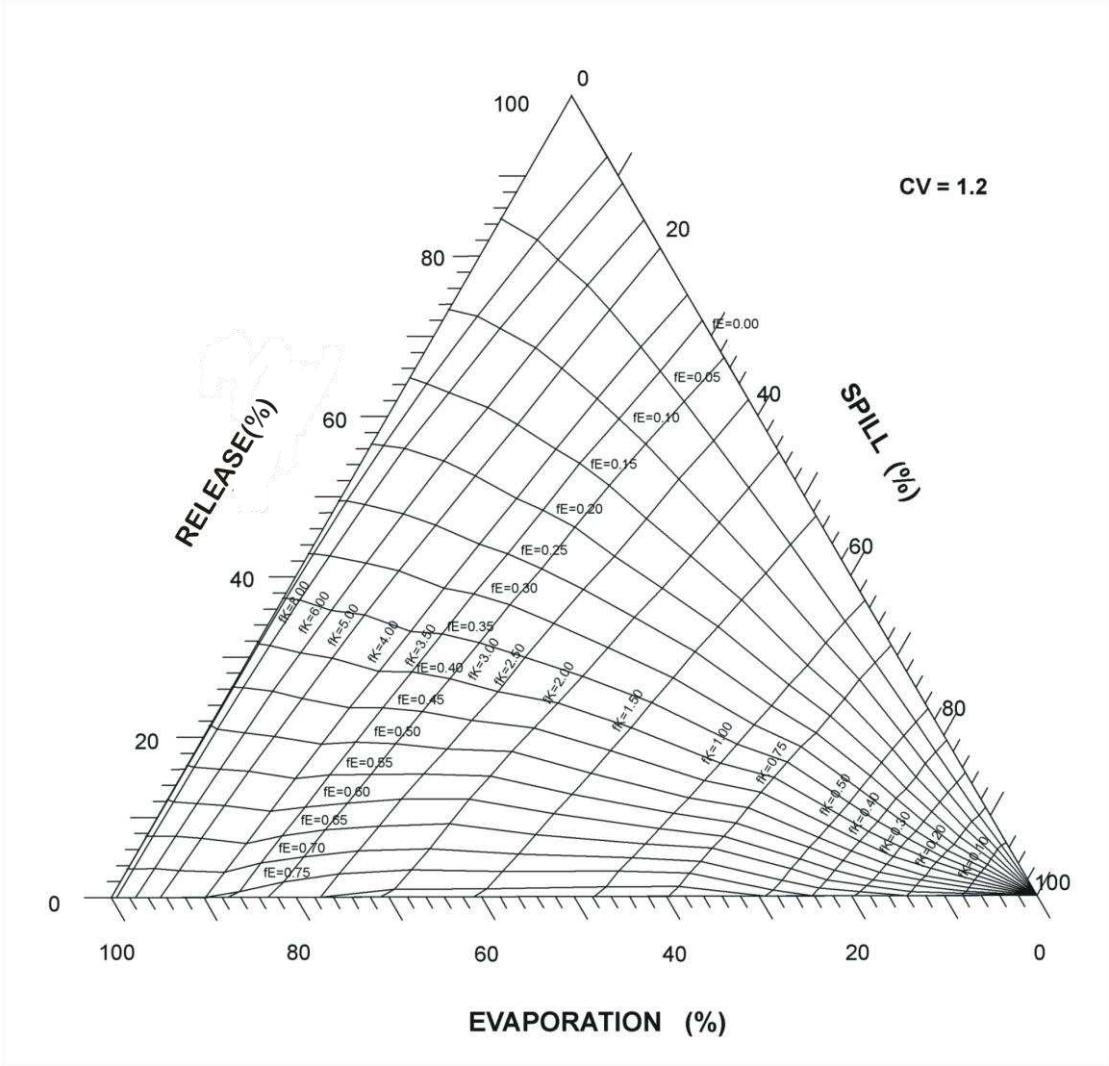

CV = 0.70
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fE=0.90
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10

