



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

FRANCISCO DELFÁBIO TEIXEIRA DE OLIVEIRA

**MODELAGEM HIDROLÓGICA COM VISTAS À OPERAÇÃO DE
RESERVATÓRIO DE MÚLTIPLOS USOS NO SEMIÁRIDO**

FORTALEZA

2021

FRANCISCO DELFÁBIO TEIXEIRA DE OLIVEIRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA COM VISTAS À OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO DE
MÚLTIPLOS USOS NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo autor

O47m Oliveira, Francisco Delfábio Teixeira de.

Modelagem hidrológica com vistas à operação de reservatório de múltiplos usos no semiárido /
Francisco Delfábio Teixeira de Oliveira. – 2021.

145 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2021.

Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.

1. Simulação. 2. Otimização. 3. Alocação. 4. Modelo hidrológico. I. Título.

CDD 630

FRANCISCO DELFÁBIO TEIXEIRA DE OLIVEIRA

MODELAGEM HIDROLÓGICA COM VISTAS À OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIO DE
MÚLTIPLOS USOS NO SEMIÁRIDO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 09/12/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Cicero Lima de Almeida
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Joana D'Arc Freire de Medeiros
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Ao meu SENHOR, de quem eu sou e a quem eu sirvo.

À minha esposa Jéssica, companheira maravilhosa, mãe dedicada, professora excelente.

Ao meu filho Estêvão, presente de Deus durante o mestrado e para toda a vida.

Aos meus pais, Casimiro e Delma, minha origem e meu exemplo.

Aos meus irmãos Delcácio e Daneskeule, exemplos vivos de sabedoria e força, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela primeira oportunidade, a vida, e por todas as outras disponibilizadas ao longo dela.

À minha amada família, pelos sacrifícios, pelas orações, pelo incentivo, pelo apoio em tudo o que foi necessário, e em todas as etapas da minha vida.

À minha amada esposa, pela compreensão, apoio e carinho durante todo este processo.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE), instituição por meio da qual obtive a formação, conheci minha esposa, alcancei minha profissão e que me deu a condição de realizar este mestrado.

À Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH), especialmente à Gerência Regional de Quixeramobim, pela disponibilidade de dados importantes a este trabalho e pelos anos de aprendizado e amizades valiosas ali vivenciados.

À Universidade Federal do Ceará, uma vontade antiga e uma realidade, hoje.

À Capes, pelo apoio ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola-PPGEA.

À secretaria do PPGEA, na pessoa da servidora Ivna Karla Magalhães, pelo valioso apoio e atenção de sempre.

Ao professor Raimundo Nonato, pela preciosa amizade, pela metodologia de ensino e pela abertura dos horizontes da pesquisa operacional, importante fator para o resultado deste trabalho.

Ao professor José Carlos de Araújo, tão importante em tantos itens desta jornada. Sou-lhe grato desde o ingresso no programa ao término deste trabalho, pela paixão pela hidrologia, pela orientação valiosa, pelas alegrias compartilhadas e pela amizade concedida.

Aos colegas adquiridos, que foram companhia remota, mas não distante, durante um período tão atípico de nossa trajetória: Bonifácio (Boni), Arianna, Danilo, Jamili, Rodrigo, Bruno e Tatiane, pessoas de grande capacidade e presteza.

Aos ex-alunos e, agora, colegas de turma no PPGEA, motivações para prosseguir motivando: José Brenno, Gabriela Domingos, Jeftha Amanda e Carine Praxedes.

A muitos outros, docentes e colegas, que sabem da minha gratidão, meu muito obrigado.

“Todos os cantores, saltando de júbilo,
entoarão: **Todas as minhas fontes são em ti**”
(Salmos 87:7)

RESUMO

A operação dos pequenos sistemas hídricos, na maioria dos estados do Nordeste, é realizada sem o conhecimento adequado da disponibilidade hídrica, já que poucos são os reservatórios monitorados. Faltam critérios para se operar, de forma eficiente, os pequenos sistemas para os quais não há dados suficientes. Visando à resolução dessa questão, o presente trabalho tem como objetivo propor um método de operação de reservatórios não-monitorados no semiárido. Para tal, o trabalho realizou (1) o desenvolvimento de um modelo hidrológico, de passo temporal mensal, para pequenas bacias não monitoradas; e (2) a proposição de um modelo de operação de pequenos reservatórios. Objetivando a desagregação de vazões anuais em mensais, desenvolveu-se o modelo hidrológico AguiarVM, tendo como áreas de aplicação as bacias hidrográficas dos açudes Cedro, Joaquim Távora e General Sampaio, no Ceará. O modelo apresentou maior representatividade do escoamento para a menor bacia hidrográfica (NSE = 0,72 para a bacia do açude Joaquim Távora), mas apresentou a característica de não-aderência aos picos de vazões mais elevados, sobretudo na maior bacia (NSE = 0,42 para a bacia do açude General Sampaio). O modelo de operação foi aplicado à bacia hidrográfica do açude Marengo, em Madalena-CE. Na etapa de diagnóstico, verificou-se que o reservatório vem sendo subutilizado, pois sua vazão com 90% de garantia (Q_{90}) é de $1,04 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, mas a retirada atual é da ordem de $0,02 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$. Os cenários de tendência de chuvas indicam que as chuvas históricas (1988 a 2021) em anos secos apresentaram lâminas 63% inferiores à média. Nos anos úmidos, as chuvas são 87% superiores à média. A operação do reservatório, atrelada à gestão participativa, mostrou ser possível a quebra do paradigma de mútua exclusividade entre a abordagem participativa e técnicas de otimização. Com exemplificações do potencial da otimização, para diversos objetivos, o modelo de operação proposto mostrou-se útil para contribuir com a gestão hídrica participativa dos milhares de pequenos sistemas hídricos do semiárido, sobretudo no que diz respeito ao incremento da eficiência da operação de cenários deliberados de forma participativa.

Palavras-chave: simulação; otimização; alocação; modelo hidrológico.

ABSTRACT

The operation of small water systems in most states in the Northeast of Brazil is carried out without adequate knowledge of water availability, since few reservoirs and rivers are monitored. Since its operation takes place under these conditions, there is a lack of criteria for operating the small systems efficiently. Aiming at solving this question, this research proposes a method of operation of small non-monitored reservoirs in the semiarid region. To this end, the work carried out (1) the development of a hydrological model, with a monthly time step, for small ungauged basins; and (2) the proposition of an operation model for small reservoirs. Aiming at disaggregating annual flows into monthly, the AguiarVM hydrological model was developed. The AguiarVM application areas were the basins of the Cedro, Joaquim Távora and General Sampaio reservoirs, in Ceará, Brazil. The model presented greater representativeness of the runoff for the smallest hydrographic basin (NSE = 0.72 in the Joaquim Távora basin), but presented the characteristic of non-adherence to the highest flow peaks, especially in the largest basin (NSE = 0.42 in the General Sampaio basin). The operation model was applied to the Marengo Reservoir, in Madalena-CE. In the diagnosis phase, it was found that the reservoir has been underutilized, as its flow with 90% annual reliability (Q_{90}) is $1.04 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$, but the current withdrawal is $0.02 \text{ hm}^3 \cdot \text{year}^{-1}$. The rainfall trend scenarios indicate that the historical rainfall (1988 to 2021) of dry years is 63% lower than the annual average, whereas in wet years, the rainfall surpasses the annual average by 87%. The operation of the reservoir, linked to participatory management, showed that it is possible to break the paradigm of mutual exclusivity between the participatory approach and optimization techniques. With examples of the optimization potential, for various purposes, the proposed operating model proved to be useful to contribute to the participatory water management of thousands of small water systems in the semi-arid region, especially with regard to increasing the efficiency of the operation of deliberate scenarios in a participatory way.

Keywords: simulation; optimization; allocation; hydrological model.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2.1	Colocação do problema	11
2.1	Questões científicas, hipóteses e objetivos	13
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas	14
2.1.1	<i>Aspectos gerais da gestão hídrica no semiárido</i>	14
2.1.2	<i>Alocação negociada de água</i>	16
2.1.3	<i>Gestão participativa e otimização de sistemas hídricos</i>	22
2.2	Modelagem hidrológica	25
2.2.1	<i>Componentes e definições em um modelo de bacia hidrográfica</i>	26
2.2.2	<i>Classificação dos modelos hidrológicos</i>	27
2.2.3	<i>Modelos Chuva-Vazão</i>	30
2.2.4	<i>Desagregação de vazões anuais em mensais</i>	37
2.2.5	<i>Balanço hídrico em reservatórios</i>	37
2.3	Disponibilidade hídrica	42
2.4	Otimização da operação de reservatórios	44
2.4.1	<i>Modelos e regras de operação de reservatórios</i>	44
2.4.2	<i>Modelos de simulação</i>	48
2.4.3	<i>Modelos de otimização</i>	50
2.4.4	<i>Aplicações de regras de operação</i>	58
3	METODOLOGIA	62
3.1	Área de validação do modelo hidrológico	62
3.2	O modelo hidrológico AguiarVM	63
3.3	Área de aplicação do modelo de operação	67
3.4	Descrição das etapas do modelo de operação proposto	70
3.4.1	<i>Etapa de diagnóstico</i>	71
3.4.2	<i>Tendência de chuvas e modelagem hidrológica</i>	77
3.4.3	<i>Estimativa da disponibilidade hídrica</i>	79
3.4.4	<i>Modelo de simulação do balanço hídrico</i>	79
3.4.5	<i>Cenários de alocação e cenários de operação</i>	81
3.4.6	<i>Deliberação participativa</i>	81

3.4.7	<i>Otimização da regra de operação.....</i>	82
3.4.8	<i>Operação do sistema hídrico.....</i>	84
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	85
4.1	Aplicação do modelo hidrológico AguiarVM.....	85
4.2	Aplicação do modelo de operação.....	95
4.2.1	<i>Etapa de diagnóstico.....</i>	95
4.2.2	<i>Cenários de tendência de chuvas.....</i>	96
4.2.3	<i>Modelagem hidrológica.....</i>	97
4.2.4	<i>Estimativa da disponibilidade hídrica.....</i>	105
4.2.5	<i>Montagem e simulação de cenários.....</i>	107
4.2.6	<i>Otimização da regra de operação.....</i>	112
4.2.7	<i>Aplicações diversas da otimização no contexto da alocação de água.....</i>	119
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	123
	REFERÊNCIAS	125
	APÊNDICE A – ROTINA DO PROGRAMA DE EXECUÇÃO DO MODELO AGUIARVM.....	138
	APÊNDICE B – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS ANUAIS DO MODELO AGUIARVM.....	142
	APÊNDICE C – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS MENSAIS DO MODELO AGUIARVM.....	143
	APÊNDICE D – EXEMPLO DE ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS ANUAIS DO MODELO AGUIARVM.....	144
	APÊNDICE E – EXEMPLO DE ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS MENSAIS DO MODELO AGUIARVM.....	145

1 INTRODUÇÃO

1.1 Colocação do problema

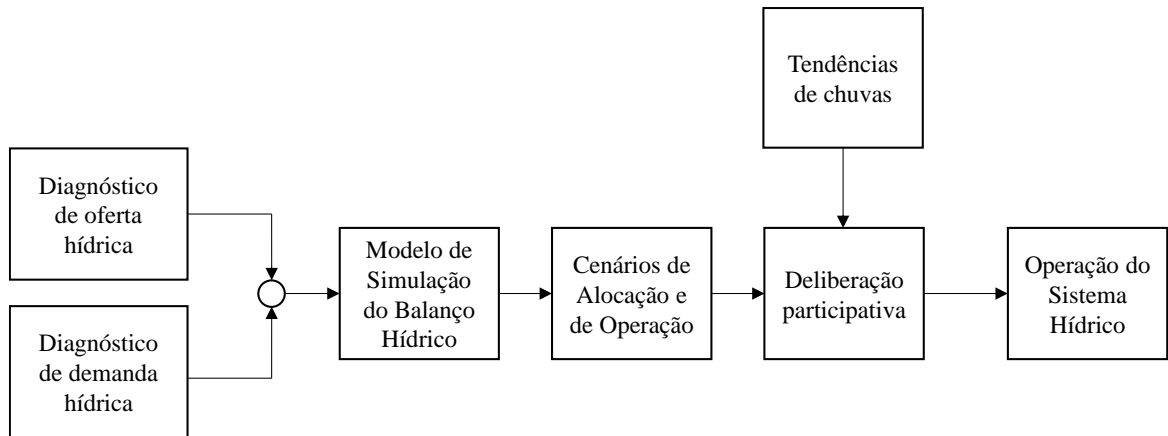
A seca é um fenômeno físico, natural, mas também de origem antrópica, que atinge com frequência e regularidade o Nordeste do Brasil. Esse fenômeno não é definido apenas pela escassez, insuficiência ou interrupção de precipitações, mas, também, pela irregularidade das chuvas no tempo e no espaço e/ou pelo excesso de demanda. Observações realizadas pela Superintendência de Desenvolvimento do Nordeste – SUDENE (BRASIL, 2013), permitiram concluir que, na região Nordeste do Brasil, esse fenômeno se repete de oito a dez vezes por século, que pode prolongar-se por múltiplos anos e que pode atingir toda a região ou parte dela. Dadas as observações, pode-se inferir que a seca, portanto, se trata de regra, e não de exceção (BRASIL, 2013; SILVA, 2010). Conforme a acertada observação do engenheiro Arrojado Lisboa, a chuva na região cai “irregularmente no correr dos anos, irregularmente no correr de uma mesma estação e irregularmente sobre a própria superfície” (BRASIL, 2013). Diante de tais características, a gestão de recursos hídricos na região semiárida se apresenta como uma tarefa desafiadora.

A gestão dos recursos hídricos no Estado do Ceará, sobretudo em sistemas hídricos monitorados, busca pautar sua prática nas premissas da integração, descentralização e participação (CEARÁ, 2010; BRASIL, 1997). Na busca pela materialização da gestão participativa no estado do Ceará, realiza-se, no âmbito dos Comitês de Bacias Hidrográficas – CBH, as reuniões de alocação negociada de água, em que se define o volume do manancial a ser ofertado para o atendimento aos múltiplos usos do sistema hídrico (Figura 1). Tal alocação se dá em um horizonte temporal semestral, notadamente no segundo semestre de cada ano, com envolvimento da população e dos órgãos de gestão de água através do Comitê de Bacias (AQUINO *et al.*, 2013).

No que tange à operação de reservatórios, a determinação das melhores alocações para diferentes usos é a principal tarefa a ser realizada. Essa alocação deve maximizar o benefício geral entre os diversos usos e reduzir o risco de falta de água no futuro próximo.

Uma vez que a operação dos pequenos sistemas hídricos é, na maioria das localidades inseridas na região semiárida, realizada sem a gerência dos órgãos gestores de recursos hídricos, esta pesquisa procura propor uma metodologia para a operação destes sistemas. A metodologia proposta é subsidiada, tecnicamente, pela modelagem hidrológica e complementada, facultativamente, pela otimização de regras de operação.

Figura 1 – Fluxograma simplificado do processo de alocação negociada de água no Ceará, realizado anualmente.



Fonte: Autor

A operação de forma participativa pode ser fortalecida por meio da otimização da regra de operação, em contraponto à liberação constante de determinada vazão alocada, como é realizado em sistemas hídricos isolados sob a gerência das agências de água destas regiões. Neste ponto, é importante destacar que o uso de modelos de otimização, sob o prisma da proposta ora apresentada, distancia a ciência da otimização como ferramenta de uma estratégia meramente tecnocrática. Pelo contrário, a otimização passa a se constituir como um elemento enriquecedor do processo participativo.

Para o desenvolvimento da abordagem proposta, a dissertação é dividida em cinco capítulos. O primeiro corresponde à introdução, na qual se dá a colocação do problema, as questões científicas, as hipóteses e objetivos, assim como o método geral. O Capítulo 2 corresponde ao referencial teórico, abordando a gestão de recursos hídricos no semiárido, a modelagem hidrológica, os estudos de disponibilidade hídrica e a otimização de operação de reservatórios.

A metodologia é objeto do Capítulo 3, em que são descritas, a área de aplicação do modelo hidrológico e sua concepção, a área de aplicação do modelo de operação proposto e suas etapas. No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos da aplicação do modelo hidrológico assim como da aplicação do modelo de operação, juntamente com as discussões acerca dos produtos obtidos na aplicação dos métodos. Por fim o Capítulo 5 apresenta as conclusões gerais da pesquisa e, ainda, as recomendações para futuras pesquisas.

1.2 Questões científicas, hipóteses e objetivos

Na formulação do problema de pesquisa abordado neste trabalho, as perguntas fundamentais são: como superar a problemática da escassez (ou ausência, em muitos casos) de dados hidrológicos em pequenos sistemas hídricos não-monitorados em região semiárida? Como as técnicas de otimização podem conferir ganho à gestão participativa de recursos hídricos em pequenos sistemas?

A primeira pergunta-chave tem como objeto de estudo as bacias hidrográficas dos açudes Cedro, General Sampaio e Joaquim Távora, localizados no estado do Ceará, que possuem dados de monitoramento hidrológico, como referência para a avaliação de um modelo hidrológico. A segunda pergunta-chave tem como objeto de análise o açude Marengo, reservatório com capacidade de 15,8 hm³, localizado no município de Madalena, Ceará. O reservatório se configura como açude de sistema hídrico isolado, não pertencente à rede de monitoramento do sistema de recursos hídricos do Estado.

As hipóteses expostas na pesquisa ora desenvolvida são: 1) um modelo hidrológico de simples utilização e com passo temporal mensal pode se constituir em uma ferramenta prática e eficiente para a estimativa de dados hidrológicos em pequenos sistemas hídricos, uma vez que a simplicidade pode favorecer o seu uso e seus resultados podem fornecer subsídio válido à gestão de tais sistemas. Para isso, o modelo hidrológico deve apresentar apenas um parâmetro calibrável e apenas a lâmina precipitada como variável de entrada. Ademais, espera-se que o passo de tempo mensal do modelo seja o mais adequado à dinâmica temporal do processo de alocação de águas; 2) as técnicas de otimização podem conferir ganho à gestão participativa de recursos hídricos quando utilizadas após a deliberação participativa de cenários de alocação.

Dado o exposto, o objetivo geral deste trabalho é propor um método de operação de reservatórios não-monitorados no semiárido. São objetivos específicos:

1. Desenvolver um modelo hidrológico chuva - vazão que demande poucos parâmetros e que tenha passo temporal mensal para auxiliar no processo de operação dos reservatórios; e
2. Desenhar modelo de operação de reservatórios, incorporando tendências de chuvas e otimização da regra de operação de cenários de alocação deliberados de modo participativo.

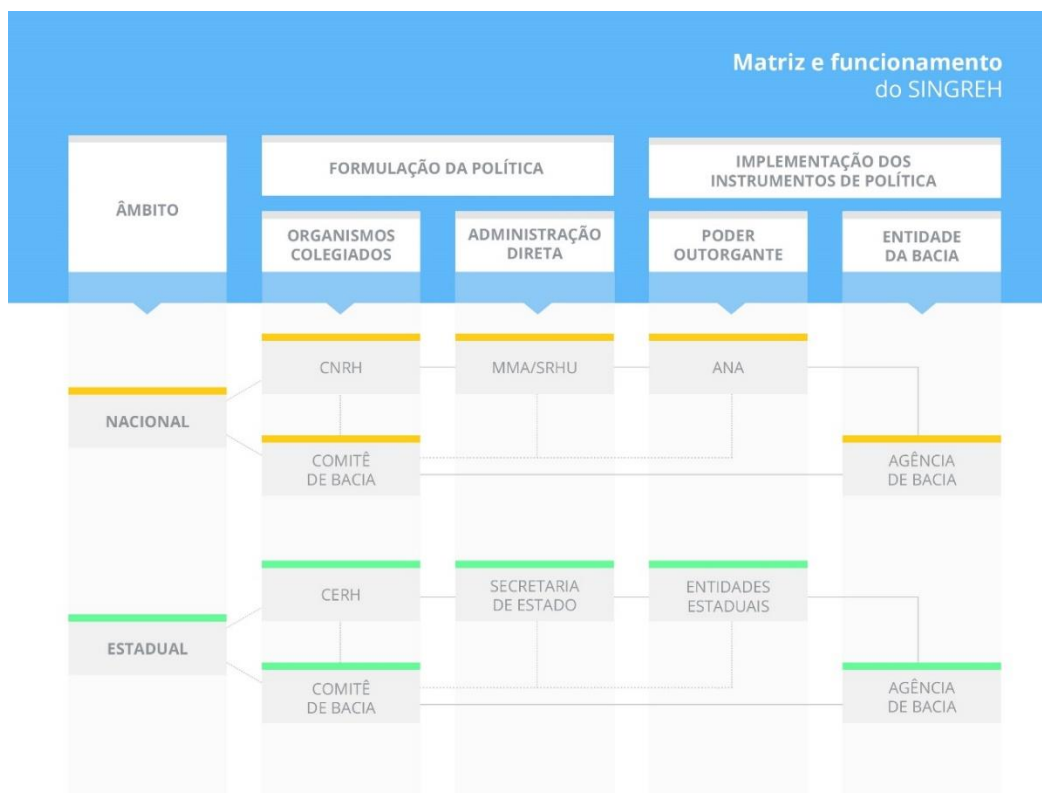
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Gestão de recursos hídricos em regiões semiáridas

2.1.1 Aspectos gerais da gestão hídrica no semiárido

Para alcançar a sustentabilidade social e econômica, é vital promover o uso eficiente da água por meio da gestão dos recursos hídricos (REDDY; KUMAR, 2007). No Brasil, e mais especificamente nas últimas décadas, a demanda crescente de água diante do crescimento urbano, industrial e agrícola, os potenciais conflitos gerados pelo binômio disponibilidade-demanda e o preocupante avanço da degradação ambiental dos rios e lagos, levou o país a percorrer o caminho para uma gestão integrada, descentralizada e participativa, citada na constituição de 1988 e materializada pela Lei 9.433/97. Em 2000, consolidou-se a ampla reforma institucional do setor de recursos hídricos (BRASIL, 2002), cuja matriz é composta por instituições executoras e colegiadas nas escalas federal, estadual e em nível de bacia hidrográfica (Figura 2) (BRASIL, 2020a).

Figura 2 – Organograma do Sistema de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH) no Brasil



Fonte: Brasil (2020a)¹

¹ CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos; CERH – Conselho Estadual de Recursos Hídricos; MMA – Ministério do Meio Ambiente; SRHU – Secretaria de Recursos Hídricos da União; ANA – Agência Nacional de Água

Mesmo com avanços significativos, desde a concepção de um reconhecido arcabouço legal e o desenvolvimento de um robusto arranjo institucional, na efetivação dessa gestão integrada, foram priorizados os grandes sistemas hídricos, mesmo no semiárido brasileiro. Nesse sentido, refletindo sobre os aspectos positivos e negativos da gestão ora tratada, Souza Filho (2011, p. 3) pondera:

Os avanços da reforma da água [...] já têm dado frutos ao semiárido na elaboração das Leis Estaduais de Recursos Hídricos, na definição de um interlocutor institucional para a questão da água, na alocação negociada de água, na construção de fóruns participativos de discussão e decisão sobre recursos hídricos, entre outros progressos. No entanto, as vitórias e dificuldades deste processo devem ser avaliadas com serenidade, sem o ufanismo que só identifica os acertos e não possibilita a evolução do sistema, fragilizando-o, ou a crítica pela crítica que, ao não identificar os avanços, conspira com as forças que antagonizam a reforma contribuindo, desta forma, para cessá-la. Uma visão integral deste processo é necessária e deve ser construída, de forma a possibilitar a consolidação das boas mudanças e a retificação dos equívocos do caminho.

No que tange às dimensões mais relevantes no desafio da gestão dos recursos hídricos do semiárido brasileiro, Souza Filho (2011) elenca: o acesso à água das populações rurais difusas; o uso eficiente da água, enquanto insumo ao processo produtivo; o sistema de tomada de decisão no qual devem ser incluídos os atores sociais; a administração de conflitos e; a garantia da operação da infraestrutura implantada como única forma de produção dos potenciais benefícios a ela associados.

Ainda no âmbito da região semiárida, mas aprofundando a discussão sobre a condição de pequenos sistemas hídricos, Araújo (2011, p. 308) expõe que

Há [...] dezenas de milhares de pequenos sistemas ainda não integrados ao novo paradigma, pois não foram contabilizados nos planos de bacias; suas águas não foram enquadradas nem outorgadas; não há informações disponíveis sobre seus sistemas nem seus usuários têm representação nos comitês de bacias.

Na mesma linha de raciocínio, Alexandre (2012, p. 18) afirma que

A operação desses pequenos sistemas hídricos, na maioria dos estados do Nordeste, é realizada sem que os órgãos gestores tenham conhecimento e segurança da real disponibilidade hídrica e da qualidade das águas dos mananciais, já que poucos são monitorados. Faltam, portanto, critérios para gerir de forma otimizada esses pequenos sistemas.

Moreira (2001) pondera que ainda existem, no semiárido do Nordeste brasileiro, muitas localidades com escassez de água, que não dispõem de um sistema ordenado de racionamento. Ainda de acordo com o autor, a dificuldade para reservar água para usos prioritários, inclusive para o consumo humano, é elevada.

No Ceará, o gerenciamento de recursos hídricos procura atenuar o impacto dos eventos de seca à sociedade, eventos estes que, historicamente, restringem o desenvolvimento

socioeconômico do estado, além de gerar conflitos pelo uso da água. O Estado adotou, entre outras estratégias para solucionar o problema da escassez, a construção e operação de uma infraestrutura hídrica que pudesse transportar água ao longo do tempo (regularização de vazões). Essa estratégia inicial é materializada pela construção e operação de reservatórios, a fim de se contornar a problemática da alta variabilidade do regime hidrológico da região (SILVA; SOUZA FILHO, 2013). Ainda no contexto da busca pela atenuação dos impactos dos eventos de seca, avanços que ainda urgem ocorrer no estado, são a implementação de uma gestão de demanda hídrica, o enquadramento de corpos d'água, dentre outros previstos na legislação federal e estadual (BRASIL, 2005; BRASIL, 1997; CEARÁ, 2010).

2.1.2 Alocação negociada de água

A alocação de água é um processo de gestão empregado para disciplinar os usos múltiplos em sistemas que apresentem alguma situação emergencial ou que sofram com estiagens intensas, assim como em regiões que apresentam conflitos pelo uso da água. Esta ferramenta se constitui como a concretização da operação participativa dos reservatórios (BRASIL, 2020b; CEARÁ, 2020). Em outros termos, a alocação de água é um processo de divisão de um bem (a água) entre indivíduos com interesses frequentemente conflitantes (os usuários de água) (ARAÚJO, 2012). Para Roa-García (2014), a alocação de água refere-se às regras e procedimentos pelos quais é decidido como se dará acesso à água, em relação à sua disponibilidade.