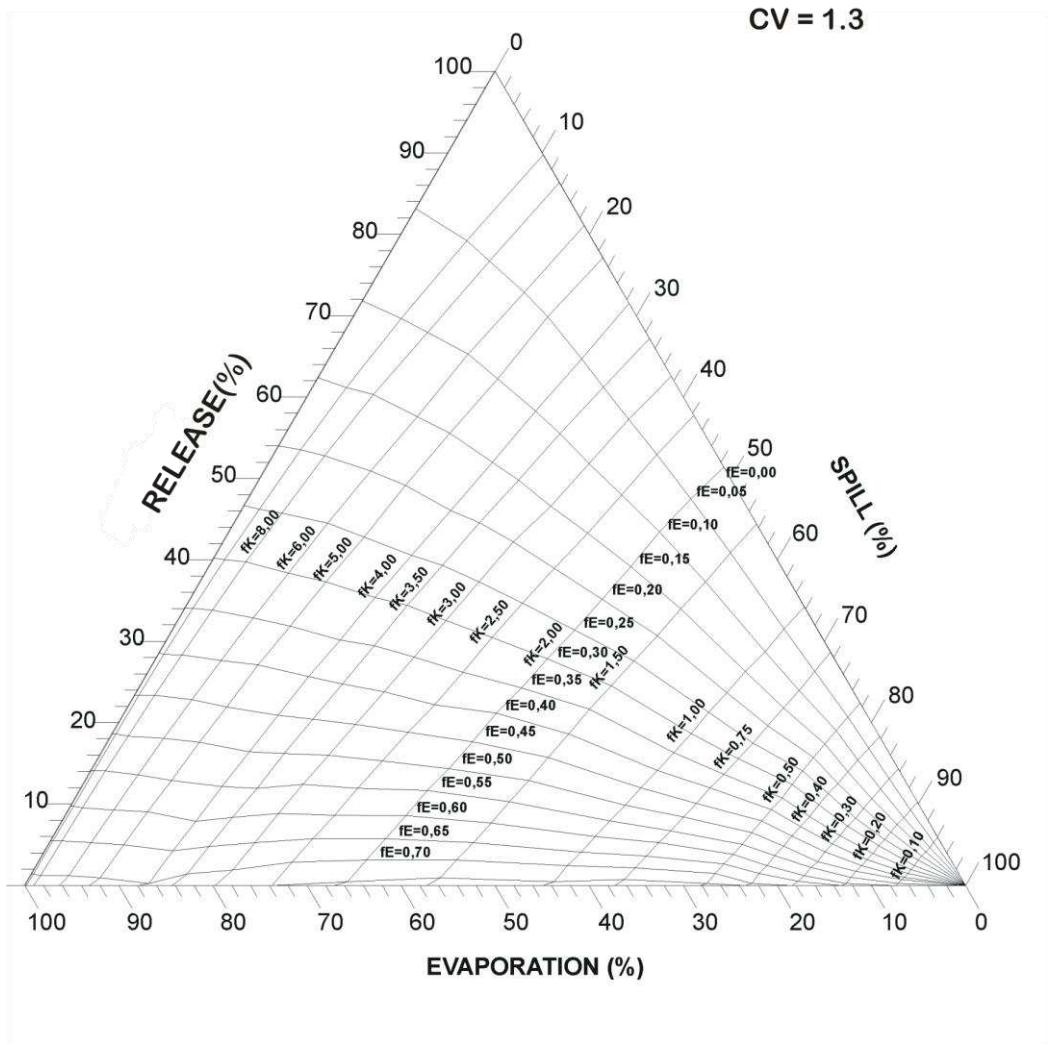

CV = 0.80
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fE=0.90
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.25
fK=0.20
fK=0.15

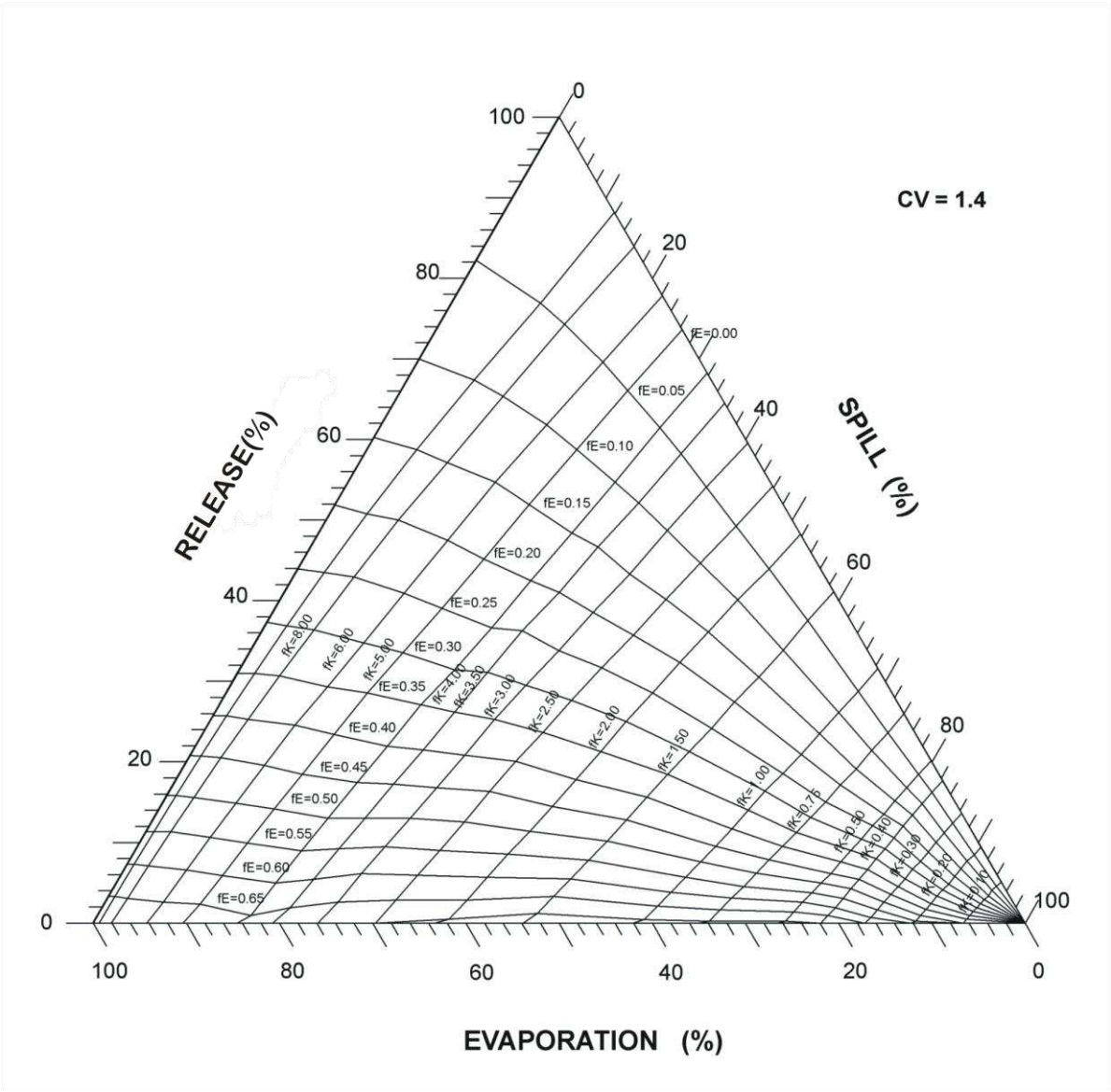

CV = 0.90
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fE=0.90
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.33
fK=0.25
fK=0.20
fK=0.15