Segundo Aquino (2012), no Ceará, dois tipos de alocação são adotados, a saber, a de longo prazo – por meio da outorga de direito de uso de água – e a alocação de curto prazo – a alocação negociada de água. Esta última, no estado do Ceará, foi realizada pela primeira vez no ano de 1994, quando se realizou a alocação das águas do Rio Curu (GARJULLI, 2001). Segundo Silva e Souza Filho (2013), duas partes são as que compõem o processo de alocação negociada, descritas a seguir:

- a) Definição dos parâmetros de alocação, quando se determinam os intervalos de vazões liberadas a serem simulados em um modelo de simulação de balanço hídrico. Como, normalmente, as simulações são realizadas para o período do segundo semestre, em que os aportes hídricos aos reservatórios são praticamente nulos, costuma-se referir-se à realização da modelagem do balanço hídrico como “simulação de esvaziamento”;

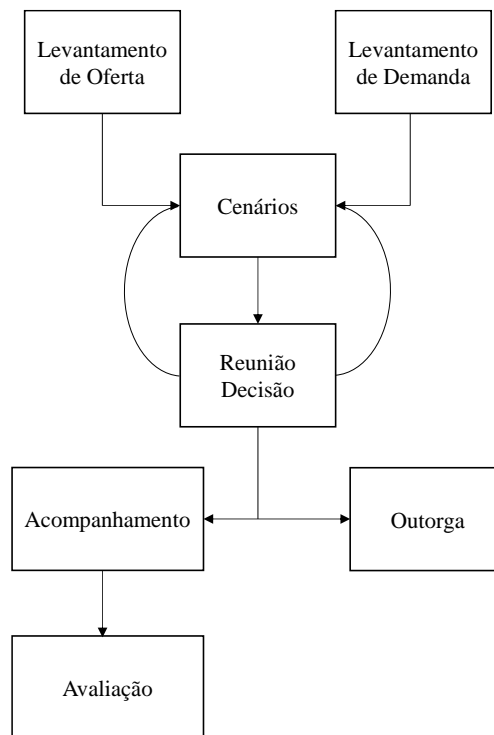
- b) A reunião de alocação, quando, diante de cenários resultantes das simulações de balanço hídrico, se delibera de forma coletiva, a vazão a ser operada no período da alocação. Em sistemas hídricos integrados (que possuem mais de um reservatório), que correspondem aos vales perenizados, ocorrem os seminários de planejamento.

No contexto da alocação negociada de água, devido ao próprio regime hidrológico da região, o ano é dividido em dois períodos: o período chuvoso (de janeiro a junho) e período seco (que se estende de julho a dezembro) (SILVA; SOUZA FILHO, 2013). Como bem descrevem os autores, “no mês de junho os estoques de água dos reservatórios já estão definidos e a alocação é realizada para o período seguinte, considerando aporte zero aos reservatórios”.

Araújo (2012) detalha o procedimento da alocação negociada no Estado do Ceará e ilustra por meio do fluxograma mostrado na Figura 3. Segundo o autor, no Ceará, a etapa de levantamento de oferta é realizada pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e corresponde ao levantamento da reserva hídrica que poderá ser disponibilizada para o atendimento de todos os interessados. O eixo de monitoramento quantitativo da Companhia, atualiza, diariamente o estado da reserva hídrica dos sistemas monitorados. O nível diário dos reservatórios monitorados pode ser visto no sítio eletrônico da COGERH. Em reservatórios estratégicos cujos dados de projeto demandem revisão ou atualização, devido ao tempo decorrido desde a sua concepção, são realizados levantamentos batimétricos a fim de se obter dados atuais, principalmente no que tange às relações morfométricas (relação cota-área-volume) de cada corpo hídrico.

O levantamento da demanda se refere à demanda atual a ser atendida no período em tela. Os números da demanda são conseguidos através de cadastro de usuários e realização de visitas locais, também de responsabilidade da COGERH. Na realização deste trabalho, desde o entorno do reservatório até o fim do leito perenizado pelo mesmo, técnicos da Companhia realizam o cômputo da necessidade hídrica dos mais diversos usos: abastecimento humano (junto às concessionárias de abastecimento de água e associações comunitárias), dessedentação animal (pela quantificação e tipologia dos animais), irrigação (pela medição da área e tipologia da cultura), carcinicultura, entre outros.

Figura 3 – Fluxograma do processo de decisão de alocação negociada no Ceará



Fonte: Araújo (2012)

A etapa da montagem dos cenários tem como pressuposto a realização das etapas anteriores. Os técnicos da COGERH, por meio de modelos de simulação do balanço hídrico específico para cada reservatório, simulam as projeções de como ficará o nível dos reservatórios após o atendimento de determinadas demandas, em um determinado tempo.

No caso de sistemas isolados, estes cenários de vazão, dentro da definição dos parâmetros de alocação, são apresentados ao Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH) para aprovação e posterior definição da vazão final por parte da comissão gestora do açude na reunião de alocação (SILVA; SOUZA FILHO, 2013). A reunião, portanto, é o momento em que se encontram todos os atores sociais do processo: usuários de água, membros dos Comitês de Bacia, câmaras técnicas, sociedade civil, entre outros. Araújo (2012, p. 60) afirma, em termos gerais, que:

Neste encontro são tomadas as decisões sobre alocação de água no estado. Cenários são apresentados e vazões de água são colocadas em votação para a chegada de um valor de água liberada que possa ser pactuada por todos com responsabilidade e sem desperdício.

No que diz respeito aos cenários apresentados na reunião de alocação, estes são apresentados em duas formas complementares: os cenários de alocação e os cenários de

operação. Os cenários de alocação descrevem a partição do recurso hídrico entre os usos múltiplos do sistema hídrico, enquanto os cenários de operação expõem os impactos volumétricos ao reservatório, devidos à operação de cada cenário. Os Quadros 1a e 1b mostram, ilustrativamente, a forma de apresentação destes cenários.

Quadro 1 – Exemplificação hipotética de (a) cenários de alocação e (b) cenários de operação apresentados em reuniões de alocação negociada de água no Ceará.

(a)

Cenários	Montante			Jusante				Vazão Total (L/s)
	Ab. Humano	Des. Animal	Irrigação	Ab. Humano	Des. Animal	Irrigação	Indústria	
Cenário 01	10	1	200	110	5	2000	15	2341
Cenário 02	10	1	150	110	5	1500	13	1789
Cenário 03	10	1	100	110	5	1000	11	1237
Cenário 04	10	1	50	110	5	500	9	685

(b)

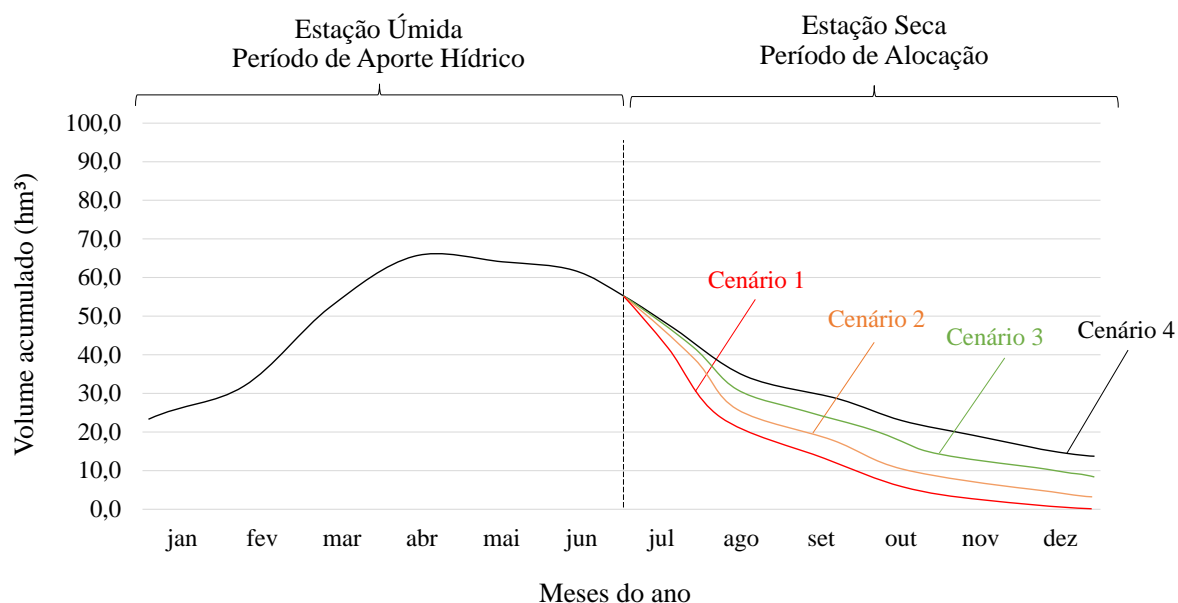
Cenários	Vazão alocada (L/s)	Volume inicial (hm ³)	Volume inicial (%)	Volume final (hm ³)	Volume final (%)	Δ Volume (hm ³)	Δ Volume (%)
Cenário 01	2341	75,00	40,00	20,95	11,00	-54,05	-29
Cenário 02	1789	75,00	40,00	28,48	15,00	-46,52	-25
Cenário 03	1237	75,00	40,00	36,04	19,00	-38,96	-21
Cenário 04	685	75,00	40,00	43,63	23,00	-31,37	-17

Fonte: Autor

O gráfico da Figura 4 ilustra a comparação dos reflexos (em termos de evolução volumétrica) da escolha de cenários distintos propostos em um sistema hídrico isolado fictício. Esta última apresentação de cenários de operação, contudo, é menos usual em reuniões de alocação negociada de água.

Os acordos sobre as vazões aprovadas são, então, acompanhados por comissões de operações (comissões compostas pela COGERH e pelos membros dos Comitês de Bacia) com a atribuição de monitorar e avaliar a liberação da vazão acordada. Passa-se, portanto, à fase de monitoramento. Existem casos em que as vazões acordadas podem se mostrar insuficientes para o atendimento da demanda. Essas entidades podem, então, se comunicar e estabelecer um acordo com uma nova vazão de suprimento, respeitadas as restrições observadas na definição dos parâmetros de alocação, como também, desde que se considere a priorização estabelecida em lei (SILVA; SOUZA FILHO, 2013; ARAÚJO, 2012).

Figura 4 – Gráfico ilustrativo da comparação de cenários propostos para discussão no âmbito dos Comitês de Bacias

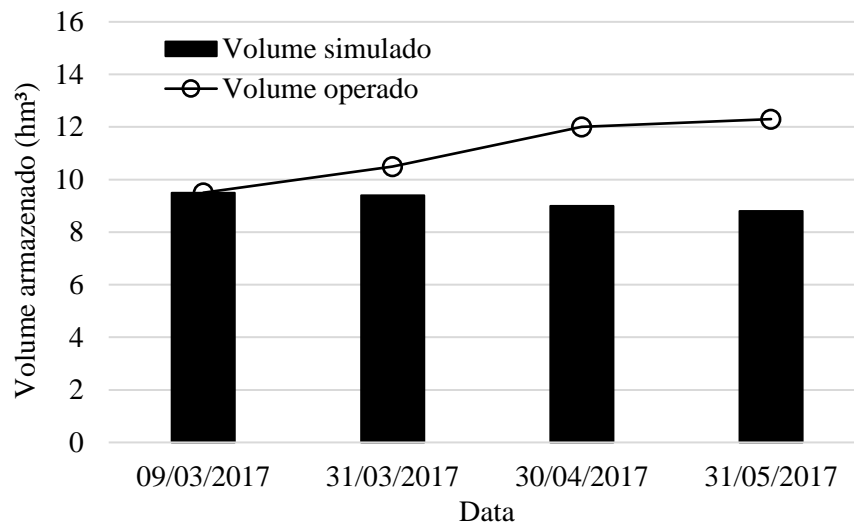


Fonte: Autor

Uma vez deliberada uma vazão de liberação, o impacto da operação desta vazão pode ser percebido em forma de volume acumulado no reservatório, para cada mês de operação do cenário escolhido. Antes do início da operação, contudo, simulações de balanço hídrico são realizadas a fim de se comparar os volumes esperados (simulados) com os volumes reais observados (operados). A Figura 5 mostra o acompanhamento da operação do açude Arrojado Lisboa (Banabuiú) entre os meses de março e maio de 2017, um dos anos em que, de forma excepcional, se realizou alocação negociada de água no primeiro semestre em virtude da elevada escassez hídrica. As barras representam o volume simulado para cada data pré-definida e a curva representa o volume real, resultante da operação, então, realizada (volume operado).

A etapa de avaliação pode ser considerada como o acompanhamento final da operação e monitoramento do sistema hídrico. A avaliação, portanto, realiza o papel de prestação de contas entre o que foi simulado (acordado) e o que foi realizado no período da alocação. A Figura 6 mostra, apenas ilustrativamente, o processo ora descrito, trazendo a relação entre o comportamento típico dos reservatórios da região semiárida cearense com os marcos temporais de realização das etapas anteriormente expostas.

Figura 5 – Gráfico comparativo entre os volumes simulados¹ versus volumes operados² no Açude Banabuiú no ano de 2017.

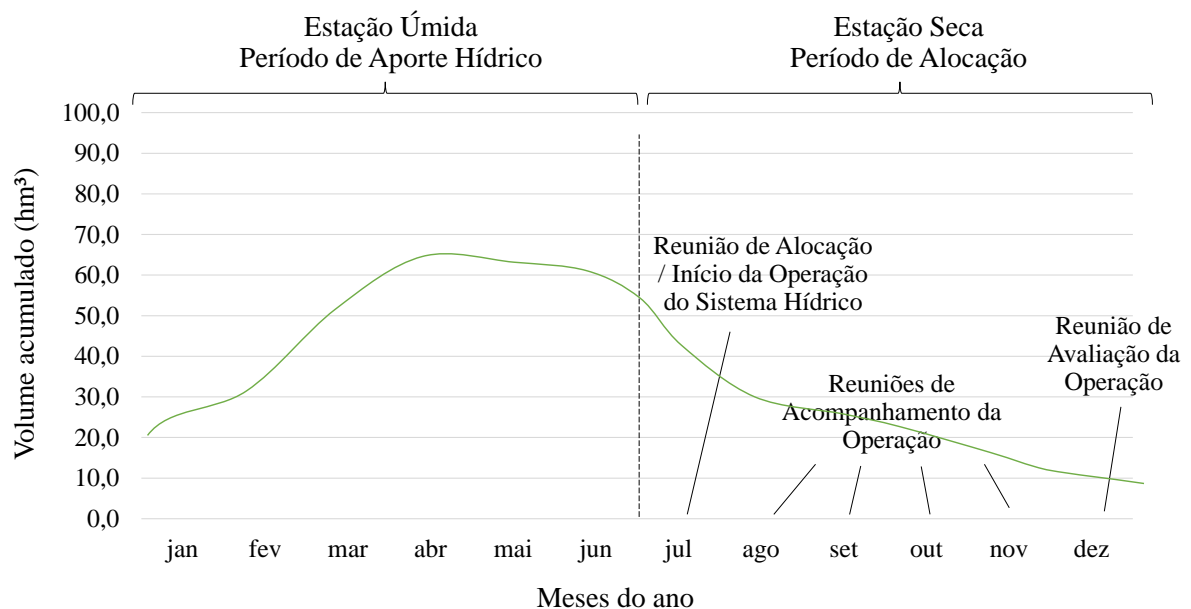


¹Volume simulado: volume calculado na simulação do balanço hídrico do reservatório.

²Volume operado: volume armazenado no reservatório decorrente da operação do cenário escolhido.

Fonte: Autor, a partir de dados cedidos pela COGERH - Gerência Regional da Sub-Bacia do Banabuiú

Figura 6 – Períodos relativos ao processo de alocação sobre os valores de volume acumulado em um reservatório de múltiplos usos: imagem de cunho ilustrativo.



Fonte: Autor

2.1.3 Gestão participativa e otimização de sistemas hídricos

A gestão participativa, materializada pela negociação social tem sido o modelo adotado no Brasil, sobretudo, desde a década de 1990 (SETTI *et al.*, 2001). Desde então, diversos estudiosos vêm se debruçando sobre os aspectos que envolvem tal modelo, propondo melhorias, estudando formas de sua aplicação em sistemas hídricos não pertencentes às redes de monitoramento das agências de água e em sistemas de pequenos reservatórios (SILVA; SOUZA FILHO, 2013; SOUZA FILHO; COSTA; BECCO, 2013; ALEXANDRE, 2012).

No âmbito do modelo de gestão participativa, Ricart *et al.* (2018), selecionando diversos estudos de caso, observaram que o envolvimento dos atores sociais de sistemas de irrigação molda os territórios hidrossociais de diversas formas: reduzindo a tensão entre os usuários de água, redirecionando o planejamento regional e a estratégia, destacando as crises hídricas, descentralizando as responsabilidades hídricas, e integrando valores e crenças de diferentes agentes sociais. Para Wehn *et al.* (2017), sobre a busca pela participação ativa das pessoas, uma consideração chave é o propósito do seu engajamento, exigindo consideração de sua ética, processo, funções e resultados esperados.

Sally, Léville e Cour (2011), estudando a implementação da Gestão Integrada de Recursos Hídricos em Burkina Faso, país localizado na África ocidental, identificaram que os comitês locais de gestão da água estabelecidos no país não têm conseguido, de forma satisfatória, abordar questões relativas ao acesso e alocação de água, que são cruciais para o funcionamento satisfatório dos reservatórios. Segundo suas observações, os recursos hídricos nos reservatórios tendem a ser controlados pelo usuário dominante. Para os autores, a fim de corrigir esta tendência, sugere-se a tomada de medidas para construir confiança mútua entre usuários de água, sendo a principal delas a necessidade de coletar e compartilhar dados confiáveis. Do aspecto positivo, identificou-se que entre os 30 comitês locais de gestão de água estabelecidos naquele país, aqueles que têm sido configurados como entidades focadas na gestão de reservatórios têm conseguido gerenciar de forma mais otimizada o seu recurso hídrico.

Antunes *et al.* (2011) ao realizarem uma análise participativa de alternativas de gestão da irrigação do distrito de irrigação de Caia, Portugal, verificaram que diferentes grupos de atores sociais adotaram alternativas preferidas. Ao realizarem um processo de análise multicritério participativa (MCA), composta por entrevistas e workshops, os autores observaram que os participantes reconheceram que ganharam uma melhor compreensão do problema e dos pontos de vista uns dos outros. Os autores concluíram que “o uso de diferentes

técnicas participativas é essencial para permitir a participação contínua e garantir que diferentes pontos de vista sejam levados em consideração no processo de avaliação”.

No que se refere à abordagem da otimização da operação de sistemas hídricos, Reddy e Kumar (2007), buscando realizar a operação ideal do reservatório de Malaprabha, na Bacia de Krishna, Índia, para irrigação de múltiplas culturas, utilizaram um algoritmo de otimização de enxame de partículas (EMPSO). Considerando a competição periódica por água entre várias culturas, a dinâmica da umidade do solo em cada área cultivada e a resposta da cultura ao nível de irrigação em cada estágio de seu crescimento; e considerando ainda, a disponibilidade de água no reservatório, o modelo foi capaz de definir as liberações (por períodos de dez dias) para atender às demandas de irrigação existentes ao longo de um ano.

Combinando modelos de otimização e simulação, utilizando os softwares LINGO e HEC-ResSim, respectivamente, Ziaei, Shui e Goodarzi (2012) determinaram a regras operacionais mensais para o sistema do reservatório Zayandeh Rud, no Irã. Em seus resultados, para um período de simulação de 47 anos, os autores concluíram que otimizar a operação do reservatório poderia aumentar seu armazenamento em 88,9% e aumentar a garantia de água regularizada para todas as demandas a jusante em mais de 10%.

A Global Water Partnership (GWP), estabelecida em 1996, define a Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) como

um processo que promove o desenvolvimento coordenado e gestão de água, terra e recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar econômico e social de uma forma equitativa, sem comprometer a sustentabilidade dos ecossistemas vitais (SALLY; LÉVITE; COUR, 2011).

Molle (2008) afirma que esta definição enfatiza três elementos desejados: eficiência, equidade e sustentabilidade ambiental. Para o autor, a própria definição implica que esses elementos podem ser alcançados concomitantemente e que a palavra “maximizar” sugere que a resolução de problemas pode ser alcançada por abordagens neutras e racionais, boa ciência e conhecimento especializado. Nesse ponto, é pertinente uma reflexão sobre a dissociação existente entre gestão participativa e metodologias de otimização de recursos hídricos.

De forma geral, quando se observa a aplicação (ou a busca pela aplicação) de um modelo de gestão participativa, metodologias de otimização não são incorporadas ao processo. Por outro lado, ao se verificar aplicações das metodologias de otimização da operação de sistemas hídricos, via de regra, estas não se prestam a uma gestão participativa (*e.g.* pesquisas realizadas por Tinoco *et al.* (2016), Men *et al.* (2019), Feng *et al.* (2020), Liu *et al.* (2020), Yang *et al.* (2021) e Wang *et al.* (2021)). Com efeito, as duas naturezas de abordagem se constituem, na prática atual,

como metodologias mutuamente exclusivas, em contraponto à própria definição de GIRH interpretada acertadamente por Molle (2008).

No estudo de caso do reservatório Jayakwadi, na Índia, buscou-se simultaneamente otimizar o atendimento à irrigação e à geração hidrelétrica, entretanto, não se observou a gestão participativa (IKHAR; REGULWAR; KAMODKAR, 2017). Embora uma abordagem como a do reservatório Jayakwadi, apresente potencial para a gestão participativa, uma vez que concebe conjuntos de soluções passíveis de discussão multilateral, e não apenas uma só diretriz de operação, a otimização de regras de operação geralmente tem sido utilizada num âmbito, politicamente, menos abrangente, onde poucos ou apenas um tomador de decisão possui a prerrogativa de decidir.

Nesse sentido, é de grande relevância refletir o que diz Barraqué (2008):

[...] um modelo hidrológico perfeito de uma bacia hidrográfica não pode ser aplicado à gestão da água até que os atores sociais sejam capazes de compartilhar uma visão comum do rio como uma questão política. [...] Uma vez que o envolvimento dos atores sociais é aceito como uma necessidade para a gestão eficiente da água, os cientistas também têm que aceitar que a modelagem pura tradicional do sistema natural estava inconscientemente fornecendo ferramentas para o planejamento de cima para baixo, sem a participação do público.

O trabalho desenvolvido por Cheong, Ko e Labadie (2009), na otimização da operação integrada entre dois reservatórios da Coreia (Daechung e Yongdam) indicou a utilização da metodologia, não como um fim em si mesmo, mas como parte integrante de um Sistema de Suporte à Decisão (SSD) para a gestão integrada dos dois reservatórios. Segundo os autores (CHEONG; KO; LABADIE, 2009, p. 186),

modelos de gestão da água e sistemas de suporte à decisão podem desempenhar um papel crucial na simulação, análise e adaptação das estratégias de gestão da água. [...] Os SSD de gestão de bacias hidrográficas são projetados para ajudar os tomadores de decisão ou atores sociais no desenvolvimento de uma visão compartilhada de objetivos de planejamento e gestão.

Ainda que a prática da gestão participativa no referido país não possua exatamente os mesmos moldes praticados nos sistemas hídricos monitorados no semiárido brasileiro, abordagens como essa fornecem, claramente, uma diretriz para a incorporação de uma metodologia tão promissora como a otimização, no contexto da gestão participativa. Pode-se observar que a otimização na posição de ferramenta de suporte à decisão é um caminho para um incremento qualitativo na gestão participativa. Tal abordagem corrobora com o pensamento de Barraqué (2008) quando afirma que “tanto os sociólogos da inovação quanto os cientistas políticos propõem-se a misturar a construção do conhecimento com os processos democráticos de tomada de decisão”.

Para Souza Filho (2021), a tomada de decisão é baseada em dados, isto é, não é uma decisão exclusivamente política, mas conta com as informações necessárias para subsidiar as discussões. Ainda segundo o autor,

as decisões, na realidade, possuem duas dimensões fundamentais. Em primeiro lugar, são decisões muito complexas para serem solucionadas apenas com o senso comum, elas precisam de ciência. Sem ciência não é possível se tomar decisões robustas e sustentáveis do ponto de vista social, econômico, político. Portanto, é preciso uma base técnica e científica para se tomar decisão. Em segundo lugar, não é a tecnocracia que deve tomar a decisão. Não é quem produz a informação que deve, sozinho, tomar a decisão, pois essa prática se constituiria em outro equívoco. Quem tem informações sobre os impactos dessa decisão, quem é afetado por essa decisão é que conhece bem esses impactos. Portanto, quem é afetado por essa decisão é quem deve decidir, dentre os cenários viáveis do ponto de vista técnico, qual deve ser a melhor alternativa a ser implementada. Portanto as duas dimensões do processo decisório são (1) a base técnico-científica, que informa, e (2) o processo político, que, baseado na observação das informações técnicas, seleciona a melhor alternativa.

2.2 Modelagem hidrológica

Modelos são a representação de um sistema real, a representação simplificada de um sistema complexo, descrevendo os componentes básicos e mais importantes desse sistema complexo (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1994). Os modelos hidrológicos, mais especificamente, são aqueles que buscam representar os processos naturais que ocorrem no ciclo hidrológico sobre uma bacia hidrográfica (PEREIRA, 2017; SOUZA FILHO, 2020). Chow, Maidment e Mays (1994) afirmam, ainda, que todos os modelos são aproximações da realidade, logo a saída de um sistema real nunca pode ser prognosticada com certeza. Para Campos (2009, p. 15), entre o sistema real e a representação do modelo, deve-se incluir ainda outro elemento. Segundo o autor,

No estudo de modelos de sistemas naturais, como as bacias hidrográficas, o modelista trabalha com três mundos: o mundo real, da maneira como é; o mundo cognoscível, da maneira como ele, modelista, percebe; e o mundo virtual, da maneira como os modelos mostram. Juntar essas três coisas, quer seja em pesquisas, quer seja em trabalhos profissionais requer bem mais que conhecimentos matemáticos, requer conhecimentos científicos e também conhecimentos filosóficos.

Os modelos hidrológicos nasceram como resposta à necessidade de se avaliar alterações dos processos hidrológicos decorrentes das mudanças no uso e ocupação do solo em uma bacia hidrográfica (ALEXANDRE; SOUZA FILHO; CAMPOS, 2013). É através das informações obtidas desses modelos que se busca o entendimento dos processos naturais e se tenta avaliar a resposta do sistema a diferentes cenários. Este entendimento e avaliação se constituem como subsídios às tomadas de decisão (BARROS; MARTINS; SOUZA FILHO, 2013).