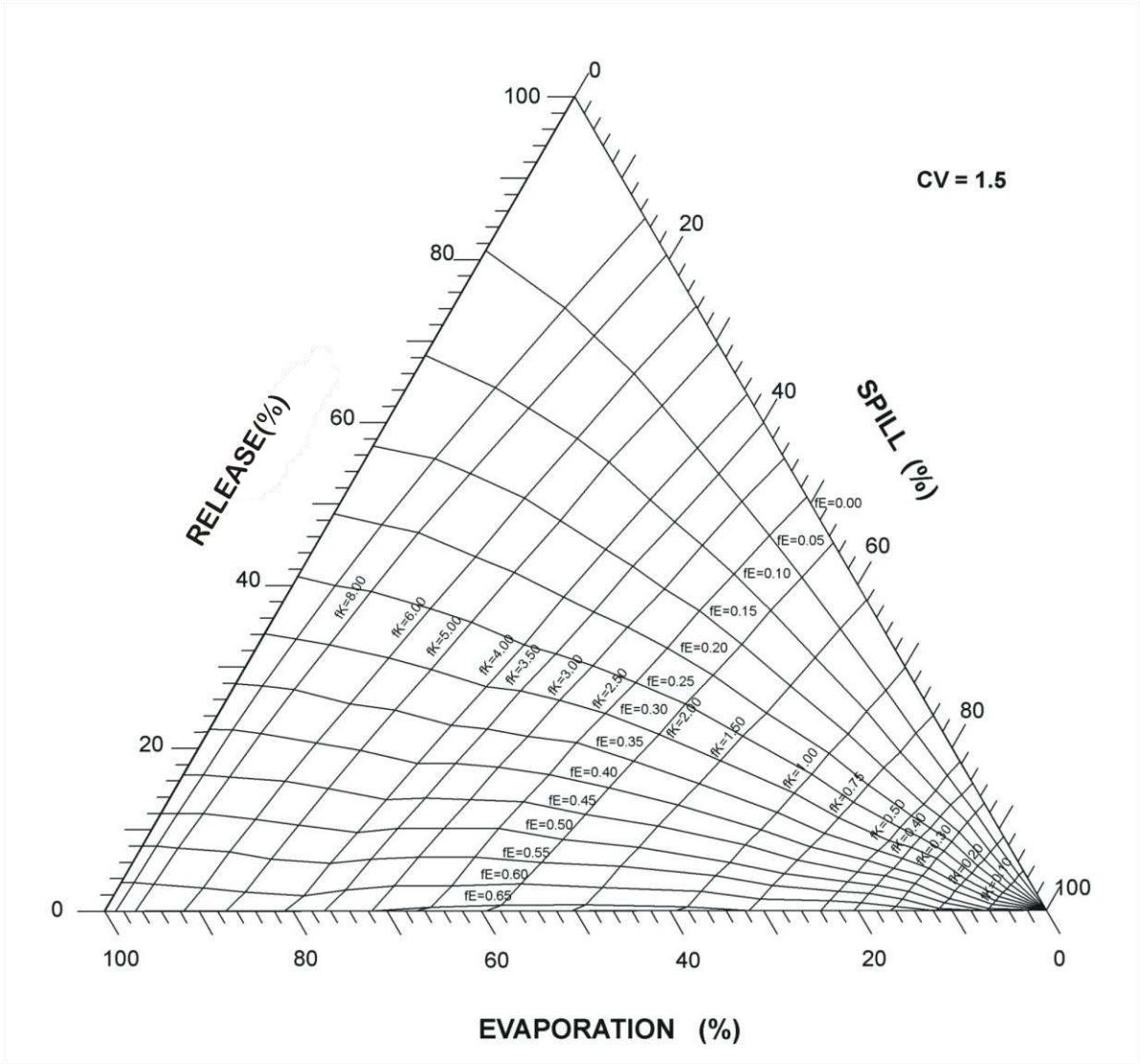

CV = 1.00
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fE=0.90
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.15

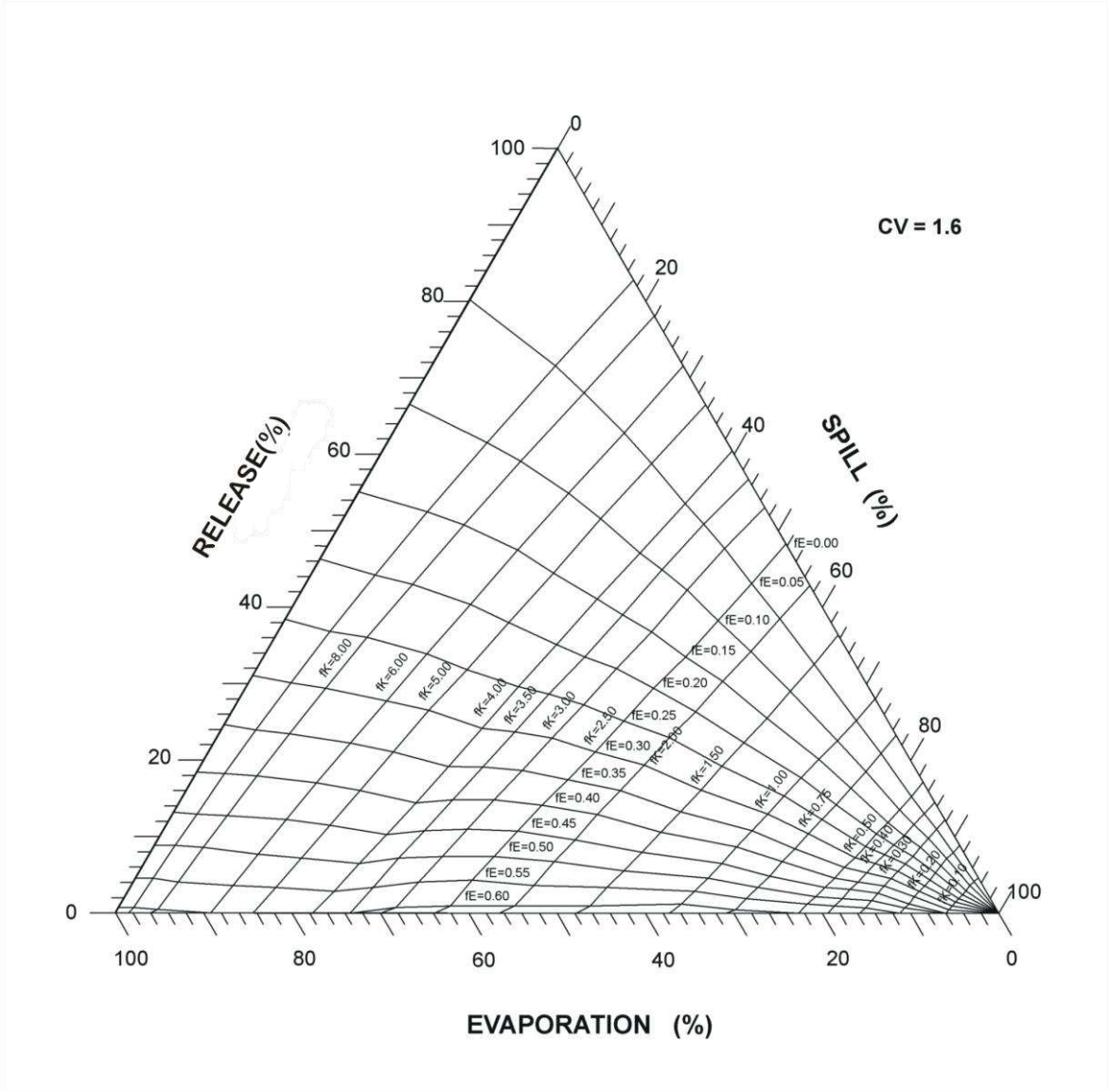

CV = 1.1
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fE=0.80
fE=0.85
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10