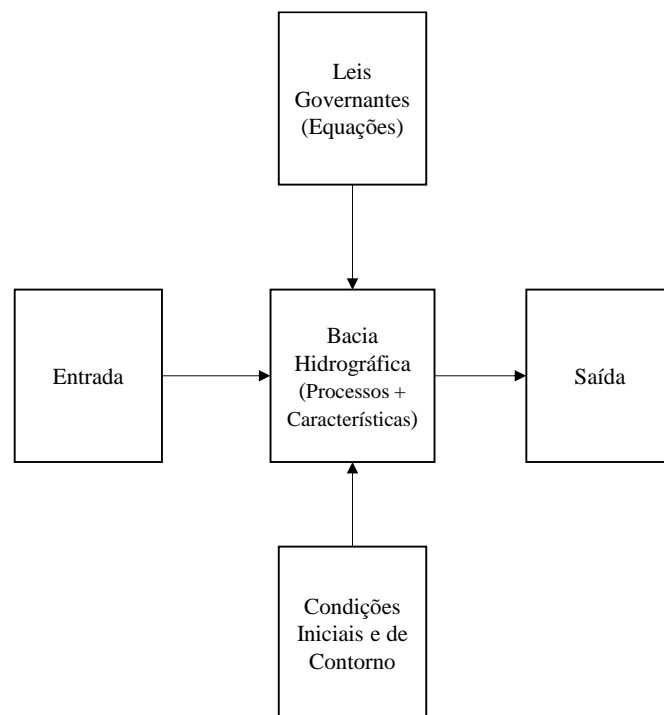
A utilização da modelagem hidrológica (1) auxilia a compreensão do comportamento dos sistemas hídricos; (2) pode ajudar a prever resultados de alterações introduzidas nos

sistemas; (3) auxilia a tomada de decisões sobre intervenções na bacia hidrográfica; e (4) pode ser utilizada para gerar informações adicionais ou complementares. Por este motivo, fundamental para a gestão integrada da água é a modelagem de bacias hidrográficas. Mesmo assim, esses modelos ainda não se tornaram ferramentas comuns de planejamento ou tomada de decisão (SOUZA FILHO, 2020; SINGH, 1995).

2.2.1 Componentes e definições em um modelo de bacia hidrográfica

Para Singh (1995) um modelo hidrológico possui cinco componentes e que, dependendo do tipo de modelo, esses componentes são combinados de várias maneiras. Os componentes apontados pelo autor são: (1) geometria do sistema (bacia hidrográfica), (2) entrada, (3) leis governantes, (4) condições iniciais e de contorno e (5) saída. Na mesma linha, Chow, Maidment e Mays (1994) afirmam que as entradas e saídas de um modelo hidrológico são variáveis hidrológicas e sua estrutura é um conjunto de equações que conectam as entradas e as saídas. A Figura 7 ilustra como se relacionam os componentes de um modelo hidrológico.

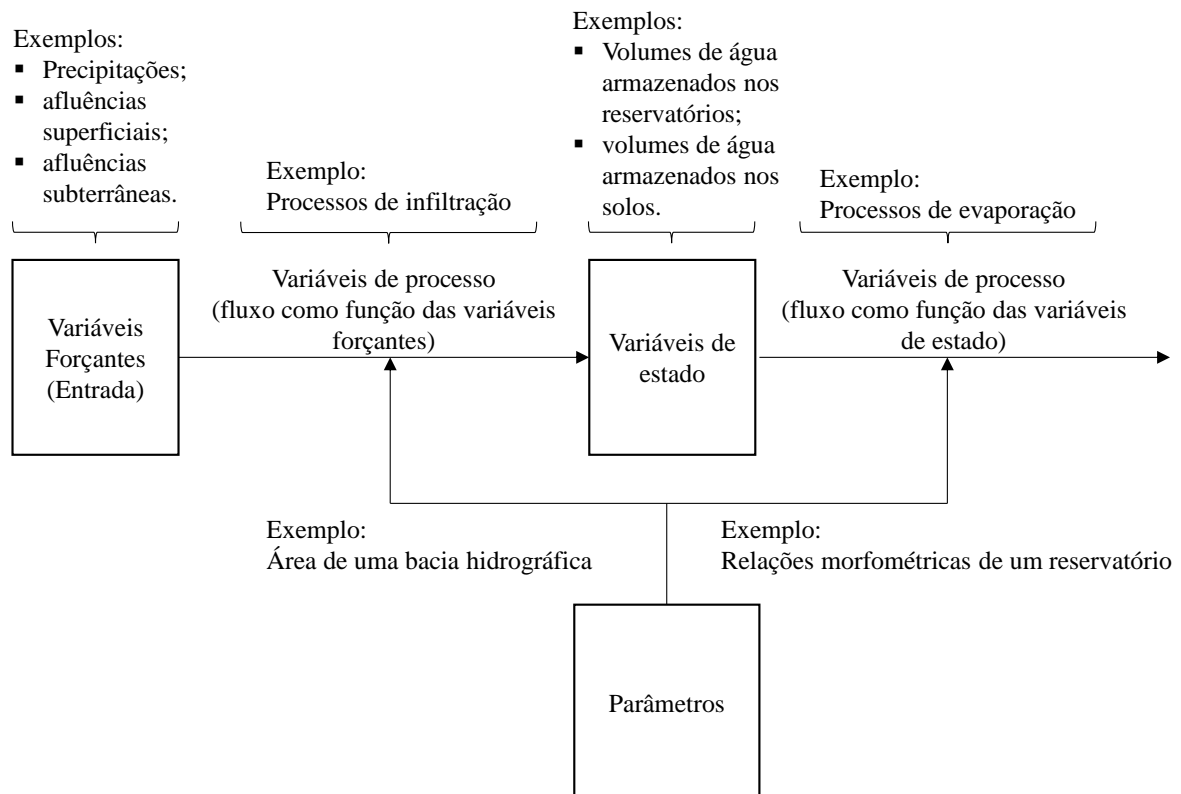
Figura 7 – Componentes de um modelo hidrológico.



Fonte: Singh (1995)

No que tange aos processos inerentes à modelagem de uma bacia hidrográfica, Odum (1971, grifo nosso) descreve quatro grupos existentes: as *variáveis forçantes* (ou impulsos), as *variáveis de estado*, as *variáveis de processo* (ou fluxos) e os *parâmetros*. A Figura 8 procura expressar, visualmente, a relação entre os referidos grupos, contendo exemplos citados pelo autor, assim como por Câmara e Monteiro (2003).

Figura 8 – Relação entre os grupos de variáveis de um modelo hidrológico.



Fonte: Autor, a partir de Odum (1971); Câmara e Monteiro (2003)

2.2.2 Classificação dos modelos hidrológicos

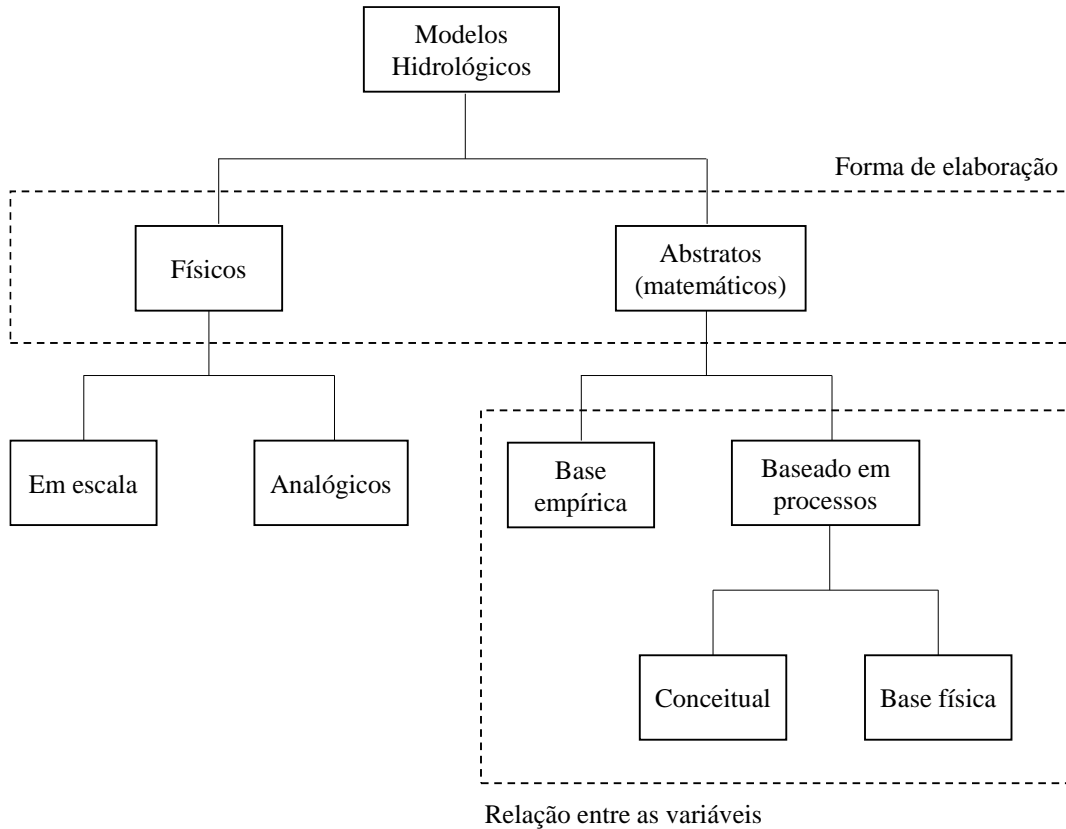
Modelos hidrológicos podem ser classificados por diferentes aspectos: a maneira como são elaborados, tipos de variáveis utilizadas, tipo de relação entre essas variáveis, forma de representar os dados, existência ou não de relações espaciais e existência de dependência temporal (CAMPOS, 2009; LUCAS *et al.*, 2009).

Ao se analisar a relação entre as variáveis de um modelo, estes podem ser classificados como modelos *empíricos* ou modelos *baseados em processo*. Os modelos empíricos utilizam relações baseadas em observações e, em geral, são bastante simples e úteis no dia a dia. No entanto, são pouco robustos, uma vez que são específicos para a região e condições para as quais as relações foram estimadas. Outra limitação desse tipo de modelo é a impossibilidade de fazer simulações de mudanças em condições para os quais o modelo não previu, tal como mudança de uso do solo. Já os modelos baseados em processo, em geral, são mais complexos que os empíricos, visto que buscam descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno (CÂMARA; MONTEIRO, 2003, grifo nosso).

Segundo os autores, os modelos baseados em processo podem ser subdivididos em (1) *modelos conceituais* (também chamados de semiempíricos), que fazem uso de equações

empíricas, mas que descrevem o sistema segundo as leis da física e (2) *modelos físicos*, que utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos. Nos modelos físicos, seus parâmetros possuem um significado físico e, com isso, podem ser estimados através de medidas reais (parâmetros mensuráveis). A Figura 9 resume as classificações abordadas até então.

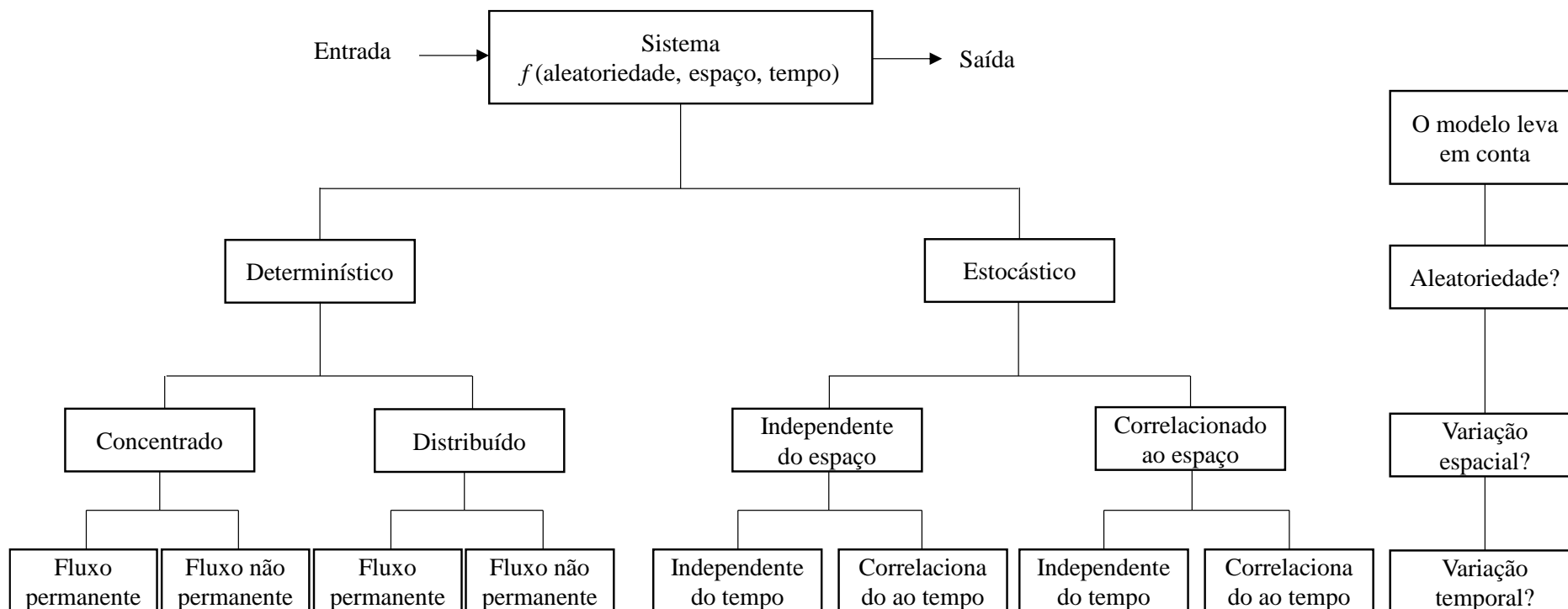
Figura 9 – Classes de modelos segundo a forma de elaboração e relação entre as variáveis.



Fonte: Autor, a partir de Câmara e Monteiro (2003)

Os modelos abstratos representam o sistema em forma matemática e a descrição da operação deste sistema é feita por meio de um conjunto de equações que relacionam as variáveis de entrada e saída (Figura 10).

Figura 10 – Classificação de modelos hidrológicos de acordo com a aleatoriedade, variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos.



Fonte: Chow, Maidment e Mays (1994)

Se as variáveis de um modelo têm ou não um valor fixo em um ponto particular do espaço e do tempo, o modelo é classificado como *determinístico* ou *estocástico*; se o sistema é considerado como um ponto único, sem dimensões no espaço, ou se as variáveis do modelo são definidas como função das dimensões espaciais, o modelo se classifica em *concentrado* ou *distribuído*; e ainda, a forma como as variáveis do modelo se comportam ou se relacionam com o tempo, os modelos podem ser classificados como *fluxo permanente* ou *fluxo não permanente* – em se tratando de modelos determinísticos – ou como *independente do tempo* ou *correlacionado ao tempo* – em se tratando de modelos estocásticos (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1994, grifo do autor). Ademais, Singh (1995) propõe também outras categorias de classificação baseadas: na escala de tempo; na escala espacial; no uso da terra; e no uso pretendido (planejamento, gestão e previsão).

2.2.3 Modelos Chuva-Vazão

Entre as classes de modelos, que são de grande importância para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, figuram os modelos chuva-vazão, que são aqueles modelos hidrológicos que, a partir de certos dados, em geral, precipitação e evaporação, apresentam como saída – através de equações empírica e/ou físicas – estimativas do escoamento de determinada seção de uma bacia hidrográfica (BARROS; MARTINS; SOUZA FILHO, 2013; TODINI, 1988). Desses modelos, alguns representam eventos (que possuem como saída, estimativas de vazão a partir de um evento de chuva) e outros que procuram representar a dinâmica do escoamento em uma bacia, em um período mais amplo, como um mês ou um ano, por exemplo (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1994).

Durante a primeira metade do século XIX foram publicados registros de medições de vazões de vários rios da Europa, servindo como base para o início do desenvolvimento de modelos (TODINI, 1988). A partir destes dados, os primeiros hidrólogos, mesmo que seus métodos fossem limitados pelos dados e técnicas computacionais disponíveis, tentaram prever os fluxos que poderiam ser esperados de um evento de chuva (BEVEN, 2012).

Em sentido amplo, porém, a modelagem chuva-vazão, só teve início na segunda metade daquele século, surgindo em resposta a três tipos de problemas de engenharia: projeto de esgoto urbano, projeto de sistemas de drenagem e projeto de vertedouros de reservatórios (TODINI, 1988).

De acordo com Beven (2012), durante essa última parte do século XIX e o início do XX, a maioria dos engenheiros usava fórmulas empíricas, derivadas para casos particulares e aplicadas a outros casos sob a suposição de que as condições eram semelhantes. Equações

empíricas de estimativa de vazões de pico, como a de Burkli-Ziegler e a de Kresnik são expostas por Villela e Matos (1975). Os autores recomendam o uso de equações empíricas somente em casos em que não seja possível fazer qualquer outra estimativa por outros métodos ali descritos.

Nesse contexto histórico, foi que há quase 170 anos, o engenheiro irlandês Thomas James Mulvaney (1851) publicou o primeiro modelo de chuva-vazão amplamente usado: o Método Racional, cuja equação é expressa a seguir (Equação 1) (BEVEN, 2012).

$$Q = C \cdot i \cdot A \quad (1)$$

Na Equação 1, Q representa a vazão de escoamento superficial, C se refere ao coeficiente de escoamento da bacia hidrográfica, i é a intensidade do evento de chuva e A , representa a área da bacia. Para Todini (1988) o Método Racional pode ser visto como a primeira tentativa de abordar racionalmente o problema de prever o escoamento da chuva.

Na década de 1930, no âmbito do dimensionamento de açudes no Nordeste Brasileiro, o Engenheiro Francisco de Aguiar desenvolveu uma metodologia que incluiu a estimativa do volume afluente médio anual em uma bacia. Para tal, Aguiar desenvolveu equações com base em observações de chuvas e vazões escoadas, que permitiam o cálculo da lâmina escoada média, quando conhecidas a precipitação e as características geomorfológicas da bacia (CAMPOS, 2006). A equação desenvolvida por Aguiar para a estimativa do escoamento médio anual em uma bacia hidrográfica é apresentada a seguir (Equação 2):

$$R(\%) = \frac{H^2 - 400H + 230000}{55000} \quad (2)$$

Na equação, $R(\%)$ representa o rendimento da bacia hidrográfica em percentagem da lâmina precipitada; H representa a precipitação média anual na bacia, em metros. A validade dessa equação é condicionada a pluviosidade entre 500 e 1000 mm anuais. Acima de 1000 mm anuais, a Equação 3 é recomendada:

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

Na Equação 3, Rmm se refere à lâmina escoada na bacia hidrográfica, em mm e H representa a precipitação média anual na bacia, em metros. Campos (2006) afirma que as equações 2 e 3 resultam em valores próximos para pluviosidade entre 500 e 1000 mm anuais, indicando que a adoção da Equação 3 somente, representa de forma satisfatória o método.

Para levar em consideração aspectos geomorfológicos das bacias hidrográficas, isto é, para bacias diferentes da média, Aguiar introduziu um coeficiente de correção do rendimento

do escoamento superficial U , conforme a Equação 4. Aguiar classificou as bacias hidrográficas em oito tipos e avaliou os valores do parâmetro U , Tabela 1. (CAMPOS 2005, 2006).

$$Va = (1/1000) Rmm . U . A \quad (4)$$

Na Equação 4, Va significa o volume afluyente médio anual em metros cúbicos; A é a área da bacia hidrográfica em metros quadrados; Rmm a lâmina anual média escoada na bacia em milímetros; U refere-se ao fator de correção que introduz fatores geomorfológicos da bacia hidrográfica.

Tabela 1 – Valores do coeficiente de correção do rendimento do escoamento superficial¹ (U) segundo o Engenheiro Francisco Aguiar, do DNOCS

Tipo	Bacia Hidrográfica	Coeficiente U
1	Pequena íngreme e rochosa	1,3 a 1,4
2	Bem acidentada sem depressões evaporativas	1,2
3	Média	1,0
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

¹ Também denominado coeficiente de Ryves

Fonte: Campos (2005)

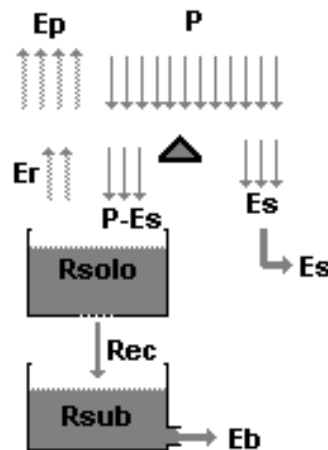
A seguir, surgiu o conceito de Hidrograma Unitário (HU), baseado no princípio da superposição, até que, na década de 1950, surgiram os primeiros modelos ditos conceituais, quando o *U.S Soil Conservation Service* apresentou um procedimento para estimar o escoamento direto a partir da precipitação com base nas denominadas curvas-número (*Curve Number*, ou CN), em 1954 (FREITAS, 1994). O método pode ser estudado com detalhes em obras como as de Chow, Maidment e Mays (1994), Tucci (2007) e Collischonn e Dornelles (2015). Rodrigues (2019), estudando os processos hidrológicos de uma bacia experimental localizada em região semiárida de Caatinga preservada, verificou as incertezas nos parâmetros λ e CN do modelo SCS/CN, e por meio disso, provou que as abstrações iniciais, influenciadas pela dinâmica das raízes no solo, contribuem significativamente para as incertezas na modelagem hidrológica daquela bacia. Soares *et al.* (2019), modelando o escoamento superficial na bacia hidrográfica do açude Forquilha-CE pelo método SCS-CN obtiveram resultados superestimados em seu trabalho. Os autores observaram que a não consideração da condição de umidade inicial do solo antes da precipitação influencia o tempo para o início do escoamento, impactando a abstração inicial do escoamento.

Segundo Freitas (1994), “a partir da década de 1960, em razão da incorporação da ferramenta computacional, os modelos chuva-vazão sofreram um grande impulso até atingirem o estado de arte atual”.

A exemplo do método de Aguiar, o método de *Molle e Cadier* é um modelo chuva-vazão desenvolvido para a região Nordeste, com clima semiárido, geologia cristalina e chuva anual média inferior a 800 mm (MOLLE; CADIER, 1992). A partir de três elementos fundamentais (superfície de drenagem, total pluviométrico anual e a caracterização da bacia hidrográfica), o modelo permite determinar o volume anual médio escoado na bacia. Uma descrição do modelo, assim como sua aplicação em dez reservatórios do semiárido cearense podem ser vistos na pesquisa de Alexandre (2012).

Outro modelo do tipo transformação chuva-vazão bastante aplicado na região semiárida é o modelo SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*), um modelo conceitual, uma vez que se baseia nos conceitos físicos relacionados ao ciclo hidrológico. Inicialmente desenvolvido para intervalo de tempo diário, posteriormente foi apresentado nas versões horária e mensal, adaptando-se algumas modificações em sua estrutura. O modelo SMAP procura representar o armazenamento e os fluxos de água na superfície, na camada superior do solo e no aquífero, através de reservatórios lineares fictícios (LOPES *et al.*, 1981, 1982) (Figura 11).

Figura 11 – Estrutura da versão mensal do modelo SMAP



Fonte: Lopes *et al.* (1981)

Na Figura 11, R_{solo} e R_{sub} se referem aos reservatórios lineares fictícios que representam o armazenamento da água na camada superior do solo e no aquífero, respectivamente. P se refere à precipitação na bacia, E_p à evapotranspiração potencial, E_r à evapotranspiração real, E_s ao escoamento superficial, Rec à recarga do aquífero e E_b ao

escoamento de base. Em cada reservatório, o balanço hídrico pode ser representado pelas Equações 5 e 6 e os fluxos (funções de transferência de água) pelas Equações 7 a 10:

$$R_{solo}(i + 1) = R_{solo}(i) + P - Es - Er - Rec \quad (5)$$

$$R_{sub}(i + 1) = R_{sub}(i) + Rec - Eb \quad (6)$$

$$Es = Tu^{Pes} \cdot P \quad (7)$$

$$Er = Tu \cdot Ep \quad (8)$$

$$Rec = Crec \cdot Tu^4 \cdot R_{solo} \quad (9)$$

$$Eb = (1 - 0,5^{1/Kkt}) \cdot R_{sub} \quad (10)$$

Nas equações, Tu é o teor de umidade (%), calculado pela relação entre a lâmina de água presente no solo (R_{solo} , em mm) e sua capacidade de saturação (Sat , em mm). Pes é o parâmetro de escoamento superficial (adimensional), $Crec$ é o coeficiente de recarga (%) e Kkt se refere ao número de meses em que a vazão básica cai à metade de seu valor. Sat , Pes , $Crec$ e Kkt são, portanto, os parâmetros do modelo e para a sua inicialização, estima-se os valores de R_{solo} e R_{sub} pelas Equações 11 e 12:

$$R_{solo}(1) = Tu_{in} \cdot Sat \quad (11)$$

$$R_{sub}(1) = \frac{Eb_{in} \cdot 2630}{Ad \cdot (1 - 0,5^{1/Kkt})} \quad (12)$$

Estudos realizados apontam, para a inicialização do modelo em bacias do semiárido, os seguintes valores para os parâmetros iniciais: $Crec = 0$; $Kkt = 3$; $Tu_{in} = 30$; e $Eb_{in} = 0$ (COGERH; UFC, 2013). Por fim, para cada mês simulado, a vazão escoada pela bacia, em $m^3 \cdot s^{-1}$, é calculada pela Equação 13, em que Ad se refere à área de drenagem da bacia, em km^2 :

$$Q = \frac{(Es + Eb) \cdot Ad}{2630} \quad (13)$$

Pereira (2017) utilizou o modelo SMAP, calibrando e validando para sub-bacias do rio Jaguaribe: Arneiroz (5.870 km^2), Icó (12.400 km^2), Iguatu (20.700 km^2) e Senador Pompeu (4.530 km^2). Para escala diária, utilizou-se o algoritmo evolucionário multiobjetivo MOPSO (*Multiobjective Particle Swarm Optimization*) para a calibração automática dos parâmetros do modelo. As melhores calibrações foram escolhidas de acordo com o melhor coeficiente de Nash-Sitcliffe (NSE) da série e foi feita a análise de eficiência dos parâmetros do modelo. Os períodos analisados abrangeram os anos de 1974 a 2010, tomando como medidas os registros de vazões dos postos fluviométricos representativos de cada sub-bacia. Desse modo, o trabalho

indicou a alta qualidade e consistência dos parâmetros de calibração, uma vez que em todas as quatro bacias foram obtidos coeficientes de Nash-Sutcliffe (NSE) da série acima de 0,70.

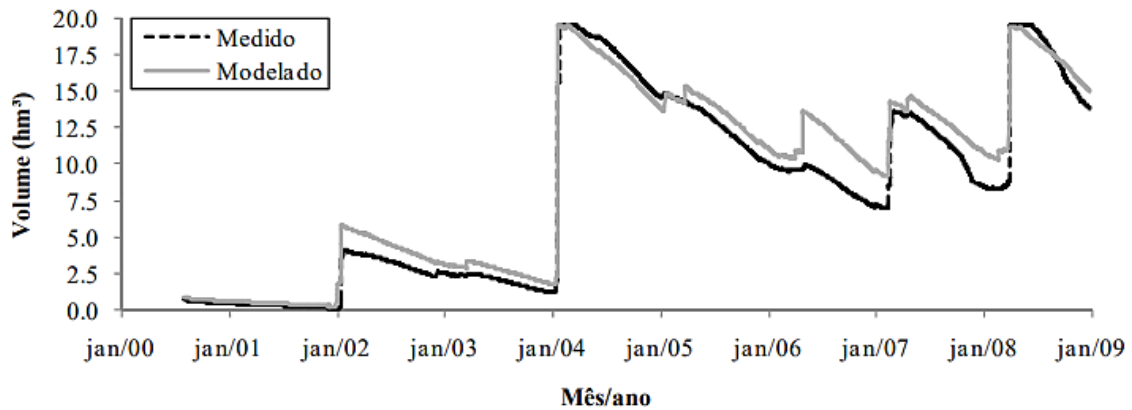
Alexandre (2012), comparando os métodos de Molle e Cadier, SCS/CN, equação de Aguiar e SMAP (com parâmetros calculados por mineração de dados), para estimativas das afluências médias anuais, constatou que este último foi o que melhor reproduziu os padrões hidrológicos das pequenas bacias estudadas em sua pesquisa, sugerindo maior confiabilidade no cálculo hidrológico de bacias não monitoradas.

Um modelo mais recente, aplicado a ambientes semiáridos, é o WASA (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments*), um modelo determinístico para simulação contínua, composto de abordagens conceituais orientadas para o processo (GÜNTNER; BRONSTERT, 2004). O modelo simula o balanço hídrico de uma unidade de drenagem e dispensa calibração, uma vez que seus parâmetros são essencialmente físicos. Uma descrição detalhada do modelo é apresentada nos trabalhos de Güntner (2002) e Güntner e Bronstert (2004).

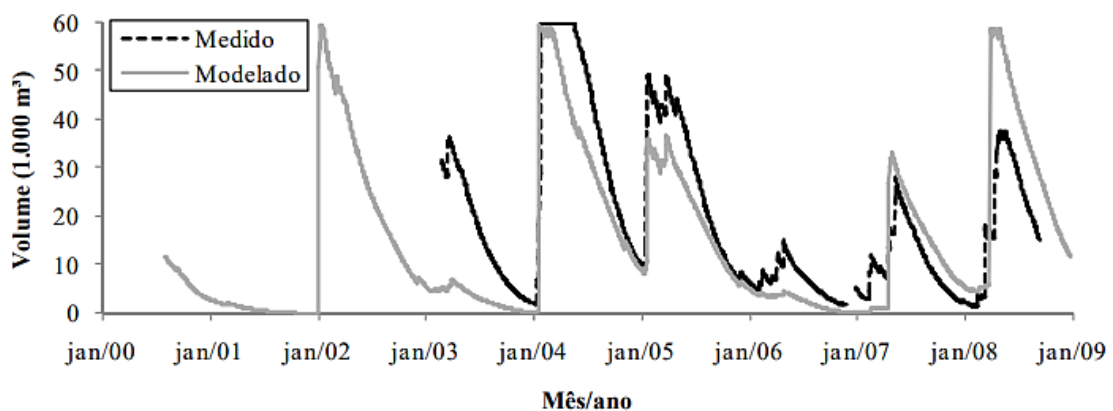
Malveira (2009) utilizou o modelo WASA para avaliar a disponibilidade hídrica da bacia do açude Orós (24 mil km²), aplicando-o ao período de 1961 a 2005, obtendo uma indicação de que a disponibilidade hídrica máxima na bacia pode ser obtida para a área média de captação de 7 km² por açude. A fim de avaliar a produção de sedimentos na região semiárida do Brasil, Medeiros (2009), realizou a simulação hidrossedimentológica da bacia hidrográfica de meso-escala do açude Benguê, Ceará, utilizando-se o modelo WASA-SED. Por meio do modelo, obteve-se uma estimativa satisfatória dos fluxos de água e sedimentos tanto na bacia do Benguê (933 km²) como na sub-bacia de Aiuaba (12 km²), apresentando, para o período de 2000 a 2008, coeficientes de eficiência NSE de 0,95 e 0,71 para os volumes medidos e modelados nos reservatórios Benguê e Boqueirão, respectivamente (Figuras 12a e 12b). Resultados satisfatórios na representação dos fluxos de água e sedimentos ao longo de toda a rede de reservatórios, para a mesma região, foram obtidos por Mamede *et al.* (2018), também se utilizando do modelo WASA.

Figura 12 – Volumes medidos e calculados com o modelo WASA no período de 2000 a 2008 nos Açudes Benguê e Boqueirão (este na Bacia Experimental de Aiuaba).

a) Volumes armazenados no Açude Benguê



b) Volumes armazenados no Açude Boqueirão



Fonte: Medeiros (2009)

Gondim (2018) obteve, em seus resultados de modelagem chuva-vazão, uma superestimação das vazões afluentes geradas pelo modelo WASA. Segundo o autor, a majoração foi, provavelmente, ocasionada pelo escoamento de base, visto tal fenômeno ocorrer com maior raridade no semiárido nordestino pelas suas características climáticas e geológicas. A pesquisa de Lima (2020), por sua vez, demonstrou a validade do modelo WASA em diferentes escalas ao auferir desempenho satisfatório na modelagem volumétrica dos reservatórios Cedro (125 hm³), Orós (1.940 hm³), Pedras Brancas (434 hm³) e Trussu (301 hm³), com NSE superior a 0,50 em todas as simulações. O trabalho do autor também constatou

sensibilidade do modelo ao parâmetro condutividade saturada dos solos e apresentou melhorias no desempenho quando da determinação da condutividade hidráulica do embasamento cristalino. Por outro lado, o desempenho insatisfatório do modelo em outros açudes estudados sugeriu que as simplificações propostas diante da escassez de dados ampliaram as incertezas nas simulações do modelo WASA.

2.2.4 Desagregação de vazões anuais em mensais

No âmbito da modelagem do tipo chuva-vazão, em projetos de recursos hídricos, a obtenção de extensas séries de vazões estatisticamente semelhantes às séries históricas é de extrema importância (ARAÚJO; CAMPOS, 2006). A depender da aplicação requerida, as séries de vazões necessárias aos estudos podem ser anuais, mensais ou em intervalos de tempo menores. Para a obtenção de séries sintéticas de vazões desagregadas nas diversas estações do ano (vazões mensais, por exemplo) a partir de dados de vazões anuais, Svanidze (1980) propôs o Método dos Fragmentos (MF). SriKanthan e MacMahon (1980) empregaram um procedimento de MF para rios na Austrália, enquanto Araújo e Campos (2006) o fizeram para dezenove reservatórios do Ceará, empregando ao procedimento, a denominação de “Método da Proporção da Vazão Média Anual (MPVMA)”, descrito a seguir. O MPVMA distribui cada vazão anual histórica utilizando-se de uma relação (P_j) entre a vazão média mensal e a vazão média anual, que é calculada pela Equação 14:

$$P_j = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{i,j}}{\sum_{i=1}^n Q_i} \quad J = 1, 2, \dots, 12 \quad (14)$$

Na Equação 14, $Q_{i,j}$ é a vazão mensal histórica para o mês j e ano i ; Q_i é a vazão anual histórica para o ano i e n é o número de anos de dados históricos. A vazão mensal sintética, para o mês j e ano i ($Q'_{i,j}$) é calculada pela Equação 15:

$$Q'_{i,j} = p_j \cdot Q_i \quad (15)$$

2.2.5 Balanço hídrico em reservatórios

O balanço entre entradas e saídas de água em uma bacia hidrográfica é denominado balanço hídrico. O mesmo conceito é válido para um reservatório, onde se pode aplicar a equação da continuidade. A equação da continuidade aplicada a um reservatório representa a variação da massa em relação ao tempo como uma diferença entre as saídas e entradas de massa no reservatório (Equação 16).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{dM_i}{dt} - \frac{dM_o}{dt} \quad (16)$$

Na Equação 16, o primeiro membro representa a variação da massa em um determinado intervalo de tempo, enquanto o segundo membro representa a diferença entre a massa inicial e final, decorrido o mesmo intervalo de tempo. Como $M = \rho V$, a equação da continuidade pode ser escrita na forma:

$$\frac{d(\rho V)}{dt} = \frac{d(\rho V_i)}{dt} - \frac{d(\rho V_o)}{dt} \quad (17)$$

Na equação, ρ é a massa específica e V é o volume. A massa específica da massa de água em um reservatório é dependente da sua temperatura. Considerando, contudo, que, no passo de tempo analisado, a temperatura não sofra considerável variação, considera-se ρ constante. Desse modo, a equação da continuidade toma a forma da Equação 18. A equação da continuidade em um reservatório, com isso, representa a variação do volume em relação ao tempo, como uma diferença entre as vazões de entrada e saída no reservatório.

$$\frac{dV}{dt} = I - Q \quad (18)$$

Na Equação 18, V é o volume (m^3); t é o tempo (s); I é a vazão afluente ($m^3 \cdot s^{-1}$); e Q é a vazão de saída do reservatório ($m^3 \cdot s^{-1}$). Considerando incrementos de tempos finitos, a Equação diferencial 18 pode ser aproximada pela Equação 19:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = V_i - V_o \quad (19)$$

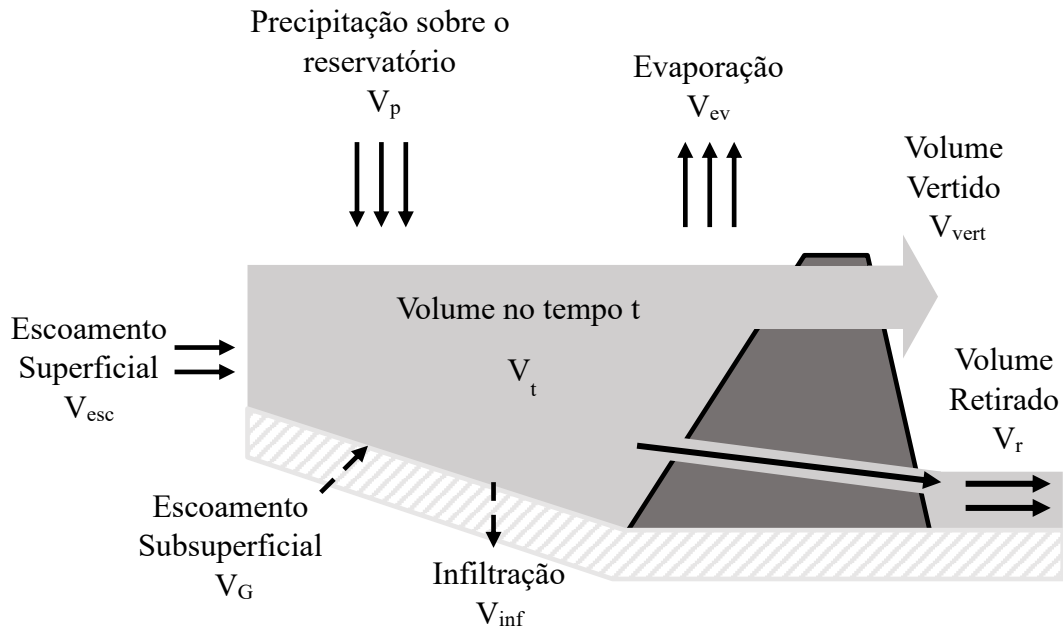
Na Equação 19, V_i é o volume afluente ao reservatório no intervalo de tempo analisado (m^3); e V_o é o volume efluente do reservatório no mesmo intervalo de tempo (m^3). Desenvolvendo-se esta equação, obtém-se:

$$V_{t+1} - V_t = V_i - V_o \quad (20)$$

$$V_{t+1} = V_t + V_i - V_o \quad (21)$$

Nas Equações 20 e 21, V_{t+1} e V_t correspondem aos volumes armazenados, no final e no início do intervalo de tempo analisado, respectivamente. A Figura 13 mostra os principais componentes de entradas (V_i) e saídas (V_o) de água em um reservatório superficial típico.

Figura 13 – Principais componentes de entradas e saídas de água em um reservatório superficial.



Fonte: Autor

De acordo com a Figura 13, uma vez identificados os componentes de entradas (V_i) e saídas (V_o) de água no reservatório, pode-se reescrever a Equação 21 da seguinte forma (Equação 22):

$$V_{t+1} = V_t + (V_p + V_{esc} + V_G) - (V_{inf} + V_{ev} + V_r + V_{vert}) \quad (22)$$

Na região semiárida, a diferença entre os componentes “Escoamento Subsuperficial” e “Infiltração” pode ser desprezada por três principais motivos: (1) em virtude dos solos pouco profundos, a diferença “ $V_G - V_{inf}$ ” resulta em valores positivos, mas muito inferiores às demais grandezas envolvidas no balanço hídrico; (2) os dois processos são de difícil mensuração, em comparação aos demais; e (3) a incorporação destes componentes não confere significativos ganhos na qualidade do resultado da simulação de balanço hídrico. É importante destacar que, nesta abordagem, não se despreza a existência ou mesmo a magnitude dos dois processos, mas sim, a diferença entre ambos (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006). A Equação do balanço hídrico de um reservatório típico da região semiárida, portanto, pode ser representada da seguinte forma (Equação 23):

$$V_{t+1} = V_t + (V_p + V_{esc}) - (V_{ev} + V_r + V_{vert}) \quad (23)$$

Na Equação 23, V_{t+1} é o volume armazenado ao final do período simulado; V_t é o volume armazenado no início do período simulado; V_p é o volume precipitado sobre a bacia hidráulica do reservatório; V_{esc} é o volume escoado pela bacia hidrográfica do reservatório; V_{ev} é o volume evaporado do espelho d'água do açude; V_r é o volume retirado para os diversos usos a serem atendidos pelo reservatório e V_{vert} é o volume vertido pelo açude, dentro do período simulado.

O balanço hídrico de passo de tempo mensal por meio da equação 23 apresenta resultados razoáveis, a exemplo do estudo do redimensionamento hídrico do açude Cedro, realizado por Rabelo (2021), que, utilizando-se desta metodologia, obteve os resultados de $302 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ para a Q_{90} e um volume redimensionado de 70 hm^3 para o açude Cedro. Os resultados foram convergentes com a literatura, a saber, $305 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ e 67 hm^3 , respectivamente (CEARÁ, 1999; CAMPOS, 1996). Pinheiro (2019) e Silva (2019) utilizaram a Equação 23, para o passo de tempo mensal, na busca de operação otimizada para os reservatórios Jenipapeiro (Deputado Irapuan Pinheiro) e Pedras Brancas (Quixadá), respectivamente.

Para o balanço hídrico em intervalos de tempos sazonais, pode-se dividir o ano em estação chuvosa e estação seca, conforme realizado por Araújo, Güntner e Bronstert, (2006). Em seus estudos sobre a perda de volume em reservatórios por deposição de sedimentos e seu impacto na disponibilidade de água no Semiárido Brasileiro, os autores calcularam o balanço hídrico nos reservatórios, simplificando a Equação 22 sob a hipótese da Equação 24, que levou à Equação 25.

$$V_p + V_{g,U} \approx V_{ev,U} + V_{inf} \quad (24)$$

$$V_{t+1} = V_t + V_{esc} - (V_{ev,S} + V_r + V_{vert}) \quad (25)$$

Nas equações supracitadas, V_{t+1} é o volume armazenado ao final do período simulado; V_t é o volume armazenado no início do período simulado; V_p é o volume precipitado sobre a bacia hidráulica do reservatório; V_{esc} é o volume escoado pela bacia hidrográfica do reservatório; $V_{ev,U}$ é o volume evaporado do espelho d'água do açude, na estação úmida; $V_{ev,S}$ é o volume evaporado do espelho d'água do açude, na estação seca; V_r é o volume retirado para os diversos usos a serem atendidos pelo reservatório; V_{vert} é o volume vertido pelo açude, dentro do período simulado e $V_{g,U}$ é a descarga de água subterrânea ao reservatório, na estação úmida.

2.3 Disponibilidade hídrica

A disponibilidade hídrica pode ser entendida como a quantidade de água para utilização nas atividades humanas, que é disponível na natureza por unidade de tempo. A disponibilidade hídrica é influenciada pelos usos consuntivos e pelos fluxos (por exemplo, evaporação e infiltração); assim como por outros fatores, como assoreamento, poluição e construção de múltiplos reservatórios a montante. Sua representação corresponde a uma vazão associada a um determinado risco de falha, ou garantia de fornecimento (McMAHON; MEIN, 1978; CAMPOS, 2005).

Na caracterização da disponibilidade hídrica de uma determinada bacia, dois conceitos são de grande relevância: a vazão de regularização e a curva de garantia. McMahon e Mein (1978) definem a vazão regularizada como o volume de água controlada liberado de um reservatório durante um determinado intervalo de tempo. Esse termo, portanto, descreve o fluxo regulado pelo reservatório. Segundo os autores, a liberação é frequentemente expressa como uma fração do fluxo médio afluente. Dados das autoridades australianas de água indicam que esta fração é, geralmente, em torno de 50 a 70%, e devido ao fluxo líquido por evaporação, raramente excede 90% (reservatórios australianos regularizam, em média, 65% da vazão natural afluente). Nesse sentido, Araújo (2003) afirma que os reservatórios do semiárido conseguem regularizar apenas cerca de 40% da vazão afluente, “perdendo” 60% entre evaporação, infiltração e extravasamento.

Campos (2005) afirma que a regularização pode ser entendida como um ajustamento da oferta à demanda e que a vazão regularizada é uma variável aleatória obtida por simulação de uma série histórica. Tradicionalmente, a análise da capacidade de regularização de um reservatório era realizada pelo Método de Rippl, método gráfico direcionado ao dimensionamento de reservatórios (WURBS, 1996). No entanto, o método da simulação, por ser mais simples e intuitivo para a análise da regularização de reservatórios superficiais, é a forma mais utilizada atualmente (COLLISCHONN; DORNELLES, 2015).

Um trabalho de grande relevância no campo da regularização de vazões, aplicado a reservatórios superficiais do semiárido foi o método desenvolvido por Campos (1987, 1996): o Diagrama Triangular de Regularização (DTR). O método permite estimar os valores esperados, em estado de equilíbrio, dos volumes regularizado, evaporado e sangrado, para uma garantia anual de 90%. Ademais, o método ainda permite realizar o cálculo do volume anual regularizado (volume programado para se retirar anualmente do reservatório sempre que houver disponibilidade). Para tal, o método se utiliza de um fator adimensional de evaporação (f_E), um

fator adimensional de capacidade (f_k) e do coeficiente de variação dos deflúvios anuais (CV). O detalhamento e aplicações do método podem ser encontrados em Campos (1996, 2005, 2006, 2010).

O conhecimento da vazão de regularização de um reservatório é de grande serventia para a gestão deste. É por meio dessa informação que o gestor pode limitar as retiradas à disponibilidade do reservatório, garantindo fornecimento de água sem ameaças de colapso do sistema (NUNES, 2015).

A probabilidade de falha (P_f) de um reservatório, no que tange ao atendimento às suas demandas, pode ser entendida como a proporção de unidades de tempo durante as quais o reservatório não consegue ofertar a vazão requerida para o suprimento da demanda e o número total de unidades de tempo usadas na análise (Equação 26) (McMAHON; MEIN, 1978).

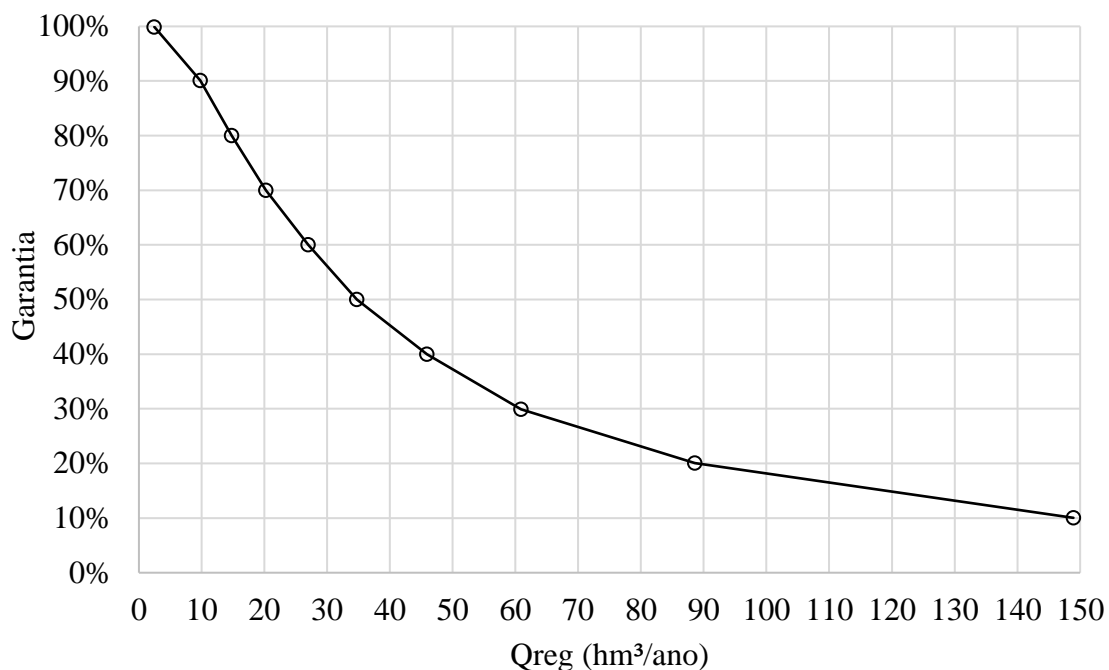
$$P_f = \frac{n}{N} \quad (26)$$

Na Equação 26, P_f é a Probabilidade de falha, n é o número de anos durante os quais não seria possível disponibilizar integralmente a vazão que se deseja ofertar (vazão-objetivo), e N o número total de anos de análise. A definição correspondente de Garantia (G_a), ou confiabilidade, é dada pela Equação 27.

$$G_a = 1 - P_f \quad (27)$$

A curva de garantia de um reservatório consiste na relação entre as vazões regularizáveis e a garantia G_a . A Figura 14 ilustra a curva de garantia do açude Cedro, em Quixadá-CE. Na curva, observa-se que a vazão da ordem de $9,5 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$ pode ser ofertada em cerca de 90% do tempo (Garantia de 90%), ou de outra forma, que apresenta uma probabilidade anual de falhas de 10%.

Figura 14 – Curva de disponibilidade hídrica do açude Cedro, Quixadá-CE, que correlaciona a vazão regularizada à garantia de oferta.



Fonte: Autor

No âmbito de uma bacia hidrográfica, a avaliação da disponibilidade hídrica requer, inicialmente, a identificação de seus principais reservatórios para, através de balanço hídrico multianual, avaliar sua capacidade de suporte (ARAÚJO, 2011). A disponibilidade hídrica, como observado anteriormente, não é uma questão de volume, mas de fluxo de água. Não se pode, portanto, falar em disponibilidade hídrica em termos volumétricos, mas em termos de vazão, pois se trata de um ciclo com a água movendo-se constantemente de um estado para outro (CHAPRA, 1997; ARAÚJO, 2011). Neste ponto, Silveira *et al.* (1998) afirmam que a escassez de dados hidrológicos em pequenas bacias hidrográficas compromete a avaliação da disponibilidade hídrica, podendo limitar o aproveitamento de pequenos açudes no semiárido brasileiro (mais de 70.000, na região Nordeste, segundo Albinati (2006)). Sendo assim, as técnicas de modelagem chuva-vazão, anteriormente mencionadas são de extrema importância nessa avaliação.

Na região semiárida, o uso do modelo VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*), concebido por Araújo *et al.* (2006), tem sido de grande utilidade no cálculo da disponibilidade hídrica dos sistemas hídricos. O modelo consiste em realizar a simulação do balanço hídrico em longo prazo para cada reservatório. Para tal, o modelo considera as demandas e as retiradas sujeitas a uma determinada regra de operação do reservatório, calculando a garantia associada à vazão que se deseja extrair do reservatório durante um ano.

Macambira, Nascimento e Medeiros (2017) avaliaram o impacto da densidade da açudagem na disponibilidade hídrica da bacia hidrográfica do Açude Fogareiro. Através da simulação do balanço hídrico em diversos cenários de açudagem na bacia, concluíram que a vazão de água disponibilizada na região é de $227 \text{ hm}^3 \text{ ano}^{-1}$, na condição atual, e que ainda é possível aumentar a quantidade de barragens sem afetar negativamente a oferta hídrica.

Além da densidade de açudes na bacia hidrográfica, outros fatores que impactam a disponibilidade hídrica de reservatórios têm sido alvo de estudos em bacias do semiárido, como por exemplo o assoreamento, a eutrofização e a geometria dos reservatórios (ALEXANDRE; MEDEIROS, 2017; LOPES, 2016; MOLLE; CADIER, 1992).

2.4 Otimização da operação de reservatórios

Em ambientes complexos, como em sistemas hídricos, o processo de decisão se torna mais difícil, uma vez que envolve dados que podem apresentar imprecisão ou estar incompletos. Além disso problemas desta natureza envolvem múltiplos critérios, inúmeros agentes de decisão, e podem também ter vários objetivos, por natureza, conflitantes entre si (BARROS; MARINS; SOUZA, 2009).

Nesse contexto, modelos de suporte à decisão se tornam valiosas ferramentas, uma vez que permitem que várias alternativas sejam avaliadas antes de uma tomada de decisão. Como afirma Labadie (2004), a coordenação ideal das muitas facetas dos sistemas de reservatório requer a assistência de ferramentas de modelagem de computador capazes de fornecer informações para uma gestão racional e decisões operacionais.

Araújo, Mamede e Lima (2018) afirmam que a utilização de modelos de forma tal que excluam um significativo grupo de atores sociais, se constitui em tecnocracia. Ratificando esse pensamento, Ribeiro *et al.* (2013) observam, de forma bastante acertada que, tais modelos não devem visar em tornar o processo decisório como sendo aquele que apresenta as melhores técnicas científicas, mas que sejam capazes apenas de sinalizar as melhores decisões, não tomando a decisão no lugar do operador do sistema. Entende-se que a abordagem participativa – em que cada parte interessada esteja devidamente munida de informações para tomar a melhor decisão – ainda é a única solução para que um sistema tão complexo funcione com eficiência (ARAÚJO; MAMEDE; LIMA, 2018).

2.4.1 Modelos e regras de operação de reservatórios

Para qualquer operação de reservatório, a regra ou política de operação envolve decidir sobre a magnitude das liberações do reservatório para atender às demandas especificadas para

diferentes fins com base em dois critérios principais, quais sejam: o armazenamento atual no reservatório e os prováveis influxos esperados para o reservatório (BHATIA; SRIVASTAV; SRINIVASAN, 2018).

Nesse contexto, a determinação das melhores alocações para diferentes usos é a principal tarefa a ser realizada. Essa alocação deve maximizar o benefício geral entre os diversos usos. Por outro lado, em se tratando de um único uso, como o abastecimento humano, em áreas onde a oferta hídrica para esse uso exibe uma variação temporal significativa, quando comparado com a demanda, o desafio é preencher a lacuna e obter uma combinação ideal entre os padrões de oferta e demanda de água (VIEIRA *et al.*, 2010; TURGUT *et al.*, 2019).

Diversos autores afirmam que, para proceder a otimização de operação de reservatórios, não há um algoritmo geral para este fim. Não existe um procedimento de solução universal para todos os tipos de problemas. Essa lacuna é atribuída ao fato de que há diversas configurações possíveis de um sistema de recursos hídricos (LIMA; LANNA, 2005; CURI *et al.*, 2011; VIEIRA *et al.*, 2010; VIEIRA; CURI, 2016).

Desse modo, a configuração do sistema é um dos principais fatores de escolha da metodologia a ser aplicada. No entanto, outros fatores devem ser levados em conta nessa escolha. Além das características físicas, econômicas ou sociais da região de interesse, ainda devem ser postos em análise, os objetivos de uso dos recursos hídricos e a eficiência no processamento dos computadores (VIEIRA; CURI, 2016; CURI *et al.*, 2011).