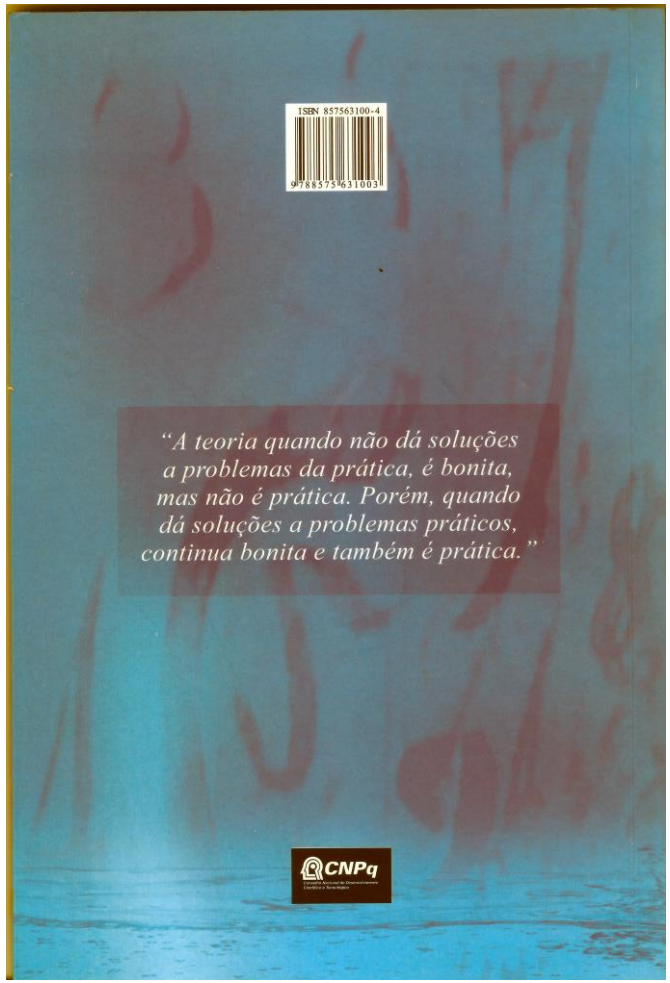

CV = 1.2
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fE=0.70
fE=0.75
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10


CV = 1.3
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
fK=8,00
fK=6,00
fK=5,00
fK=4,00
fK=3,50
fK=3,00
fK=2,50
fK=2,00
fK=1,50
fK=1,00
fK=0,75
fK=0,50
fK=0,40
fK=0,30
fK=0,20
fK=0,10
fE=0,00
fE=0,05
fE=0,10
fE=0,15
fE=0,20
fE=0,25
fE=0,30
fE=0,35
fE=0,40
fE=0,45
fE=0,50
fE=0,55
fE=0,60
fE=0,65
fE=0,70


CV = 1.4
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65
fK=8.00
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.25
fK=0.20
fK=0.15


CV = 1.5
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fK=8.00
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60
fE=0.65


CV = 1.6
RELEASE(%)
SPILL (%)
EVAPORATION (%)
0
20
40
60
80
100
fK=8.00
fK=6.00
fK=5.00
fK=4.00
fK=3.50
fK=3.00
fK=2.50
fK=2.00
fK=1.50
fK=1.00
fK=0.75
fK=0.50
fK=0.40
fK=0.30
fK=0.20
fK=0.10
fE=0.00
fE=0.05
fE=0.10
fE=0.15
fE=0.20
fE=0.25
fE=0.30
fE=0.35
fE=0.40
fE=0.45
fE=0.50
fE=0.55
fE=0.60


ISBN 857563100-4
9 788575 631003
"A teoria quando não dá soluções
a problemas da prática, é bonita,
mas não é prática. Porém, quando
dá soluções a problemas práticos,
continua bonita e também é prática."
CNPq