Wurbs (2005) afirma que os modelos de rio/reservatório podem ser classificados em dois grandes grupos: modelos de simulação e otimização, embora muitos modelos de otimização incluam simulação. Nessa mesma linha, Wurbs (1993) explica que os modelos de simulação são usados na comparação do desempenho de reservatórios testando cenários alternativos (operações alternativas), enquanto os modelos de otimização buscam, automaticamente, o desempenho ideal por um algoritmo computacional predefinido.

No que tange ao tipo de otimização empregada, seus métodos, por sua vez, podem ser apresentados em quatro grupos, quais sejam: programação linear, programação dinâmica, programação não-linear e simulação. Têm sido relatadas, na literatura, combinações destes métodos (LIMA e LANNA, 2005). Vieira e Curi (2016) afirmam que, atualmente, os modelos de suporte a decisão são a combinação de técnicas de otimização e simulação, apresentando, ainda uma tendência para a incorporação do aspecto qualitativo da água. Loucks e Van Beek (2017), no contexto do uso combinado das duas técnicas, afirmam que, exceto para problemas relativamente simples, o uso dos métodos de otimização se dá principalmente para reduzir o

número de alternativas que precisam ser posteriormente analisados usando métodos de simulação.

Os modelos de simulação e otimização são considerados como as principais metodologias para auxiliar e alcançar as melhores formas de operar os reservatórios, as denominadas *regras de operação* (BARROS, 2010, grifo nosso). Vieira e Curi (2016) afirmam que, na operação de reservatórios, as descargas são determinadas com base num conjunto pré-definido de aflúências e de regras de operação.

As regras de operação de reservatórios têm, basicamente, a função de definir as liberações em função do nível de armazenamento visando diferentes objetivos. Existem diferentes regras de operação de reservatórios, porém todas buscam indicar o armazenamento ou descarga alvo que se pretende lograr em um determinado período (COLLISCHONN; BRAVO; PILAR, 2005). As principais regras de operação conhecidas na literatura são os volumes metas de acumulação, o zoneamento múltiplo e as curvas-guia. (VIEIRA *et al.*, 2010). Para as três principais regras de operação mencionadas, o Quadro 2 resume a sua conceituação, suas vantagens e desvantagens.

Sobre as desvantagens das duas primeiras regras de operação ora expostas, isto é, a questão do caráter estocástico das aflúências, Turgut *et al.* (2019) tecem críticas enfáticas a procedimentos de otimização atualmente praticados. Segundo os pesquisadores, o extremo dos procedimentos dos modelos existentes pode ser apresentado quando as políticas de operação são geradas (a partir de alguns dos modelos de otimização existentes) totalmente baseadas na simples troca das variáveis estocásticas por variáveis determinísticas, ignorando totalmente a característica essencial do sistema de barragens e reservatórios, que é a aleatoriedade das aflúências.

Na mesma linha de pensamento, Ren *et al.* (2019) afirmam que as soluções otimizadas podem apresentar vulnerabilidade ao fracasso porque a tomada de decisão na gestão de recursos hídricos geralmente envolve fatores com grandes incertezas como, por exemplo, as condições de escoamento, o crescimento da demanda de água, forças climáticas etc.

Ainda segundo Ren *et al.* (2019), a maioria dos processos de operação ótimos são modelados com sequências de *runoff* determinísticas, que indicam que todas as informações (informações observadas / históricas) são conhecidas de antemão durante o período de operação. No entanto, na operação prática do reservatório, as informações futuras de escoamento são completamente desconhecidas e não podem ser previstas com precisão.

Quadro 2 – Regras de operação: conceitos, vantagens e desvantagens

Regra de operação	Conceito	Vantagens	Desvantagens
Volume meta	Regra de operação que, na procura pelo atendimento das demandas, busca a manutenção dos volumes temporais dos reservatórios próximos das metas desejadas.	Aumento do nível de confiança no atendimento e o atendimento de usos não-consuntivos de forma relativamente simples	Não leva em consideração a natureza variável das vazões afluentes e demandas
Zoneamento	Regra de operação que realiza a subdivisão do volume do reservatório em zonas de alertas	Associação da demanda ao nível do reservatório	Não considera as previsões de afluências, podendo reduzir drasticamente o volume dos reservatórios ou provocar inundações
Curvas-guia	Regras de operação definidas através da dinâmica entre o volume armazenado e as vazões afluentes	Consideração da previsão das vazões afluentes	Não prevê a variabilidade das demandas nas suas prioridades de atendimento e na determinação das curvas guias

Fonte: Autor, a partir de Vieira *et al.* (2010)

Diante da complexidade dos problemas envolvendo operação de reservatórios, sobretudo no que tange às características estocásticas das variáveis hidrológicas, anteriormente mencionadas, e da não-linearidade nas relações morfométricas dos reservatórios (relação cota-área-volume), Turgut *et al.* (2019) afirmam, ainda, que a incapacidade inerente das abordagens clássicas na solução de problemas de projeto estocástico de alta dimensão limita sua utilização para sistemas de gerenciamento de água e abre caminho para a busca de opções alternativas, como algoritmos metaheurísticos.

Os algoritmos metaheurísticos, por sua vez, desde o final da década de 1980 vêm sendo frequentemente utilizados por pesquisadores de hidrologia com respeito aos problemas de planejamento e gestão de recursos hídricos, como o algoritmo genético (GA), por exemplo. As aplicações de algoritmos metaheurísticos baseados em enxame, em sistemas de operação de reservatórios, têm atraído considerável atenção dos pesquisadores por causa de sua efetividade na resolução de problemas de projeto de engenharia multidimensional (TURGUT *et al.*, 2019).

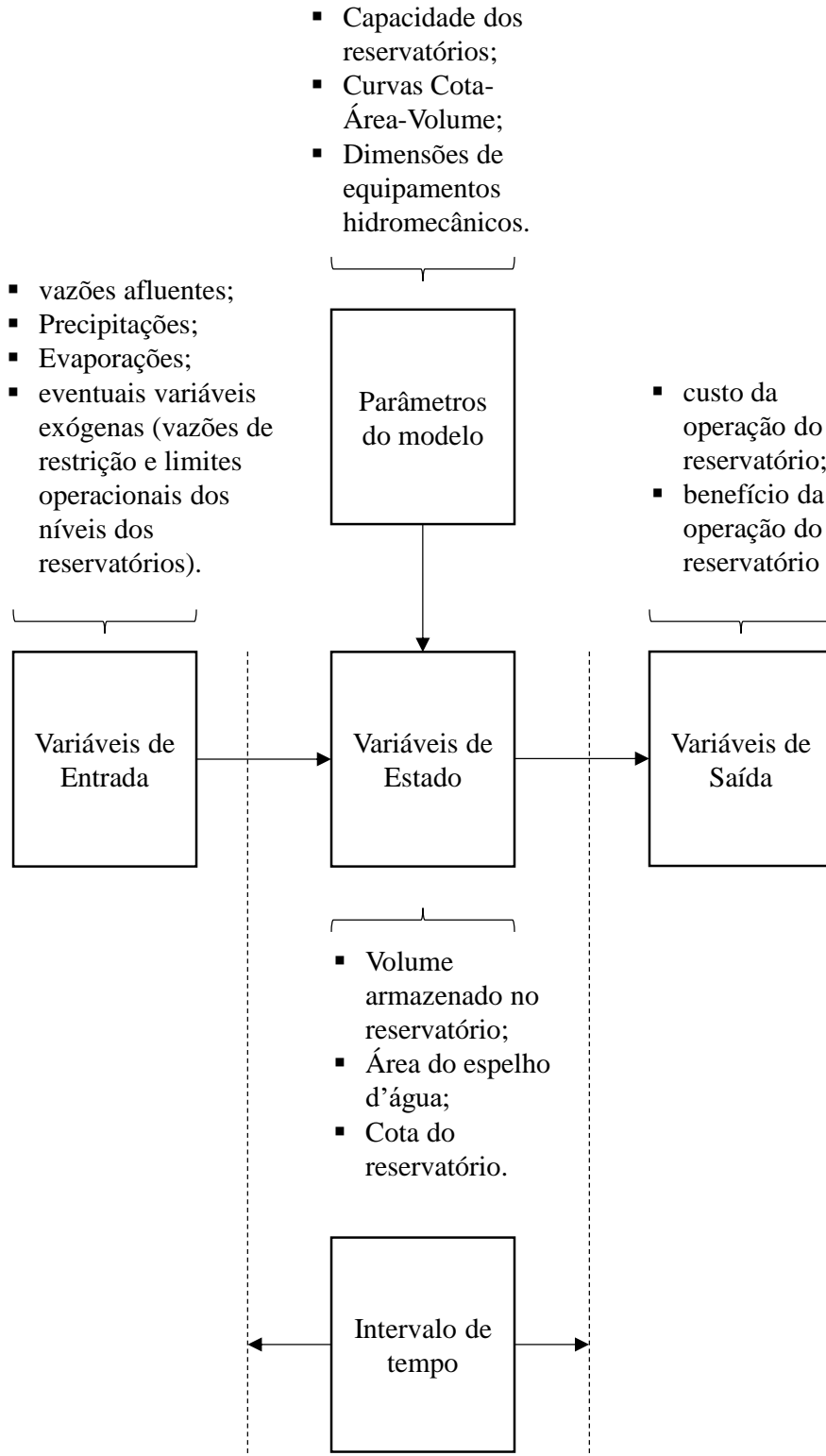
2.4.2 Modelos de simulação

Na busca pela aproximação do comportamento espacial e/ou temporal de um sistema em um computador, utiliza-se a técnica de modelagem chamada simulação. Tal modelagem realiza essa aproximação representando as principais características do sistema por descrições matemáticas ou algébricas (MAASS *et al.*, 1962). Para Wurbs (2005), um modelo de simulação é uma representação de um sistema usado para prever seu comportamento sob um determinado conjunto de condições. Segundo o autor, execuções alternativas de um modelo de simulação de reservatório são feitas para avaliar capacidades alternativas de armazenamento e regras de operação. Modelos de simulação podem ser construídos com ou sem algoritmos de otimização.

Em virtude de sua simplicidade e versatilidade, modelos baseados em simulação têm sido os mais utilizados na avaliação de alternativas de sistemas de recursos hídricos. Como exemplo, a simulação de esvaziamento dos reservatórios monitorados pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará – COGERH, é realizada até os dias atuais pela utilização de um conjunto de planilhas do suplemento SAGREH (Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos Hídricos), desenvolvido por Paulino (1996), com intuito de prever o comportamento de esvaziamento para a definição de cenários para a orientação da negociação da alocação de água no Estado.

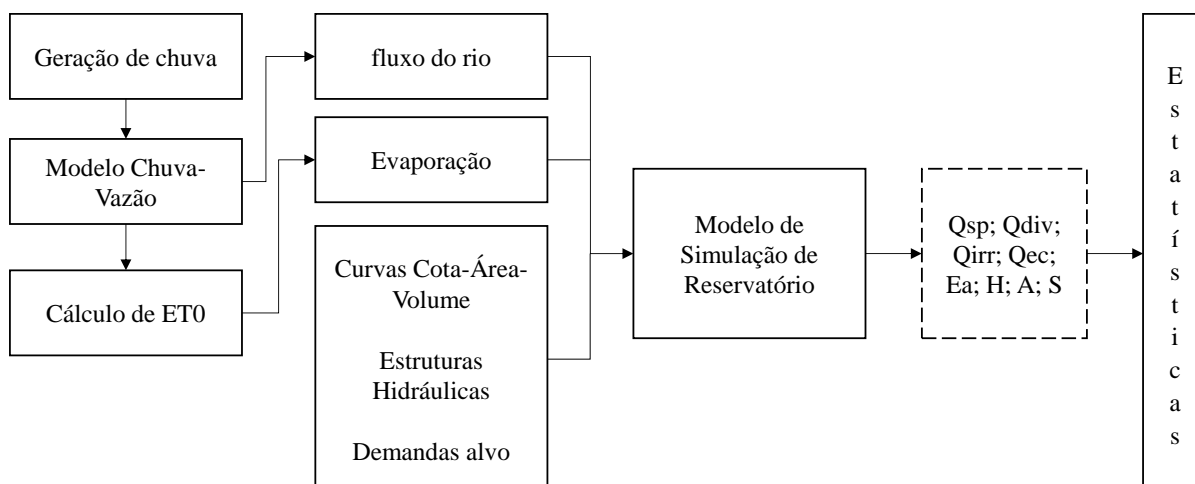
Baseado na descrição de Braga Jr. (1987), a Figura 15 ilustra a estrutura básica de um modelo de simulação aplicado a sistemas hídricos de reservatórios. A estrutura é composta pelas variáveis de entrada, as variáveis de estado, os parâmetros do modelo, as variáveis de saída e o intervalo de tempo adotado. Em sua pesquisa sobre o impacto de um sistema de irrigação proposto a uma bacia hidrográfica no Equador, Tinoco *et al.* (2016) utilizaram a simulação como ferramenta suporte a decisões. A Figura 16 mostra os componentes do modelo utilizado.

Figura 15 – Estrutura básica de um modelo de simulação de sistemas hídricos de reservatórios



Fonte: Autor, a partir de Braga Jr. (1987)

Figura 16 – Componentes do modelo conceitual utilizado em reservatórios da bacia do Rio Macul, Equador.



Fonte: Adaptado de Tinoco *et al.* (2016)

No que tange aos procedimentos utilizados na referida pesquisa, o modelo de simulação de reservatório calculou, por meio da equação da continuidade, as variáveis mostradas na caixa tracejada (volume de armazenamento do reservatório, nível de água e vazão) com base nas entradas mostradas na segunda coluna (fluxo do rio, evaporação, parâmetros morfométricos do reservatório, estruturas hidráulicas e demandas a serem atendidas). No caso em que uma sub-bacia não estava calibrada ou em que os dados observados apresentaram lacunas ausentes, os dados foram gerados pelos modelos auxiliares mostrados na primeira coluna do esquema. Por fim, foram realizadas análises estatísticas dos resultados da simulação do reservatório para suporte à tomada de decisão.

A fim de se verificar os níveis de alerta para o atendimento ou não das demandas de abastecimento humano a partir do reservatório Yuqiao em Tianjin – China, Li *et al.* (2018) utilizaram a simulação de balanço entre oferta e demanda hídrica. A partir das simulações para dois períodos distintos (2003 a 2012 e 2016 a 2020), estimaram-se os níveis médios mensais abaixo dos quais o abastecimento de água não poderia ser garantido. A partir desta análise, os autores obtiveram a informação do nível do reservatório no limite da estação seca, constituindo-se como um indicador de alerta de seca.

2.4.3 Modelos de otimização

Ao se planejar e gerenciar sistemas de recursos hídricos, Maciel (2016) afirma que “o tipo de problema que exige uma resposta à pergunta ‘como escolher a alternativa ótima que maximize um índice de eficiência?’ encontra solução no uso de modelos de otimização”.

A otimização pode ser descrita como uma formulação matemática em que um algoritmo padrão é usado para calcular um conjunto de valores de variáveis de decisão que minimizam ou maximizam uma função objetivo sujeita a restrições. Em outros termos, modelos de otimização pesquisam automaticamente um conjunto ótimo de valores de variáveis de decisão (WURBS, 2005). Nesse processo, tanto a função objetivo quanto as restrições são representadas por expressões matemáticas em função das variáveis de decisão (VIEIRA; CURI, 2016). De uma forma geral, um modelo para a análise de sistemas hídricos pode ser representado matematicamente por (LIMA; LANNA, 2005):

$$MÁX \text{ ou } MÍN F(X) \quad (28)$$

Sujeito a:

$$g_i(X) = b_i, (i = 1, 2, \dots, m) \quad (29)$$

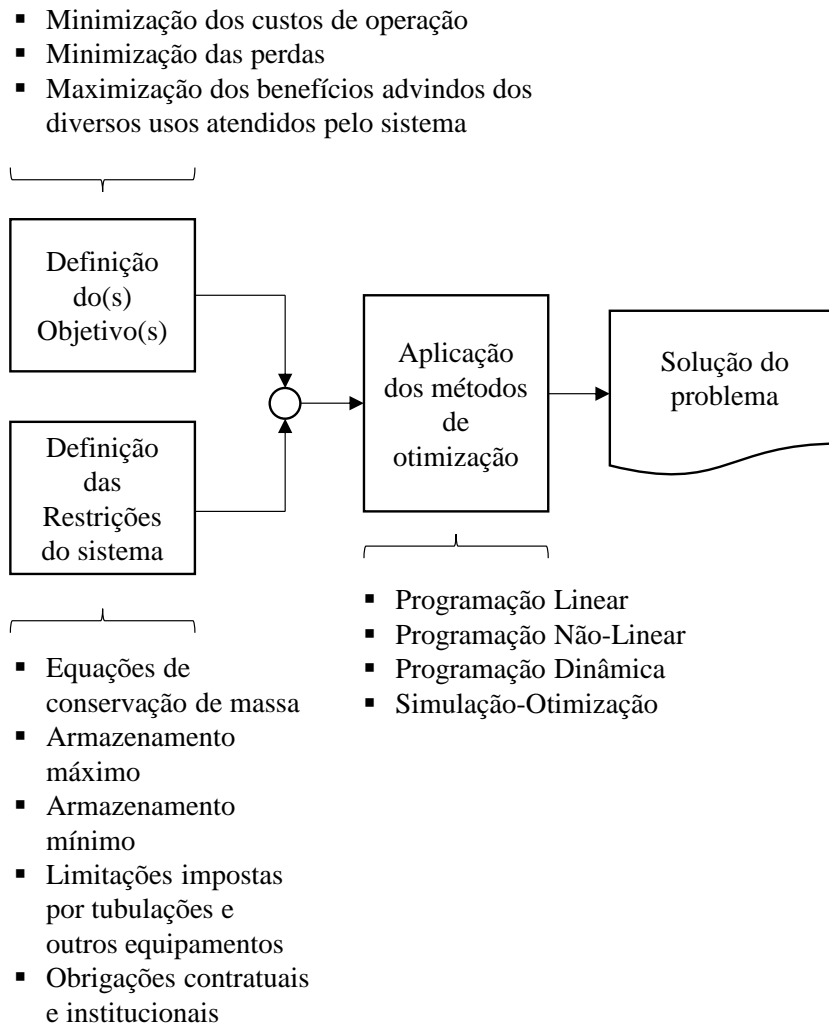
Nas Equações 28 e 29, $F(X)$ é a função objetivo; X é o vetor das variáveis de decisão; e $g_i(X) = b_i$ são equações que representam as restrições na operação do sistema, sendo b_i parâmetros do modelo. Braga Jr. (1987) explica que a ação pioneira de inserir este tipo de abordagem em planejamento e gestão dos recursos hídricos se deve ao “*Harvard Water Program*”, programa iniciado em 1955 por um grupo de professores da Universidade de Harvard a fim de investigar maneiras de melhorar o planejamento e projeto de sistemas de recursos hídricos multipropósitos (REUSS, 2003).

Lima e Lanna (2005) afirmam que a primeira etapa para o estudo de sistemas de reservatórios é a caracterização do problema, que se refere à definição dos objetivos e das restrições do sistema. A solução do problema é, então, a aplicação das diversas técnicas da pesquisa operacional. A Figura 17 ilustra esse procedimento. No que tange às restrições impostas aos problemas, Loucks e van Beek (2017) afirmam que estas podem expressar as condições físicas, regulamentações ambientais e/ou sociais ou de caráter econômico.

Mesmo diante do exposto, é importante destacar a sentença apresentada por Lima e Lanna (2005) assim como por Loucks *et al.* (1981), quando afirmam que por melhor que seja a representação matemática, “esta será uma aproximação do mundo real. A solução ótima obtida pelo método é ótima somente em relação à definição em particular”. Conforme exposto no item 2.4.1 e na Figura 17, os modelos de otimização podem se utilizar dos seguintes métodos: Programação Linear, Programação Não-Linear, Programação Dinâmica e Simulação. Para Loucks e van Beek (2017), a aplicabilidade de cada um deles, bem como outros procedimentos

de otimização restritos é dependente da estrutura matemática do modelo que, por sua vez, depende do sistema que está sendo analisado.

Figura 17 – Diagrama ilustrativo de otimização em sistemas de reservatórios.



Fonte: Autor, a partir de Lima e Lanna (2005)

Se a função objetivo e as restrições de um modelo de otimização são todos lineares, pode-se aplicar a otimização pela Programação Linear (PL). Surpreendentemente muitos problemas de sistemas de recursos hídricos atendem a essas condições de linearidade (LOUCKS; VAN BEEK, 2017). Lima e Lanna (2005) afirmam que “a aplicação de programação linear em recursos hídricos varia desde simples problemas de alocação de recursos até situações complexas de gerenciamento e operação envolvendo milhares de variáveis de decisão e restrições”. Santos (2007), a respeito de recursos computacionais que modelam problemas de PL, informa que “em obras como as de Braga (1987) e Barbosa (2002) são

apresentadas aplicações de PL usando-se de pacotes computacionais específicos para este caso, como o SIMPLEX, o LINDO, o EXCEL, o MINUS e o GAMS”.

Como exemplo de aplicabilidade da programação linear em sistemas hídricos robustos, Rodella (2014) utilizou o método para otimizar a operação de sistemas de distribuição de água na Região Metropolitana de Recife-PE. Tendo como função-objetivo a minimização de custos com energia elétrica e com o tratamento de água, a técnica apontou uma solução ótima que reduziria em mais de dois milhões de reais, os custos anuais de distribuição de água. Como restrições do modelo, figuraram a capacidade máxima de produção mensal dos sistemas, a distribuição mínima por sistema, o volume máximo que cada sistema é capaz de distribuir e, ainda, a restrição de que município(s) cada sistema tem a possibilidade de atender. Com nove sistemas integrados de abastecimento de água avaliados, dez municípios atendidos pelos sistemas integrados e doze meses ao ano, o modelo contou com 276 variáveis de decisão, ratificando a robustez da técnica, conforme anteriormente exposto.

Wurbs (1996) apresenta exemplos de aplicações de Programação Linear em sistemas de reservatórios, dividindo-os em três principais tipos: (1) a realização, a partir de dados de uma série histórica, da análise da maior vazão que pode ser retirada do sistema de forma contínua (Análise da Vazão Firme); (2) o estabelecimento das liberações de um reservatório de forma tal que tenha seus benefícios maximizados e (3) alocação de água, em que o atendimento das demandas se dá pela liberação do mínimo volume de água possível, dentro de uma ordem de prioridades anteriormente estabelecidas. Apesar da possibilidade do uso de técnicas de linearização, em problemas cujas variáveis se relacionam não-linearmente, Labadie (2004), afirma que “muitos problemas de otimização de sistema de reservatório não podem ser modelados de forma realista usando linearização por partes e devem ser atacados diretamente como problemas de programação não-linear”. Grande parte dos problemas envolvendo sistemas hídricos de reservatórios apresentam variáveis que se relacionam de forma não-linear, como nos casos em que se inclui a geração de energia hidrelétrica na função-objetivo e/ou nas restrições, assim como as variáveis que exprimem as relações morfométricas (relações entre cota e área inundada, assim como entre cota e volume armazenado) dos reservatórios (SANTOS, 2007; VIEIRA; CURI, 2016; TURGUT *et al.*, 2019; LABADIE, 2004).

Na Programação Não-Linear (PNL) se torna possível a análise de sistemas de recursos hídricos com funções-objetivo não-separáveis e restrições não-lineares, o que não é possível com outras técnicas de otimização. As técnicas de PNL mais conhecidas são a programação geométrica e a programação quadrática (LIMA; LANNA, 2005). Vieira e Curi (2016) afirmam que a PNL não possui a mesma popularidade que a programação linear, mas que o

desenvolvimento crescente dos recursos computacionais – embora o artifício da linearização ainda seja bastante utilizado – vem facilitando a sua aplicação.

Cirilo (2002), traz exemplos de recursos computacionais que modelam problemas de PNL, a saber, o ADS, da Universidade da Califórnia; o GAMS, da *GAMS Development Corporation*; o LANCELOT, o SOLVER do EXCEL, entre outros. Utilizando este último, Silva e Freitas (2002) lograram êxito na melhoria da eficiência do reservatório Armando Ribeiro Gonçalves (propriedade do DNOCS), localizado no rio Piranhas – Assu, Município de Assu – RN. Os pesquisadores propuseram dois objetivos: a minimização das perdas por evaporação e a maximização do número de meses sem falhas. Este último foi, contudo, apresentado como uma restrição imposta à função objetivo.

Através do modelo, os autores obtiveram resultados relevantes, para um reservatório do semiárido nordestino, tais como a informação do período mais adequado para se iniciar as restrições de atendimento às demandas e a indicação de uma sequência de vazões de descarga a serem operadas. Em sua abordagem, os autores salientaram que “em se tratando de operação de reservatórios, a economia de água em situações de escassez pode resultar em ineficiência na utilização dos recursos hídricos”. A justificativa se dá pela perda evaporativa da água estocada no reservatório. A programação dinâmica (PD) tem sido, ao lado da programação linear, a técnica de otimização mais popular aplicada ao planejamento e gestão de recursos hídricos, em geral, e a operações de reservatório, em particular (YAKOWITZ, 1982). Esse tipo de programação se trata de uma abordagem que divide o problema de otimização original, com todas as suas variáveis, em um conjunto de problemas de otimização menores, cada um dos quais precisa ser resolvido antes que a solução ótima geral para o problema original possa ser identificada. Esse tipo de programação, portanto, realiza a otimização em vários estágios (LOUCKS; VAN BEEK, 2017; YEH, 1985).

A PD é aplicável e usada extensivamente na otimização de sistemas de recursos hídricos, uma vez que problemas de planejamento e operação de reservatórios podem ser representados em estágios sequenciais (YEH, 1985). Vieira e Curi (2016) destacam que os estágios sequenciais utilizados na programação dinâmica não se referem, necessariamente, um intervalo de tempo, mas podem representar atividades, localidades etc., sendo melhor entendido como ponto do processo no qual uma decisão deve ser feita.

No que tange à aplicabilidade das diversas técnicas de otimização, Loucks e van Beek (2017) afirmam que vale a pena estar familiarizado com vários tipos de métodos, uma vez que nenhum método é o melhor para todos os problemas de otimização. Segundo os autores, cada um tem seus pontos fortes e limitações. O Quadro 3, trata-se de um quadro comparativo entre

os modelos de PL, PNL e PD, trazendo uma compilação das suas principais vantagens e desvantagens, apresentadas pelos principais autores utilizados nesta revisão bibliográfica.

No desenvolvimento de modelos para sistemas de recursos hídricos, a combinação de técnicas de simulação e otimização vem sendo difundida em programas computacionais. Essa integração ganhou força devido às grandes vantagens que podem ser extraídas desta junção (VIEIRA; CURI, 2016). Lima e Lanna (2005, p. 17) descrevem bem a necessidade dessa integração ao afirmar que:

Os modelos de simulação têm se mostrado extremamente útil no planejamento e na operação de sistemas de reservatórios. Alguns autores enfatizam, entretanto, que todos eles têm como grande desvantagem o fato de que o próprio analista tem que definir os designs e as políticas de operação que devem ser estudadas. Sistemas mais complexos apresentarão um número grande de alternativas possíveis, dificultando a aplicação de modelos de simulação. Na busca da solução de tais problemas, a tendência nos últimos anos têm sido a de incorporar esquemas de otimização em modelos de simulação, obtendo um certo grau de otimização.

Dado o exposto, se verifica que a integração simulação-otimização preserva a vantagem da simplicidade da simulação e minimiza, por meio da otimização, a sua desvantagem da definição manual de políticas de operação. Ainda segundo Lima e Lanna (2005, p. 17-18), duas são as formas com que se tem realizado o uso conjunto dos modelos:

- a) “Na primeira, os modelos de simulação [...] delimitam espaços de soluções possíveis, que serão pesquisados de maneira mais precisa pelos modelos de otimização para localizar o ponto de solução ótima”;
- b) “Na segunda, os modelos de otimização são utilizados [...] na determinação de regras de operação, [...] que serão em seguida processadas nos modelos de simulação em sistemas sem simplificações”.

Quadro 3 – Compilação das principais vantagens e desvantagens entre os modelos de Programação Linear, Programação Não Linear e Programação Dinâmica.

Modelo	Autor	Vantagens	Desvantagens
Programação Linear	Vieira e Curi (2016)	Flexibilidade de sua adaptação a uma grande variedade de problemas; maior facilidade de entendimento; capacidade de enquadrar problemas de grande porte e disponibilidade de pacotes computacionais para pronta utilização, em nível comercial.	Exigência de linearidade das funções
	Lima e Lanna (2005)	Habilidade para se ajustar facilmente a problemas multidimensionais; garantia de obtenção de valores ótimos globais; não necessidade de uma política inicial de operação dos reservatórios; existência de pacotes computacionais prontos para a resolução de problemas de programação linear.	Hipótese de linearidade nas relações, particularmente na função-objetivo; otimização em um único estágio (representação estática), enquanto o sistema é dinâmico (variável no tempo).
	Braga, Barbosa e Nakayama (1998)	Varia desde problemas relativamente simples de alocação direta de recursos até situações complexas de gerenciamento e operação de reservatórios; sob certas hipóteses, pode ser utilizado para resolução de problemas não-lineares, por iteração ou procedimentos de aproximação.	--
Programação Não-Linear	Vieira e Curi (2016)	--	Requer maior tempo de processamento, quando comparado à programação linear; apresenta o problema de garantia de que a solução encontrada não seja a ótima global.
	Lima e Lanna (2005)	Possibilita uma formulação matemática mais genérica, permitindo a análise de sistemas de recursos hídricos com funções-objetivo não-separáveis e restrições não-lineares;	Resoluções computacionais são lentas e exigem uma grande capacidade de armazenamento de dados; não apresenta a facilidade de incorporação da natureza estocástica das variáveis hidrológicas.

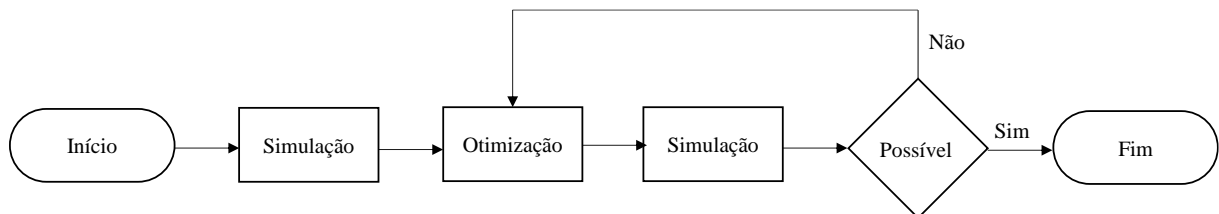
Quadro 3 – Continuação...

Modelo	Autor	Vantagens	Desvantagens
Programação Dinâmica	Braga, Barbosa e Nakayama (1998)	Naturezas estocásticas e não-lineares, que caracterizam um grande número de sistema de recursos hídricos, podem ser traduzidas na formulação da PD; permite decompor problemas altamente complexos, com grande número de variáveis, em série de subproblemas.	Não existe uma formulação matemática padrão, sendo necessário desenvolver as equações que se ajustem a cada situação específica; quando aplicada a um sistema de reservatórios múltiplos, sua utilidade é limitada pela chamada “praga da dimensionalidade”, que é a necessidade de capacidade de memórias de computador.
	Vieira e Curi (2016)	--	Na busca do ótimo em cada estágio, exige enormes requerimentos de memória e de tempo de processamento.
	Labadie (1987) <i>apud</i> Lima e Lanna (2005)	A possibilidade de otimização de processos dinâmicos; A possibilidade de ter relações funcionais, tanto da função objetivo como das restrições, extremamente não-lineares, não convexas e até descontínuas (permitindo representar o comportamento real do sistema, sem necessidade de aproximações (linearizações)); produz normas de decisão retroalimentadas (permitindo tomadas de decisão em qualquer etapa do sistema).	--
	Yeh (1985)	Relativa facilidade de serem incluídas nos modelos características não-lineares e estocásticas, tão comuns em sistemas de recursos hídricos.	--

Fonte: Autor, a partir de Yeh (1985), Vieira e Curi (2016), Lima e Lanna (2005), Braga, Barbosa e Nakayama (1998).

Um esquema de possibilidade de integração entre as duas modalidades de modelos, dentre diversas outras possibilidades de combinação, é apresentado na Figura 18.

Figura 18 – Esquema representativo de modelo sequencial de simulação-otimização.



Fonte: Lima e Lanna (2005)

2.4.4 Aplicações de regras de operação

Embora Vieira *et al.* (2010) façam uma distinção didática entre as regras, conforme apresentada no Quadro 2 (item 2.4.1), Bravo *et al.* (2006) expressam a inter-relação entre tais regras ao afirmar que a distribuição do volume útil do reservatório em zonas (regra do zoneamento) pode ser constante ao longo do ano ou pode variar de forma sazonal e que essas regras de operação são chamadas de curvas-guia (regra das curvas-guia) e usadas para indicar volumes, ou níveis de água, alvos ou ideais do reservatório (regra do volume meta) visando determinados objetivos.

Uma abordagem integrada entre as regras das curvas-guia e do zoneamento foi utilizada por Gomes e Medeiros (2019). Com essa integração, os autores discretizaram a curva-guia de operação do reservatório Cruzeta localizado na porção potiguar da bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, permitindo a simulação de racionamento em etapas discretas. Essa abordagem busca a resolução da problemática da curva-guia como uma função contínua, que obrigaria os operadores a adotarem diferentes tipos de racionamentos contínuos, o que torna a operação mais complexa, na prática.

Para avaliar o impacto de um sistema de irrigação proposto a uma bacia hidrográfica no Equador, Tinoco *et al.* (2016) utilizaram a regra de operação do zoneamento múltiplo em suas simulações. A Figura 19 mostra a ilustração das zonas consideradas no estudo.

Figura 19 – Regras operacionais e alocação de água do reservatório.

	Q_{sp}	$Q_{divA,B}$	Q_{irr}	Q_{ec}	$\uparrow E$
Zone1 if $H_i \geq H_{crest}$	$Q_{sp}(S(H_i))$	$Q_{divA,B}(H_i - H_{bdiv})$	Q_{irrTg}	Q_{ec}	H_{crest}
Zone2 if $H_{bdiv} \leq H_i \leq H_{crest}$	0	$Q_{divA,B}(H_i - H_{bdiv})$	Q_{irrTg}	Q_{ec}	H_{bdiv}
Zone3 if $H_{irr} \leq H_i \leq H_{bdiv}$	0	0	Q_{irrTg}	Q_{ec}	$H_{irr/ec}$
Zone4 if $H_{bo} \leq H_i \leq H_{irr/ec}$	0	0	0	$\min(Q_{ec})$	H_{bo}
Zone5 if $0 \leq H_i \leq H_{bo}$	0	0	0	0	

Fonte: Tinoco *et al.* (2016)

Nesta regra de operação, as descargas do reservatório dependem do nível de água do reservatório, para o qual são definidas zonas (com base nas estruturas de escoamento do reservatório). No referido estudo, foram definidas cinco zonas: a zona 1, acima da cota do vertedouro (H_{crest}); a zona 2, entre H_{crest} e a cota acima de um canal de desvio para outro reservatório (H_{bdiv}); a zona 3, que corresponde ao volume de armazenamento de irrigação, abaixo do qual a irrigação é restrita a fim de minimizar os impactos ecológicos a jusante das barragens; a zona 4, que corresponde ao volume destinado, exclusivamente, à descarga ambiental (vazão ecológica) e; zona 5, que corresponde à zona inativa, que é atribuída para a acumulação de sedimentos.

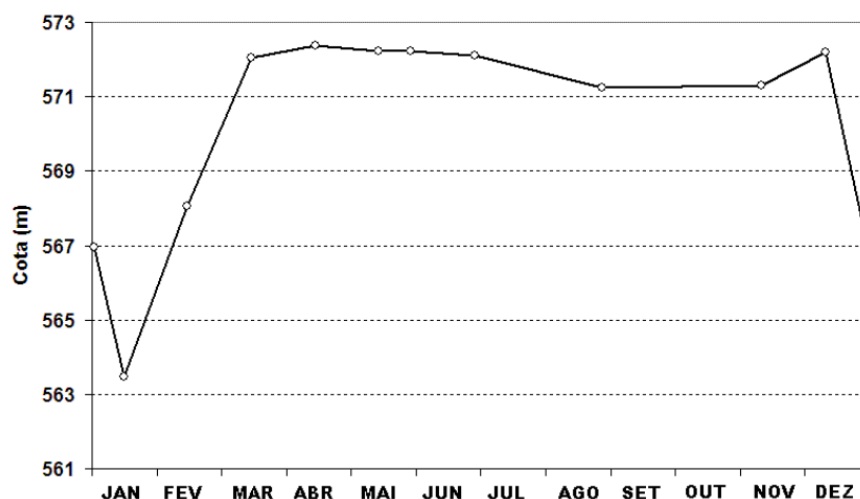
Araújo, Mamede e Lima (2018) desenvolveram uma metodologia para definição de volumes de alerta em reservatórios do semiárido (regra do zoneamento) utilizando uma abordagem estocástica. O método considera confiabilidade e duração de esgotamento do reservatório, estabelecendo a correlação entre os usos da água com seus respectivos volumes de alerta de reservatório, de modo análogo ao conceito apresentado na Figura 19. Aplicando o método aos quatro dos maiores reservatórios do estado do Ceará ($2 \cdot 10^2$ a $2 \cdot 10^3$ hm³), os resultados indicaram que, para os reservatórios estudados, os usos de baixa prioridade devem ser racionalizados quando o volume estiver abaixo de 20%, enquanto os usos com prioridade muito alta devem iniciar a racionalização quando o estoque de água do reservatório estiver abaixo de 11% da capacidade máxima.

Cardoso, Martins e Souza Filho (2006, grifo nosso) utilizaram a regra dos *níveis meta* para buscar a melhor operação possível dos reservatórios do sistema hídrico Jaguaribe-Metropolitano. Os autores incorporaram à previsão de afluências, índices climáticos tais como o *El Niño* e Dipolo do Atlântico, objetivando assim, estabelecer níveis meta para operação dos reservatórios do sistema com base na climatologia (série histórica) e na informação climática (previsão).

Nunes (2015, grifo nosso), ao estudar o Açude Epitácio Pessoa, no estado da Paraíba, aplicando a regra das *curvas-guia*, verificou ser possível usar a água que sairia pelo vertedouro ou seria perdida por evaporação, em períodos de aflúências mais significativas, elevando com isso, a vazão outorgável, sazonalmente. Em sua pesquisa, a autora concluiu que “a ferramenta curva-guia, de extrema simplicidade conceitual e operacional, mostrou-se apropriada para ser utilizada na operação de reservatórios com esta finalidade, apresentando resultados satisfatórios e consistentes”. No estudo, se verificou ser possível adiar o racionamento do uso de água em até seis meses.

Bravo *et al.* (2008, grifo nosso), também utilizaram a regra de operação baseada em *curvas-guia* para o reservatório Três Marias, no Rio São Francisco, em Minas Gerais. O reservatório, além de possuir a função de gerar energia elétrica, ainda deve ser operado de forma a evitar vazões maiores que o limite que provoca inundações na cidade de Pirapora, localizada a jusante. Os resultados de sua pesquisa mostraram que a definição de regras de operação baseadas em *curvas-guia* parametrizadas e na combinação de modelos de otimização e simulação é uma alternativa viável para este tipo de problema. A Figura 20 mostra um exemplo de curva-guia obtida por otimização. No gráfico, é possível observar que nos meses iniciais do ano, onde são esperadas vazões afluentes significativas ao reservatório, é prudente operá-lo de forma a manter seu nível em cotas mais baixas, a fim de se manter a disponibilidade de um suficiente volume de espera destas vazões.

Figura 20 – Curva-guia otimizada para o reservatório Três Marias.



Fonte: Bravo *et al.* (2008)

Englobando os conceitos de modelos (simulação, otimização), métodos (PL, PNL, PD) e regras operativas (volume meta, zoneamento, *curvas-guia*), foi desenvolvido, sob a

coordenação da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) e com a colaboração da Universidade Federal do Ceará (UFC), o software SIGA (Sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água). Segundo Ceará (2018, p.10),

o SIGA é uma plataforma computacional que reúne modelos e ferramentas para apoio ao planejamento e à tomada de decisão na área de recursos hídricos. Composto por módulos integrados e concebido com base na programação orientada objeto, o SIGA apresenta versatilidade em suas aplicações a partir de interfaces de fácil aprendizado e uso e adaptações para perfis diferenciados de usuários.

No controle operacional do sistema de abastecimento do reservatório Descoberto, Pereira e Cavalcanti (2016) avaliaram a capacidade do modelo em responder ao tomador de decisão quais são as perspectivas do sistema em abastecer confortavelmente as demandas de abastecimento do Distrito Federal e sua aplicabilidade na geração de cenários considerando o crescimento populacional, aporte de novas regiões de abastecimento, como os municípios do entorno do DF, e a inserção de novos mananciais. Os pesquisadores concluíram que o SIGA demonstrou solidez nos resultados, tendo em vista que o comportamento do reservatório observado, apresentando-se sempre perto do volume meta com poucos períodos de estiagem.

No estudo sobre o impacto do reuso de águas na alocação hídrica dos reservatórios estratégicos da bacia do Acaraú, Ceará, Gondim (2018) utilizou o SIGA como ferramenta de simulação operacional dos reservatórios e de alocação de água. No estudo a predição de volumes pelo SIGA foi considerada satisfatória, apresentando o coeficiente Nash-Sutcliffe (NSE) variando de 0,29 a 0,98 para oito reservatórios dos dez analisados.

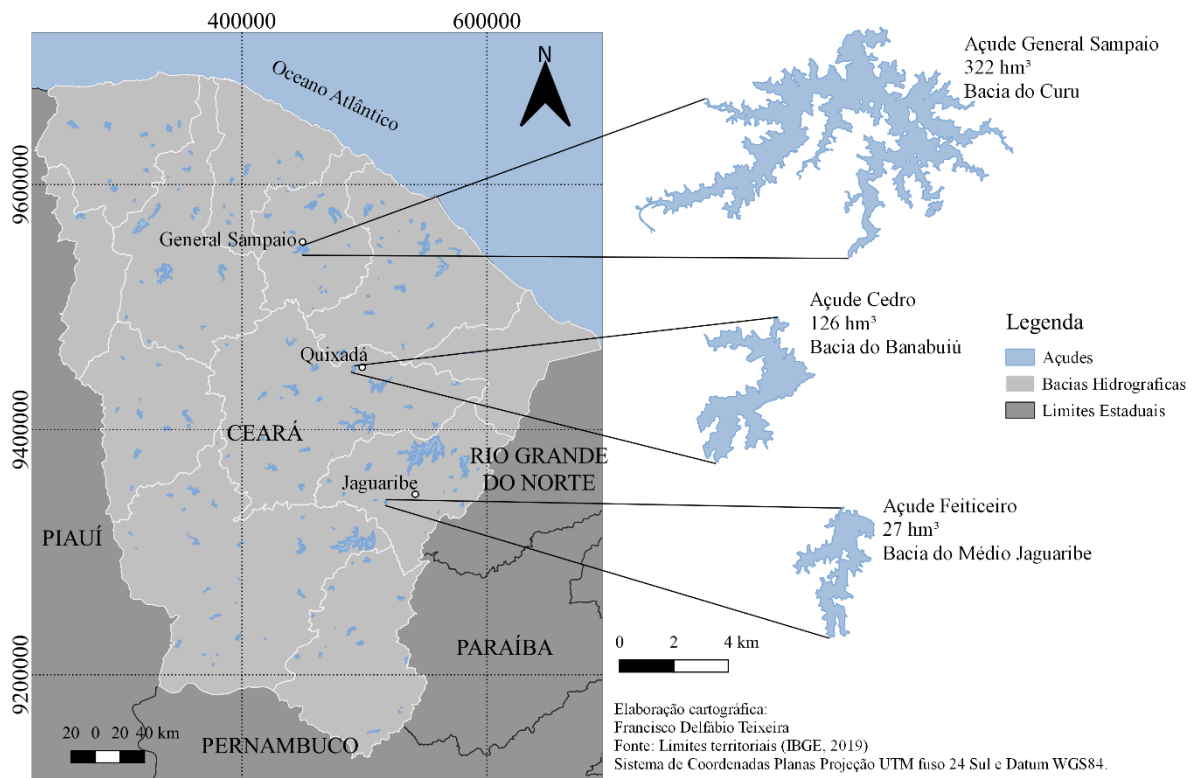
3 METODOLOGIA

Neste capítulo, inicialmente, descreve-se a área utilizada para a validação do modelo hidrológico, composta pelas bacias dos açudes Cedro, Joaquim Távora e General Sampaio. Uma vez que essas áreas dispõem de dados hidrológicos que permitam a verificação da aplicação do modelo hidrológico proposto (modelo AguiarVM), as referidas bacias foram tomadas com este propósito. Em seguida, o modelo hidrológico é detalhado, com seus conceitos, estrutura e programação. Posteriormente, a área de aplicação do modelo de operação é descrita, a bacia do açude Marengo, em Madalena-CE. Em quarto lugar, são descritas as etapas do modelo de operação proposto.

3.1 Área de validação do modelo hidrológico

A fim de se verificar a aplicabilidade do modelo a reservatórios de distintas regiões e de diferentes volumes acumuláveis, o modelo AguiarVM foi aplicado a três reservatórios cearenses: General Sampaio, Cedro e Joaquim Távora (também conhecido como açude Feiticeiro) (Figura 21).

Figura 21 – Localização dos reservatórios utilizados para calibração e validação do modelo AguiarVM



Fonte: Autor

Os dados de precipitação são os dos postos pluviométricos de códigos 439009 (Açude General Sampaio), 439020 (Açude Cedro) e 538055 (Feiticeiro). O preenchimento de falhas mensal foi realizado com o valor da média histórica do respectivo mês, isto é, para o preenchimento de falha de um determinado mês utilizou-se o valor da normal pluviométrica daquele mês. Para a calibração do modelo, foram utilizados valores de vazões provenientes do monitoramento da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH, disponíveis no “Relatório de Avaliação da Segurança Hídrica: Aspectos Quantitativos” (CEARÁ, 2016).

Para o açude General Sampaio, foram simuladas as vazões escoadas entre 1921 e 2012. O período de 1921 a 1950 foi utilizado para a calibração do modelo e para a sua validação, os anos de 1951 a 2012. O açude Cedro teve como período de calibração os anos de 1912 a 1953 e de 1954 a 2012 para validação. O açude Joaquim Távora, por sua vez, teve como períodos de calibração e validação, os anos de 1983 a 2003 e de 2004 a 2009, respectivamente. Para a calibração do parâmetro de ajuste mensal (Ω), utilizou-se, como função objetivo, a maximização do coeficiente de eficiência NSE proposto por Nash e Sutcliffe (1970), conforme a Equação 30.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_j (Y_{med}^j - Y_{sim}^j)^2}{\sum_j (Y_{med}^j - \bar{Y}_{med})^2} \quad (30)$$

Na equação 30, Y_{med} refere-se ao valor medido da variável no tempo j , Y_{sim} trata-se do valor simulado da variável no tempo j e \bar{Y}_{med} é a média dos valores medidos. Valores de NSE inferiores a zero, implicam em uma capacidade de previsão do modelo inferior ao valor médio medido e quanto maior é o coeficiente, tanto melhor é o desempenho do modelo. O limite máximo para o coeficiente é a unidade ($NSE \leq 1$), o que implica em uma representatividade exata do modelo em relação às medições realizadas.

3.2 O modelo hidrológico AguiarVM

Para se caracterizar o regime hidrológico de um sistema hídrico com elevada variabilidade, como ocorre no Semiárido do Brasil, é necessária uma série de dados extensa. Considerando-se a pouca disponibilidade de séries longas de dados de vazão para a realização desta tarefa nos sistemas hídricos não-monitorados no semiárido, a modelagem hidrológica constitui-se em uma importante ferramenta para a obtenção de uma série sintética. O modelo aplicado neste trabalho foi o modelo chuva-vazão AguiarVM, desenvolvido no âmbito desta pesquisa, tendo como base, o método do Engenheiro Francisco Aguiar, descrito no Item 2.2.3 (Modelos Chuva-Vazão). Na terminologia “AguiarVM”, a sigla VM refere-se à “Versão Mensal” do método de Aguiar.

Conforme exposto no item 2.2.3 (Modelos Chuva-Vazão), o modelo desenvolvido por Aguiar apresenta como saída o volume anual escoado na bacia hidrográfica. No entanto, para propósitos de simulação/otimização no contexto da alocação negociada de água, a apresentação mensal do volume escoado é de fundamental importância. Nesse contexto, a proposição de um modelo hidrológico de passo de tempo mensal justifica-se, principalmente, pelos seguintes aspectos:

- a) um modelo de passo de tempo sub-diário ou diário apresenta muitas incertezas, em virtude de se buscar a representação de uma grande quantidade de processos físicos, tais como a abstração inicial da água precipitada e o aporte proveniente do fluxo de base da bacia. No passo de tempo mensal, tais incertezas são compensadas dentro do período simulado, ou seja, *inputs* e *outputs* de naturezas diferentes, mas de magnitudes semelhantes do sistema se contrabalançam antes de um novo cálculo mensal de volume;
- b) a prática da alocação negociada de água no semiárido se dá em horizonte temporal semestral (segundo semestre de cada ano), com acompanhamento mensal, conforme explicitado no item 2.1.2 (Alocação negociada de água, Figuras 4 e 6);
- c) um modelo de passo de tempo sazonal ou anual não permite a realização de simulações com vistas ao acompanhamento mensal da operação de sistemas hídricos.

A fim de se expressar o volume anual escoado, proveniente do método de Aguiar, em volume mensal escoado, se propõe uma metodologia de desagregação, que consiste no Modelo AguiarVM. Tal metodologia é proposta, em detrimento do uso do Método da Proporção da Vazão Média Anual (MPVMA) (item 2.2.4), em virtude da pouca disponibilidade de dados de vazões (ainda que mensais) na área de estudo. O modelo é exposto a seguir:

- a) A partir dos dados de chuva mensais observados, obtém-se a lâmina anual precipitada, em cada ano a ser simulado;
- b) Aplica-se o modelo de Aguiar, anualmente, obtendo-se, para cada ano, o seu respectivo valor de V_a (Volume anual escoado);
- c) Para cada ano, calcula-se o fator de proporcionalidade anual $\alpha_i = V_{a_i} / H_i$, onde V_a é o volume anual escoado, em m^3 , H é a lâmina anual precipitada, em m, e o índice i se refere ao ano em questão;
- d) De posse dos dados de chuva mensal em uma série de anos, obtém-se a estimativa do volume mensal escoado pela Equação 31:

$$Q_{i,j} = \alpha_i H_{i,j}^\Omega \quad (31)$$

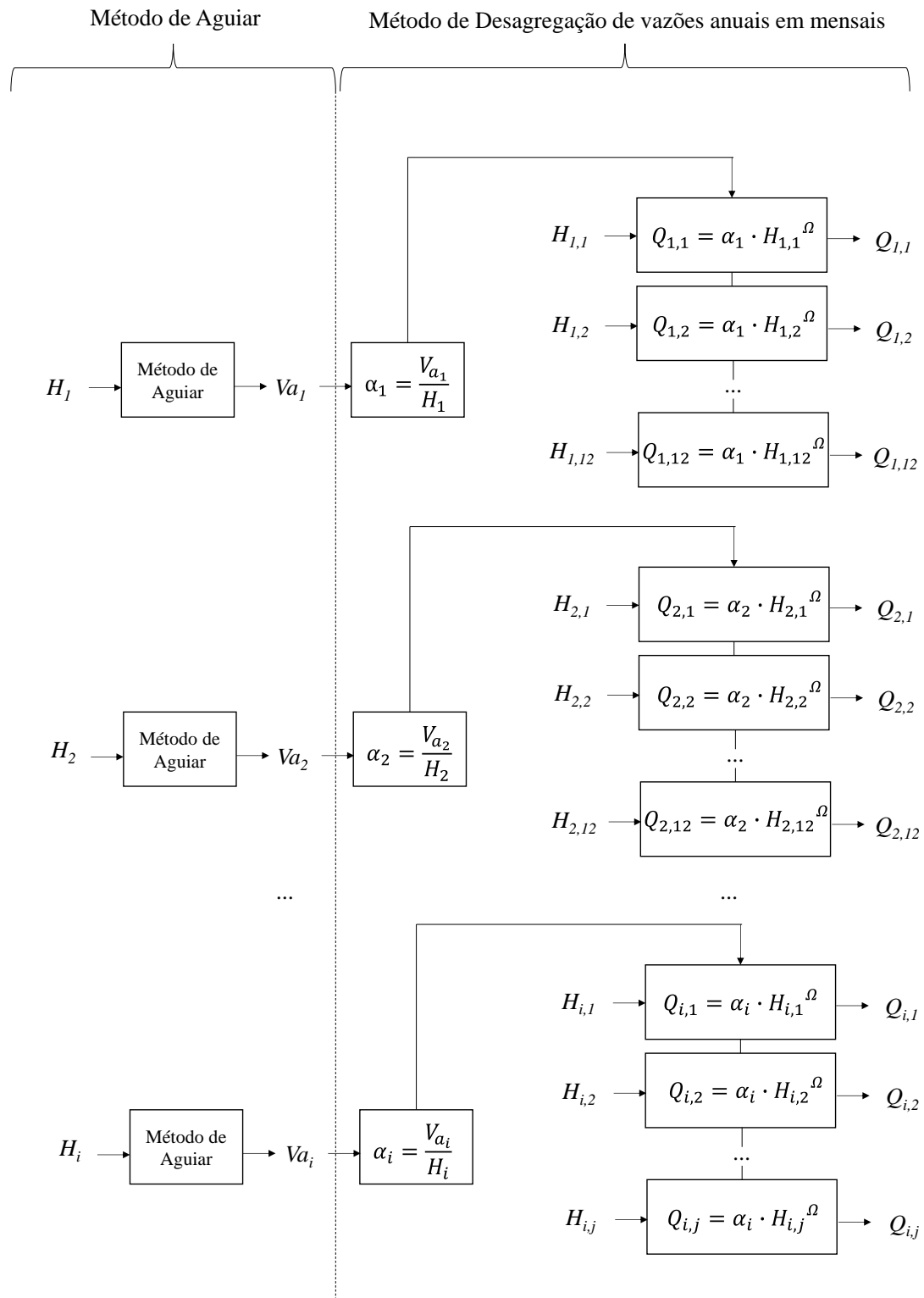
Na equação, $Q_{i,j}$ significa a vazão escoada no ano i e mês j , em $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$; $H_{i,j}$ se refere à lâmina de precipitação no ano i e mês j , em m; α_i é o parâmetro de ajuste anual, dado pela razão Va_i / H_i , e Ω é o parâmetro de ajuste mensal. Teoricamente, o parâmetro α pode ser considerado como a área de uma bacia hidrográfica fictícia totalmente impermeável. Em termos práticos, contudo, este parâmetro refere-se à proporcionalidade entre o valor do deflúvio anual, obtido pelo método de Aguiar, e o valor da lâmina anual que o gerou. O parâmetro calibrável Ω , por sua vez, dado que deve ser calibrado para cada bacia modelada, possui função análoga a do coeficiente de Ryves (U), do modelo original de Aguiar. Neste parâmetro, portanto, estão embutidos fatores geomorfológicos inerentes a cada bacia hidrográfica.

O somatório das vazões mensais calculadas pelo modelo AguiarVM (Equação 31) não é, necessariamente, igual ao valor da vazão anual calculada pelo método clássico de Aguiar (Equações 2 a 4). A relação entre os dois valores (soma das vazões mensais por AguiarVM e vazão anual pelo método clássico) depende fundamentalmente do parâmetro calibrável Ω :

- Para $\Omega < 1$: a soma das vazões mensais (AguiarVM) $>$ vazão anual (Aguiar);
- Para $\Omega = 1$: a soma das vazões mensais (AguiarVM) = vazão anual (Aguiar); e
- Para $\Omega > 1$: a soma das vazões mensais (AguiarVM) $<$ vazão anual (Aguiar).

No modelo AguiarVM a desagregação do volume anual não leva em consideração aspectos como a umidade antecedente do solo e distribuição temporal real da chuva. A desagregação dá versatilidade ao método original de Aguiar, conferindo ao mesmo uma versão mensal, até então inexistente. O fluxograma metodológico do modelo AguiarVM está exposto na Figura 22.

O Apêndice A traz a transcrição do código do programa computacional desenvolvido na linguagem FORTRAN para execução do modelo AguiarVM. Para a simulação do modelo, deve-se providenciar dois arquivos de entrada, um com dados de entradas anuais de precipitação e parâmetros do modelo original de Aguiar, e outro com dados mensais de precipitação e o valor do fator de ajuste mensal Ω . Os Apêndices B e C trazem exemplos do conteúdo de arquivos de entrada anual e mensal, respectivamente. Após a execução do programa, dois arquivos de saída são gerados, um, de visualização opcional, que traz os resultados do modelo de Aguiar e outro, com os resultados de vazões escoadas mensais ($Q_{i,j}$) em $\text{m}^3 \cdot \text{mês}^{-1}$ e em $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Os Apêndices D e E trazem exemplos do conteúdo de arquivos de saídas anuais e mensais, respectivamente.

Figura 22 – Fluxograma do modelo AguiarVM¹

¹ H_i (H_1, H_2, \dots) representa a chuva total de um determinado ano i ; Va_i (Va_1, Va_2, \dots) refere-se ao volume escoado em um determinado ano i ; α_i ($\alpha_1, \alpha_2, \dots$) é o fator de ajuste anual de um determinado ano i ; $H_{i,j}$ ($H_{1,1}, H_{1,2}, H_{2,1}, H_{2,2}, \dots$) representa a chuva ocorrida em um determinado ano i e mês j ; $Q_{i,j}$ ($Q_{1,1}, Q_{1,2}, Q_{2,1}, Q_{2,2}, \dots$) refere-se à vazão escoada em um determinado ano i e mês j ; Ω , por sua vez é o fator de ajuste mensal do modelo.

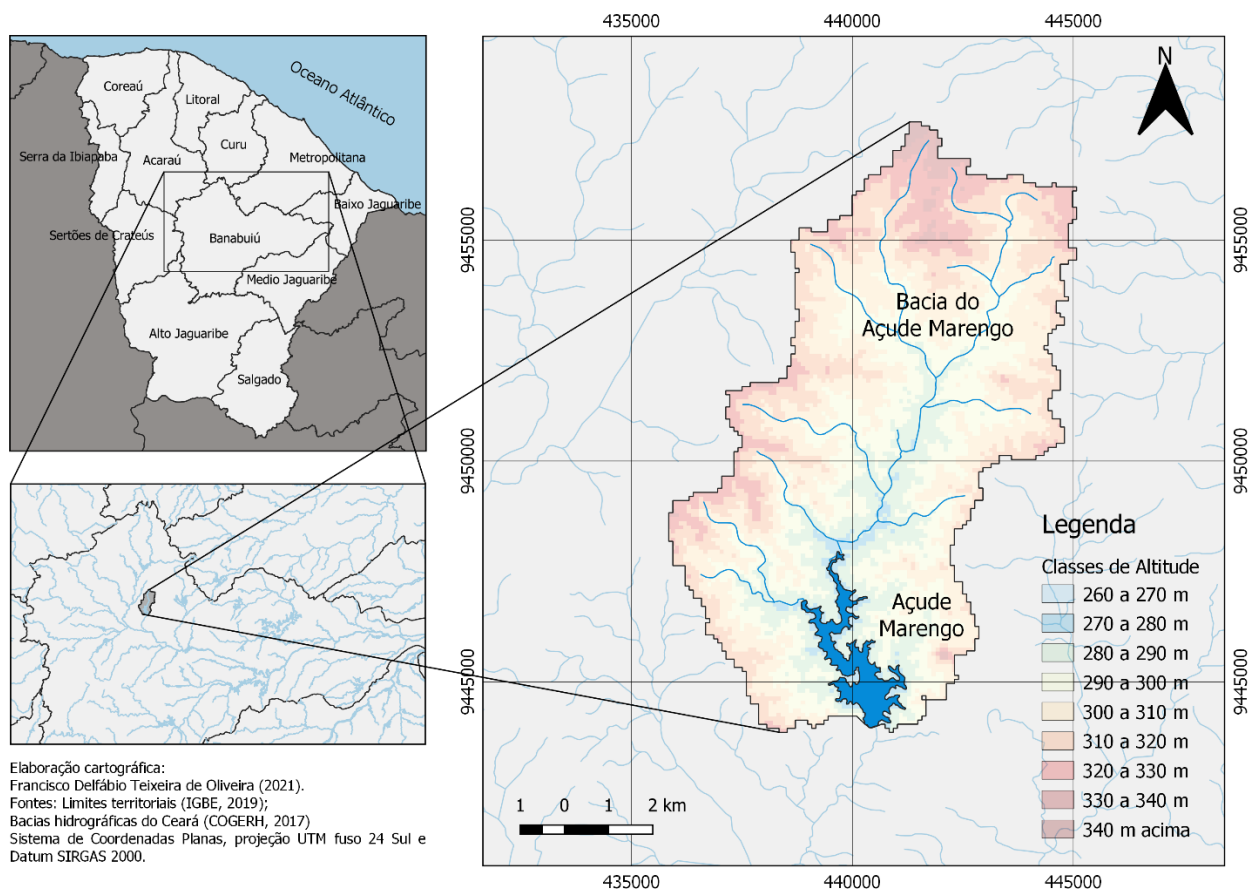
Opcionalmente, para a simulação do modelo AguiarVM, pode ser utilizada planilha eletrônica disponível para download a partir do endereço eletrônico: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oRaPn1INJttRab31w1on4XOC4jYUI0G0/edit?usp=sharing&ouid=110737246891313013366&rtpof=true&sd=true>.

No contexto do modelo de operação proposto neste trabalho, a série sintética de vazões mensais obtida pela execução do Modelo AguiarVM constitui-se na série de vazões mensais afluentes (Q_{afllu}) da etapa de simulação do balanço hídrico do reservatório.

3.3 Área de aplicação do modelo de operação

O reservatório alvo da pesquisa foi o açude Marengo, pertencente à sub-bacia hidrográfica do Rio Banabuiú, Ceará (Figuras 23, 24 e 25). Trata-se de uma região de clima semiárido com escassez de água na estação seca, que ocorre entre julho e dezembro, e alta variabilidade de precipitação interanual. A precipitação média total da região é de aproximadamente $600 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, a evaporação potencial é de cerca de $2500 \text{ mm}\cdot\text{ano}^{-1}$, e as temperaturas mensais variam de 26°C a 28°C (COELHO *et al.*, 2017).

Figura 23 – Localização do reservatório Marengo



Fonte: Autor

Figura 24 – Aspecto da bacia hidráulica e talude de montante do açude Marengo – Madalena, CE, no final do período de seca pluri-anual.



Fonte: Ceará (2017)

Figura 25 – Aspecto do vertedouro do açude Marengo – Madalena, CE.

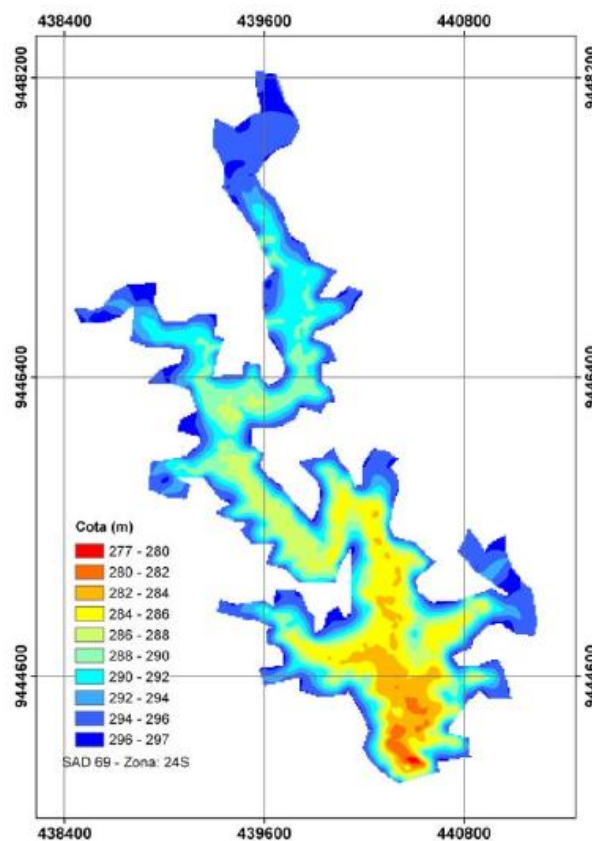


Fonte: Ceará (2017)

A bacia hidrográfica do reservatório Marengo possui uma área de 75 km² e está inserida totalmente no Assentamento 25 de Maio, que foi criado em 1989 pelo INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). A área ocupada pelo assentamento é de aproximadamente 230 km², sendo habitada por 586 famílias, organizadas em treze comunidades. Dispõe de onze pequenos açudes (capacidades entre 60 mil e 5 milhões de m³) e um açude de porte médio, o Marengo (LOPES, 2016).

Entre as décadas de 1930 e de 1980, treze reservatórios foram construídos nesta bacia hidrográfica. Esses reservatórios sustentam os habitantes locais fornecendo água para consumo doméstico, pecuária e irrigação (ZHANG, 2016). Entre os reservatórios do assentamento está o açude Marengo, construído em 1934, ampliado em 1956 pelo DNOCS (Departamento Nacional de Obras Contra as Secas) e reformado em 2009 pela Superintendência de Obras Hidráulicas (SOHIDRA). A barragem represa o rio Ipueiras, rio efêmero que constitui um dos trechos do subsistema do Rio Banabuiú. A área superficial inundada pelo reservatório é de 285 hectares e sua capacidade de armazenamento é de 16,8 hm³, conforme o projeto de 1956 e, de 15,8 hm³, conforme batimetria realizada em 2011 (Figura 26) pelo Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido – HIDROSED (LOPES, 2016).

Figura 26 – Mapa topográfico do açude Marengo

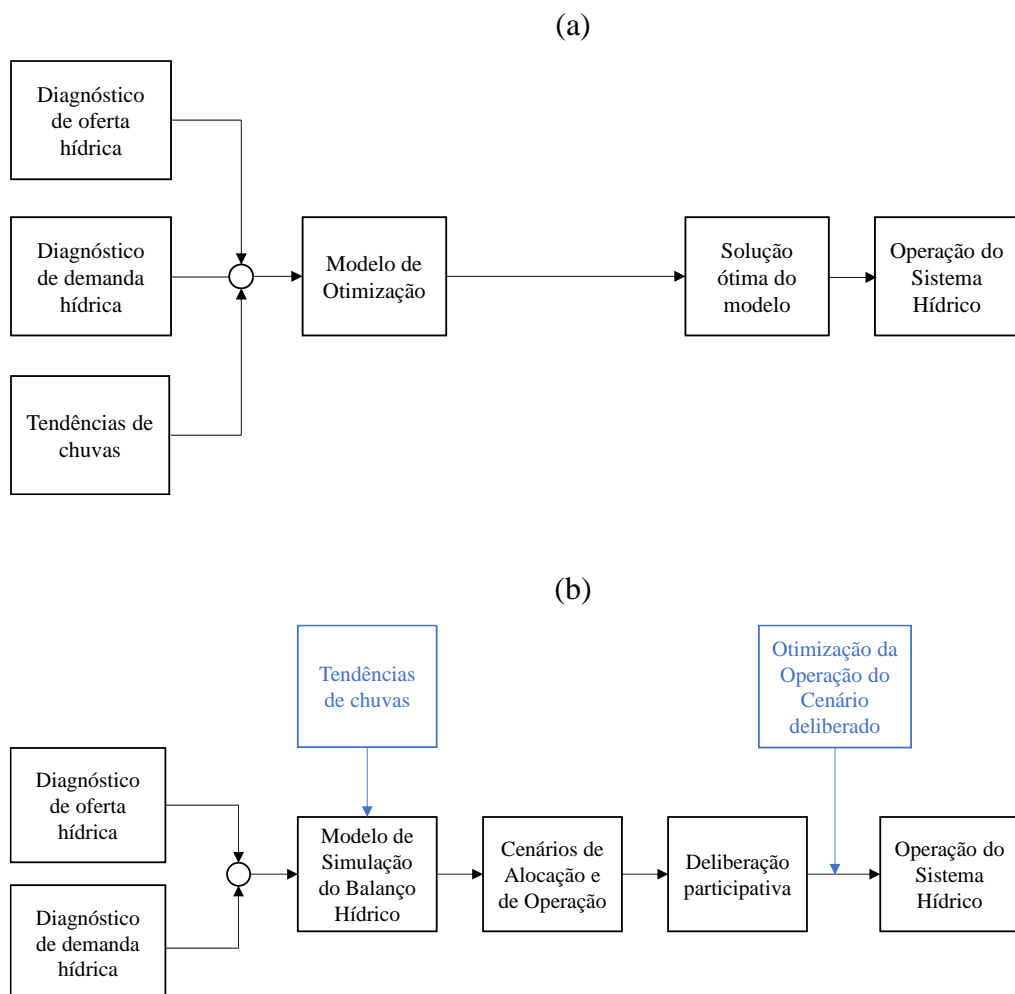


Fonte: Lopes (2013)

3.4 Descrição das etapas do modelo de operação proposto

O modelo de operação proposto apresenta, além da incorporação da modelagem hidrológica em sua composição, dois elementos de destaque: a informação de tendências de chuvas e a otimização. Para que a otimização possa se constituir como um elemento enriquecedor do processo participativo, esta deve se posicionar, não como solução ótima do problema (Figura 27a), mas como um complemento do processo de alocação (Figura 27b). No que tange à informação de tendências de chuvas, como se pode observar na Figura 27b, a pesquisa ora desenvolvida propõe o seu reposicionamento, do momento da deliberação participativa, como é realizado atualmente nos processos de alocação, para a etapa de simulação de balanço hídrico.

Figura 27 – Fluxogramas de processos alternativos de alocação de água: (a) otimização como solução ótima do modelo e (b) otimização da regra de operação deliberada de forma participativa.



A partir da idealização do modelo de operação, exposto, genericamente, no fluxograma da Figura 27b, descreve-se a seguir o seu passo-a-passo metodológico, buscando a exposição de todos os itens desejáveis ao modelo proposto. Para melhor visualização dos componentes do modelo, a Figura 28 mostra o seu fluxograma detalhado.

3.4.1 Etapa de diagnóstico

A etapa de diagnóstico contempla os levantamentos de oferta e de demanda hídrica. O levantamento de oferta pode ser dividido em (1) oferta de água de origem meteorológica (águas pluviais que alimentam diretamente as cisternas individuais das unidades familiares ou cisternas coletivas), (2) oferta de águas superficiais (águas decorrentes do escoamento superficial aos rios, açudes, lagos e lagoas) e (3) águas subterrâneas (águas provenientes de poços).

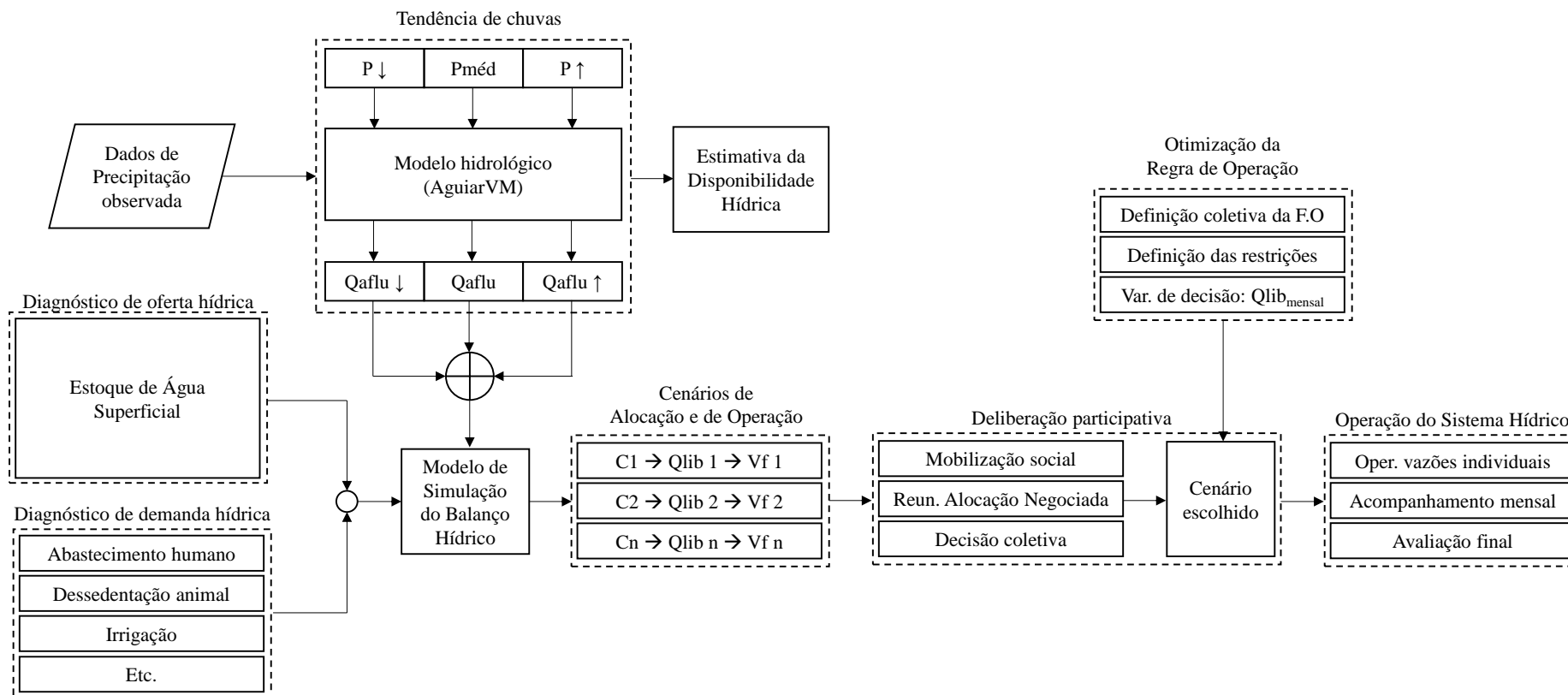
A estimativa da oferta de água meteorológica pode ser realizada pelo simples somatório dos volumes armazenados em cada cisterna, ao final da estação chuvosa. No caso de açudes sem volume conhecido, a melhor estimativa é auferida por meio de batimetria, em que, além da determinação do volume armazenado atual, pode-se extrair como produto a tabela Cota-Área-Volume (CAV), informativa do volume armazenado a partir da simples identificação do nível do reservatório.

Conforme realizado por Lopes (2013), dispendo-se de um barco (para navegação sobre o espelho d'água do reservatório), um aparelho GPS portátil (para coleta de coordenadas) e de um profundímetro digital, pode-se estimar o volume reservado e obter a tabela CAV de um reservatório. Para tal, a partir dos dados de coordenadas e cotas, calculam-se o volume intermediário (V_{int}) e o volume acumulado (V_{ac}) por meio das Equações 32 e 33, respectivamente. Nas Equações 32 e 33, A_{ac} é a área do espelho d'água em uma determinada cota, V_{int} é o volume intermediário do reservatório entre duas cotas, V_{ac} é o volume acumulado no reservatório até uma determinada cota e h representa a cota.

$$V_{int(i)} = \frac{(A_{ac(i-1)} + A_{ac(i)})}{2} \cdot (h_{(i)} - h_{(i-1)}) \quad (32)$$

$$V_{ac(i)} = V_{ac(i-1)} + V_{int(i)} \quad (33)$$

Figura 28 – Fluxograma¹ das etapas do modelo de operação proposto



¹ P ↓ refere-se à precipitação abaixo da média, P ↑, à precipitação acima da média e P méd à precipitação média; Qaflu ↓ é a vazão escoada na bacia na condição de chuvas abaixo da média, Qaflu ↑, na condição acima da média e Qaflu na condição de chuvas médias, na condição acima da média; C1, C2 e Cn referem-se a cenários de alocação; Qlib 1, Qlib 2 e Qlib n são as vazões liberadas; Vf 1, Vf2 e Vf n são os volumes finais dos reservatórios, resultantes da operação de cada cenário; F.O. é a função-objeto da otimização e Qlib mensal é a vazão liberada mensalmente.

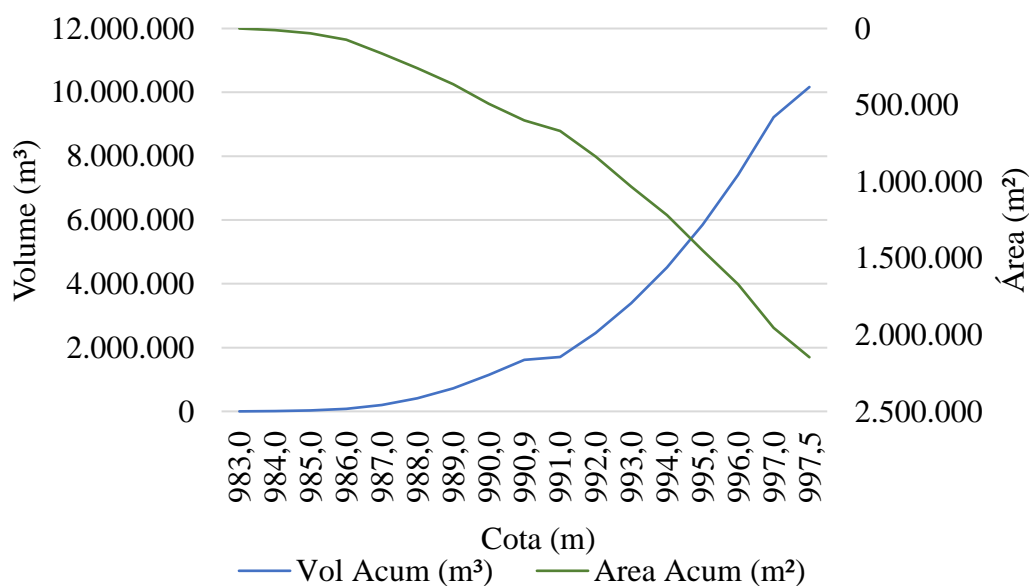
A Tabela 2 apresenta, a título de exemplo do referido procedimento (Equações 32 e 33), a relação entre “cota”, “área inundada” e “volume acumulado”, do Açude Santa Catarina, Madalena-CE, também apresentada na Figura 29.

Tabela 2 – Relação CAV (cota – área – volume) do reservatório Santa Catarina, Madalena-CE, a partir de dados batimétricos disponíveis em Ceará (2017).

Cota (m)	Área inundada (m ²)	Volume Intermediário (m ³)	Volume Acumulado (m ³)
983,0	0	0	0
984,0	10.169	5.085	5.085
985,0	31.082	20.626	25.710
986,0	73.452	52.267	77.977
987,0	163.447	118.450	196.427
988,0	258.341	210.894	407.321
989,0	364.692	311.517	718.837
990,0	490.972	427.832	1.146.669
990,9	600.000	469.118	1.615.787
991,0	669.601	88.872	1.704.659
992,0	836.588	753.095	2.457.754
993,0	1.033.349	934.969	3.392.722
994,0	1.218.072	1.125.711	4.518.433
995,0	1.448.736	1.333.404	5.851.837
996,0	1.669.519	1.559.128	7.410.964
997,0	1.953.783	1.811.651	9.222.615
997,5	2.146.600	943.088	10.165.703

Fonte: Autor, a partir de Ceará (2017)

Figura 29 – Relação Cota-Área-Volume do reservatório Santa Catarina, Madalena-CE, a partir de dados batimétricos disponíveis em Ceará (2017).



Fonte: Autor, a partir de Ceará (2017)

Na construção da curva CAV de um reservatório, Rebouças *et al.* (2012) recomendam o uso do software de geoprocessamento *ArcGIS*®. Zhang *et al.* (2016) utilizaram imagens de satélite, gerando modelo digital de elevação (MDEs) livres da interferência de macrófitas emergentes e submersas. No estudo, comparações entre a metodologia proposta e o mapa batimétrico derivado de levantamentos de campo mostraram que a quantidade de água retida durante a fase seca tem apenas um impacto marginal na derivação do volume total.

Quanto ao levantamento da demanda hídrica, nas localidades típicas do semiárido, as tipologias são, preponderantemente: abastecimento humano, dessedentação animal e irrigação. A demanda para abastecimento humano pode ser estimada pela Equação 34:

$$Q_{ab} = \frac{Pop \cdot q}{86400} \quad (34)$$

Q_{ab} é a vazão requerida ($L \cdot s^{-1}$), Pop é o número de pessoas a serem atendidas e q é a vazão *per capita* em $L \cdot hab^{-1} \cdot dia^{-1}$. Estudos apontam que o requerimento diário de água por pessoa, a fim de serem supridas suas necessidades, garantindo um padrão razoável de saúde é de cem litros por dia. Para a estimativa de dessedentação animal, a mesma Equação 34 pode ser utilizada, em que a variável Pop se refere ao número de animais da mesma espécie e q se refere à vazão per capita em $L \cdot animal^{-1} \cdot dia^{-1}$. O Quadro 4, a seguir, indica o consumo mínimo de água por animal (DANTAS NETO, 2013).

Quadro 4 – Consumo per capita mínimo de água por animal

Animal	Consumo per capita ($L \cdot animal^{-1} \cdot dia^{-1}$)
Bode	8
Boi/burro/cavalo	35
Galinha	0,1
Ovelha	8
Peru	0,2
Porco	15
Vaca leiteira	90

Fonte: Dantas Neto (2013)

A potencial demanda de água para irrigação de uma cultura pode ser considerada numericamente igual à sua evapotranspiração potencial (ET_c), uma vez que a água perdida por evapotranspiração deve ser reposta proporcionalmente. Esta grandeza pode ser estimada em função da Evapotranspiração de referência da região (ET_0) e do coeficiente de cultivo da cultura (K_c), em cada uma de suas fases de desenvolvimento (Equação 35) (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1994).

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (35)$$

Na Equação 35, ET_c é a evapotranspiração da cultura, em mm, ET_0 é a evapotranspiração de referência da região, em mm, e K_c é um ponderador denominado coeficiente de cultivo da cultura, que varia em uma faixa aproximada de $0,2 \leq K_c \leq 1,3$. Considerando a área da cultura irrigada e a eficiência do sistema de irrigação, o volume demandado por uma cultura pode ser estimado pela Equação 36:

$$Q_{irr} = 0,00386 \frac{ET_c}{Ef} \cdot A \quad (36)$$

Na Equação 36, Q_{irr} é a vazão de água demandada pela cultura ($L \cdot s^{-1}$), ET_c é a evapotranspiração da cultura, em mm, A é a área ocupada pela cultura irrigada, em hectares, e Ef é a eficiência do sistema de irrigação aplicado, adimensional. A Tabela 3 traz os valores de evapotranspiração potencial mensal (ET_0) das normais climatológicas do Brasil – 1981 a 2010 para as estações do estado do Ceará. A Tabela 4 apresenta os valores do coeficiente de cultivo para algumas culturas agrícolas e outras coberturas vegetais em fase de desenvolvimento inicial, em estágio de pleno desenvolvimento e no final do ciclo. Por sua vez, a Tabela 5 mostra valores de referência para a eficiência de diferentes sistemas de irrigação.

Tabela 3 - Evapotranspiração potencial mensal das normais climatológicas do Brasil – 1981 a 2010 para algumas estações meteorológicas do estado do Ceará.

Cidade	Evapotranspiração potencial mensal – ET_0 (mm)											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Acaraú	190,6	169,4	175,9	163,6	167,7	156,8	-	168,8	172,9	189,0	185,3	197,7
Barbalha	187,3	138,4	149,2	130,9	128,9	118,0	126,2	153,7	174,2	207,3	209,7	214,1
Campos Sales	171,2	130,7	133,3	116,6	113,1	106,8	115,2	136,1	160,8	187,1	182,9	190,4
Crateús	229,4	176,0	171,7	140,9	147,6	142,3	162,8	191,7	213,9	245,3	242,0	250,0
Fortaleza	182,8	164,3	173,8	159,0	159,5	142,7	145,1	151,2	157,2	172,6	175,1	186,2
Guaramiranga	97,6	87,2	95,2	88,3	88,0	78,6	78,7	80,9	82,8	91,4	92,7	96,2
Iguatu	233,4	173,7	182,6	149,9	150,4	134,7	156,9	191,1	208,1	241,1	241,3	259,2
Jaguaruana	208,8	186,5	195,6	168,7	169,5	155,0	159,4	169,6	177,6	200,6	198,9	211,7
Morada Nova	209,5	178,7	190,8	166,9	163,9	146,9	156,9	167,1	174,7	189,8	197,6	207,6
Quixeramobim	214,0	186,2	184,1	160,1	151,4	137,6	158,1	177,0	182,9	201,1	205,2	221,4
Sobral	200,9	161,2	158,9	142,4	151,7	144,3	165,8	182,4	192,9	213,6	200,6	212,3
Tauá	221,4	171,4	180,2	144,4	141,7	131,7	151,6	179,2	200,4	224,5	224,7	232,5

Fonte: Brasil (2021)

Tabela 4 – Coeficiente de cultivo para diferentes tipos de vegetação e culturas agrícolas.

Cultura	Estádio da cultura, Duração e Kc							Único Kc
	Inicial		Desenvolv.	Intermediário		Final		
	Duração	Kc	Duração	Duração	Kc	Duração	Kc	
Açaí								1,00
Acerola	30	0,73	30	60	1,00	60	1,39	
Algodão	20	0,40	40	50	1,05	40	0,65	
Arroz	30	1,05	30	60	1,20	30	0,60	
Atemóia								0,90
Aveia					1,15		0,25	
Banana	90	1,00	90	45	1,20	30	1,00	
Batata					1,15		0,75	
Batata doce					1,15		0,65	
Cacau		1,00			1,05		1,05	
Café		1,05			1,10		1,10	
Caju						Após o 5º ano		0,65
Cana	30	0,40	60	180	1,25	95	0,75	
Campim/ Pasto								0,75
Coníferas		1,00			1,00		1,00	
Cebola	15	0,40	25	70	1,05	40	0,75	
Cevada					1,15		0,25	
Citros								0,80
Coco		0,95			1,00		100	
Feijão	15	0,40	25	25	1,15	10	0,35	
Figo								1,00
Fornagem		0,40			1,25		0,75	
Girassol					1,15		0,35	
Goiaba								0,63
Graviola								0,90
Hortaliças								1,00
Mamão		0,64	107	260	1,16	380	1,19	
Mandioca	30	0,30	40	110	1,10	60	0,50	
Manga								0,71
Maracujá								0,69
Melancia	23	0,41	13	19	1,36	15	0,71	
Melão	22	0,21	19	23	1,21	10	0,98	
Milho	8	0,49	35	33	1,06	29	0,6	
Ornamentais								1,00
Pimenta	30	0,60	40	40	1,05	20	0,90	
Pimentão	20	0,40	30	40	1,00	30	0,80	
Pinha								0,90
Quiabo	30	0,50	30	90	1,00	30	0,30	
Sapota/ Sapoti								0,71
Soja	20	0,40	30	50	1,15	20	0,5	
Sorgo	20	0,40	30	60	1,10	10	0,55	
Tomate	30	0,50	40	45	1,15	30	0,80	
Trigo		0,70			1,15		0,40	
Uva	20	0,6	60	95	1,15	117	0,6	

Fonte: Adaptado de Barbosa (2005); Collischonn e Dornelles (2015)

Tabela 5 – Eficiência de sistemas de irrigação.

Sistema de Irrigação	Faixa de eficiência
Sulcos	0,40 – 0,60
Inundação	0,50 – 0,80
Aspersão	0,65 – 0,85
Gotejamento	0,75 – 0,90
Microaspersão	0,75 – 0,90

Fonte: Vieira (1989)

3.4.2 Tendência de chuvas e modelagem hidrológica

No contexto do modelo de operação proposto, a série de precipitações utilizada no modelo hidrológico é atrelada à indicação de tendência de chuvas para os meses subsequentes. Para tal, procede-se da seguinte maneira:

- i. De posse da série histórica de precipitações, calcula-se a média observada para cada mês do ano. A partir destes valores, considera-se, para determinado mês, como “chuva em torno da média”, aquela cuja magnitude esteja entre 15% abaixo e 15% acima do valor médio do referido mês, conforme praticado pela Fundação Cearense de meteorologia – FUNCEME;
- ii. Para cada mês, calcula-se a média das chuvas abaixo da faixa considerada como “em torno da média” (média das menores chuvas) e a média das chuvas acima da faixa considerada como “em torno da média” (média das maiores chuvas), sendo possível, assim, a construção de três vetores de precipitação mensal, um para cada cenário de indicação de tendência de chuvas: abaixo da média, na média e acima da média histórica;
- iii. Aplicação de cada vetor de precipitação ao modelo hidrológico, a fim de se obter três vetores de vazão escoada mensal: um com vazões provenientes de precipitações abaixo da média, outro com vazões provenientes de chuvas na média e, ainda outro, com vazões provenientes de chuvas acima da média;
- iv. Apropriação da indicação de tendência de chuvas atual (abaixo da média, na média ou acima da média). Essa informação é fornecida sazonalmente pelo órgão de pesquisa meteorológica;
- v. Aplica-se o vetor de precipitação e o vetor de vazão escoada correspondentes à indicação de tendência de chuvas ao modelo de simulação de balanço hídrico.

A execução dos passos descritos confere ao modelo de balanço hídrico, a incorporação da informação de tendência de chuvas. É importante destacar que, para cada sistema hídrico, os

passos *i* a *iii* só precisam ser realizados uma única vez. Os passos *iv* e *v*, por sua vez, devem ser executados a cada alocação negociada de água.

Conforme descrito no Item 3.2 (O modelo hidrológico AguiarVM), apenas duas informações são necessárias à execução do modelo hidrológico: a série de precipitações e o valor do parâmetro de ajuste mensal (Ω). O procedimento para a execução do modelo em *software* na linguagem FORTRAN, é descrito a seguir:

- i. Preenchimento dos arquivos de entrada, conforme exemplo dos Apêndices B e C;
- ii. Operação do arquivo executável do programa (extensão .exe);
- iii. Coleta dos resultados de vazão escoada mensal, no arquivo de saída do programa, conforme exemplo do Apêndice C2.

Ainda conforme descrito no Item 3.2, para a simulação do modelo AguiarVM, pode ser utilizada, opcionalmente, planilha eletrônica disponível no endereço eletrônico: <https://docs.google.com/spreadsheets/d/1oRaPn1lNjttRab31w1on4XOC4jYUI0G0/edit?usp=sharing&ouid=110737246891313013366&rtpof=true&sd=true>.

Para fins de comparação, uma vez calculados os vetores de precipitações, aplicou-se, além do modelo AguiarVM, o modelo SMAP (LOPES *et al.*, 1981, 1982). A escolha do modelo SMAP se deu por se tratar de um modelo que se baseia nos conceitos físicos relacionados ao ciclo hidrológico e por apresentar uma versão de passo temporal mensal. Os dois modelos foram parametrizados a partir dos dados de volume armazenado no açude Marengo. As medições do estoque hídrico foram realizadas por Lopes (2013), no período entre novembro de 2011 a agosto de 2012. Os volumes para o primeiro dia dos meses observados estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Volume armazenado no açude Marengo, medidos entre novembro de 2011 e agosto de 2012.

Data	Volume (hm ³)	Volume (%)
01/11/2011	10,49	67%
01/12/2011	10,02	64%
01/01/2012	9,56	61%
01/02/2012	9,19	58%
01/03/2012	8,91	57%
01/04/2012	8,48	54%
01/05/2012	8,10	51%
01/06/2012	7,61	48%
01/07/2012	7,12	45%
01/08/2012	6,63	42%

Fonte: Lopes (2013)

Parametrização do modelo SMAP

Na modelagem pelo modelo SMAP, os parâmetros *Crec*, *Kkt*, *Tu_{in}* e *Eb_{in}*, receberam os valores recomendados nos estudos de COGERH e UFC (2013), conforme descrito no Item 2.2.3 (que se referem aos parâmetros gerais para o semiárido cearense). Os parâmetros específicos da bacia, *Sat* e *Pes*, foram calibrados por meio de otimização, tendo-se como função objetivo, o coeficiente de Nash-Sutcliffe referente ao volume armazenado no reservatório Marengo. Para tal, parametrizou-se o modelo segundo os dados expostos no Quadro 5.

Quadro 5 – Fontes de dados para a calibração dos parâmetros *Sat* e *Pes* do modelo SMAP.

Parâmetro	Parametrização
Precipitação	Posto Madalena (código ANA 00439063)
Evaporação	INMET (Normais climatológicas de Quixeramobim) e SAGREH ¹ (estimativas específicas entre 11/2011 e 08/2012 para o município de Quixeramobim)

¹Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos hídricos

Parametrização do modelo AguiarVM

Para a modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do açude Marengo, pelo modelo AguiarVM, calibrou-se um parâmetro do método de Aguiar, (parâmetro *U*) referente à correção do escoamento superficial e o parâmetro calibrável do modelo AguiarVM, a saber, o fator de ajuste de proporcionalidade (Ω). A fonte dos dados de precipitação para a parametrização do modelo AguiarVM é a mesma exposta, anteriormente, para o modelo SMAP (Quadro 5).

3.4.3 Estimativa da disponibilidade hídrica

Para a avaliação da disponibilidade hídrica, a partir da série sintética de vazões afluentes obtidas no modelo hidrológico, descrito anteriormente, é aplicado o modelo VYELAS (DE ARAÚJO *et al.*, 2006). Este modelo é capaz de fornecer simulações de vazões de referência, com garantia anual. A partir da curva de garantia obtida pela execução do modelo, a vazão com 90% de garantia (Q_{90}) pode ser utilizada como uma referência para o modelo de operação, conforme recomendação da legislação do Estado do Ceará (Lei N° 14.844/2010).

3.4.4 Modelo de simulação do balanço hídrico

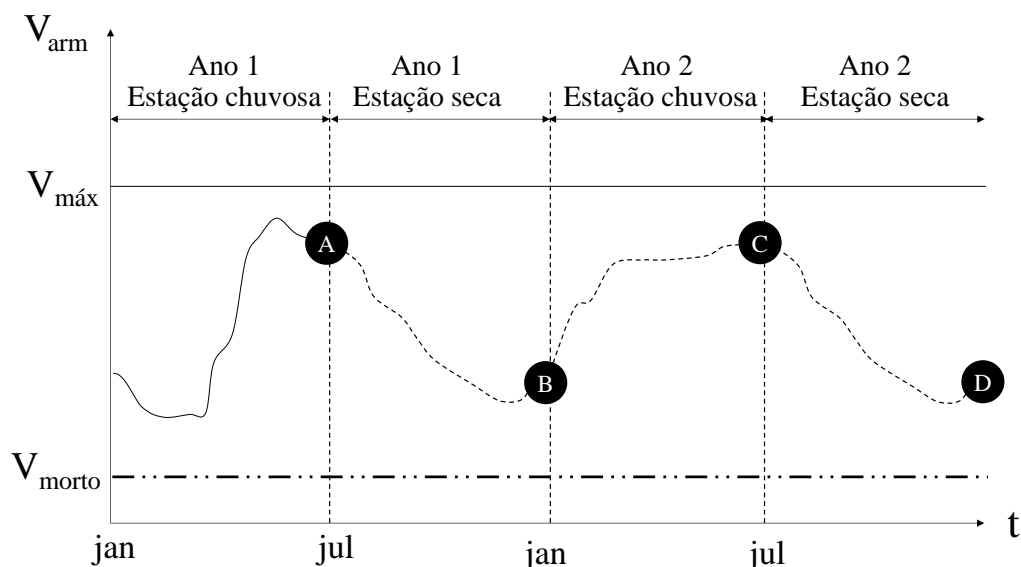
Para a realização do cálculo do balanço hídrico, conforme a Equação 23 deve-se, previamente, preparar os seguintes dados:

- a) Vetor de precipitação mensal sobre a bacia hidráulica do reservatório;
- b) Vetor de vazões afluentes mensais;
- c) Vetor de evaporação mensal;
- d) Demandas mensais a serem atendidas pelo reservatório;
- e) Tabela Cota-Área-Volume do reservatório.

Os itens *a* e *b* são provenientes da etapa de modelagem hidrológica, descrita no tópico 3.4.2. Como vetor de evaporação mensal, podem ser utilizados os dados da Tabela 3, do tópico 3.4.1. O item *d* deve ser obtido pela metodologia do diagnóstico de demanda exposto no tópico 3.4.1. É importante destacar que, uma vez que o balanço hídrico se refere ao reservatório superficial, a demanda a ser contabilizada no cálculo do balanço hídrico refere-se aos usos atendidos pelo reservatório. Por sua vez, o item *e* é obtido por meio de batimetria ou, oportunamente, de pesquisa bibliográfica, como por exemplo, o livro “Açudagem Particular em Cooperação no Ceará”, um levantamento criterioso de todas as 476 obras de açudagem em cooperação realizadas desde 1913, contendo, também muitas informações técnicas sobre essas obras (PINHEIRO, 2004).

Após a coleta de dados e conhecido o volume atual armazenado no reservatório, aplica-se a equação do balanço hídrico (Equação 23) mês a mês, até o alcance do horizonte temporal do período de alocação. A proposta do presente modelo de operação é de um horizonte temporal de alocação de 18 meses, conforme exposto na Figura 30. Na Figura 30, o volume armazenado em um reservatório fictício no início do período de alocação é representado pelo ponto *A*, que corresponde ao final da quadra chuvosa do primeiro ano de análise. O balanço hídrico é realizado para a simulação do comportamento do reservatório, a partir deste ponto, até o ponto *D*, que corresponde ao final da estação seca do ano subsequente. Os pontos *B* e *C* correspondem, respectivamente, ao volume armazenado no final da estação seca do primeiro ano e ao volume armazenado no final da estação chuvosa do segundo ano. No cálculo do balanço hídrico, portanto, a Equação 23 é utilizada 18 vezes para cada cenário que se deseje simular, em que o volume inicial (V_t) de cada ciclo de cálculo corresponde ao volume final (V_{t+1}) do ciclo anterior. Na Figura 30, V_{arm} , $V_{\text{máx}}$ e V_{morto} se referem, respectivamente, aos volumes armazenado, máximo e morto, do reservatório.

Figura 30 – Esquema ilustrativo de evolução volumétrica e horizonte temporal de alocação de água de um reservatório superficial.



Fonte: Autor

3.4.5 Cenários de alocação e cenários de operação

Conforme exposto no Item 2.1.2 (alocação negociada de água, Quadros 1a e 1b), os cenários de alocação se referem à repartição do volume disponível entre os diversos usos a serem atendidos. Os cenários de operação, por sua vez, se referem ao impacto da operação de cada cenário no sistema hídrico. O procedimento para a montagem dos cenários inclui os seguintes pontos:

- i. Cenários de alocação: propor cenários distintos de repartição do recurso hídrico entre os diversos usos, contemplando usos de montante e de jusante do reservatório;
- ii. Ordenar os cenários de alocação, de forma crescente de restrição, isto é, do cenário menos restritivo para o mais restritivo (cf. exemplo ilustrativo do Quadro 1a);
- iii. Cenários de operação: Realizar o balanço hídrico com o termo V_r (volume retirado para os diversos usos a serem atendidos pelo reservatório), da Equação 23, igual à soma de todas as demandas mensais de cada cenário proposto anteriormente;
- iv. Indicar o volume armazenado final do período de alocação de cada cenário (cf. exemplo ilustrativo do Quadro 1b).

3.4.6 Deliberação participativa

Nesta etapa, são apresentados ao público-alvo, os cenários a serem deliberados de forma participativa. Esse processo, como exposto no Item 2.1.2, se dá na reunião de alocação negociada de água, que possui os seguintes componentes:

- a) Informação da indicação de tendência de chuvas, tendo como fonte, o órgão de estudos meteorológicos;
- b) Apresentação dos cenários de alocação, expondo o grau de restrição para cada uso, proposto em cada cenário;
- c) Apresentação dos cenários de operação, expondo o impacto volumétrico no reservatório, resultante da escolha de cada cenário de alocação;
- d) Abertura ao debate social com vistas à tomada de decisão;
- e) Consenso ou votação. Essa última, se aplica em casos em que não haja consenso;
- f) Celebração do pacto social, com registro de ata assinada por representantes, constando o cenário deliberado, com sua vazão alocada e demais informações que se julgue necessárias.

Para que a reunião de alocação negociada de água tenha representatividade, pressupõe-se mobilização social informativa e capacitação dos atores sociais. O fluxograma da Figura 31 mostra a sequência das atividades. As etapas deste tópico devem ser realizadas, preferencialmente, de forma presencial, salvo em situações emergenciais como crises sanitárias, de segurança pública ou outros fatores externos, em que se possa verificar a viabilidade da forma remota, desde que haja garantia de acessibilidade digital para todos os atores sociais envolvidos.

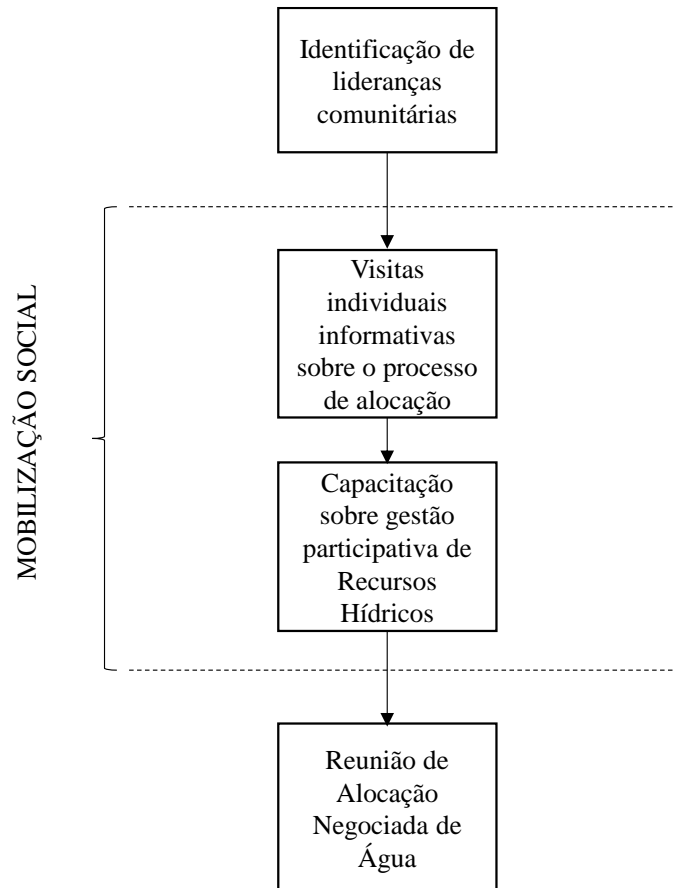
3.4.7 Otimização da regra de operação

Uma vez acordado, pelos atores sociais, o cenário a ser operado no sistema hídrico, pode-se ainda definir, de forma participativa, a sua regra de operação baseada em um objetivo suplementar ao atendimento das demandas hídricas. Exemplos de objetivos que podem ser buscados na operação do reservatório são:

- a) Minimização de perdas por evaporação;
- b) Minimização de vezes em que o açude chega ao volume morto ou a algum nível especificado (volume meta);
- c) Minimização de falhas de atendimento às demandas;
- d) Maximização de renda obtida a partir da produção agrícola.

Neste trabalho, as funções objetivo exploradas foram a minimização de perdas por evaporação e minimização de vezes em que o açude chega a um nível especificado (volume meta).

Figura 31 – Etapas do processo de exercício da gestão participativa



Fonte: Autor

Conforme exposto no Item 2.4.3 (modelos de otimização, Figura 17), a alocação otimizada requer, além da definição do(s) objetivo(s), a identificação das restrições do sistema hídrico. As restrições típicas destes sistemas são as equações de conservação de massa, os níveis máximo e mínimo do reservatório e as limitações impostas por tubulações e outros equipamentos, como por exemplo a vazão máxima que pode ser aduzida.

No estudo em pauta, uma vez que a proposta do modelo de operação possui um horizonte temporal de apenas 18 meses, a otimização pode ter como ferramenta computacional, uma planilha eletrônica dotada de suplemento de programação não-linear, como o SOLVER, por exemplo. Dado a praticidade do referido recurso computacional, fácil de se operar, acessível e disponível na maioria dos microcomputadores atuais, esta possibilidade vai ao encontro das premissas do modelo de gestão integrada: a busca da inclusão das partes interessadas nas fases do processo decisório.

Como variáveis de decisão, na otimização, estão as vazões mensais a serem liberadas pelo reservatório. Portanto, no modelo de operação proposto, uma vez deliberado o cenário de alocação, a regra de operação é moldada ao(s) objetivo(s), que também pode(m) ser definido(s) de forma participativa. Em termos práticos, cada mês poderá apresentar um valor de liberação distinto, adequado aos propósitos do(s) objetivo(s) que se pretende alcançar.

Esta sétima etapa do modelo de operação proposto não se trata de condição indispensável à sua execução, uma vez que o cerne da gestão participativa, no âmbito da alocação negociada de água, é o acordo social da partição do recurso hídrico. Na prática, é possível que a alteração das vazões não seja viável por limitações técnicas tais como a não existência de estrutura de saída do reservatório, defeitos em equipamentos hidromecânicos, ausência de pessoal qualificado para a realização de manobras etc. Outra limitação que se apresenta, é a dificuldade de adequação do usuário à variação mensal na oferta, resultante da otimização dos volumes mensais liberados, como se verá nos resultados desta etapa do modelo de operação proposto. A contribuição valiosa da otimização da regra de operação, porém, está no ganho de eficiência possível com seu emprego.

3.4.8 Operação do sistema hídrico

A oitava e última etapa do modelo é a operação do reservatório conforme o cenário deliberado. A operação consiste na liberação da vazão mensal, conforme regra de operação definida (vazão média ou otimizada), e no acompanhamento mensal comparativo entre o volume simulado e o volume real do reservatório. Mensalmente, realiza-se a reunião de acompanhamento da operação e, ao final do período da operação, a reunião de avaliação, conforme descrito no Item 2.1.2 (alocação negociada de água, Figura 6).

No que tange à liberação de água do reservatório conforme a vazão definida na reunião de alocação, é importante destacar a existência de uma vazão de retorno, de modo que é possível liberar menos água que a demanda, uma vez que parte da demanda abstraída pelos usuários de montante retorna ao rio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aplicação do modelo hidrológico AguiarVM

A Tabela 8 apresenta, para cada reservatório, o coeficiente de correção do escoamento superficial (U), o parâmetro de ajuste mensal (Ω), as vazões médias observadas e simuladas pelo modelo AguiarVM com os erros relativos e, ainda, o período de dados utilizado para a calibração e validação do modelo.

Tabela 8 – Dados das simulações do modelo AguiarVM nas bacias hidrográficas dos açudes Cedro, General Sampaio e Joaquim Távora, no Ceará.

Açude	Área da Bacia Hidrográfica (km ²)	Coeficiente U	Fator de ajuste mensal Ω	Calibração				Validação			
				Período	Qm obs ¹ (m ³ .s ⁻¹)	Qm sim ² (m ³ .s ⁻¹)	Erro relativo	Período	Qm obs (m ³ .s ⁻¹)	Qm sim (m ³ .s ⁻¹)	Erro relativo
Cedro	215	1,3	1,32	1912 a 1953	0,55	0,58	+5%	1954 a 1989	0,66	0,64	-3%
General Sampaio	1.582	0,8	0,72	1921 a 1950	7,11	7,11	0	1951 a 1979	8,62	7,37	-14%
Joaquim Távora	121	1,0	0,87	1983 a 2003	0,45	0,42	-7%	2004 a 2009	0,66	0,73	+10%

¹ Vazão média observada;

² Vazão média simulada.

Fonte: Autor

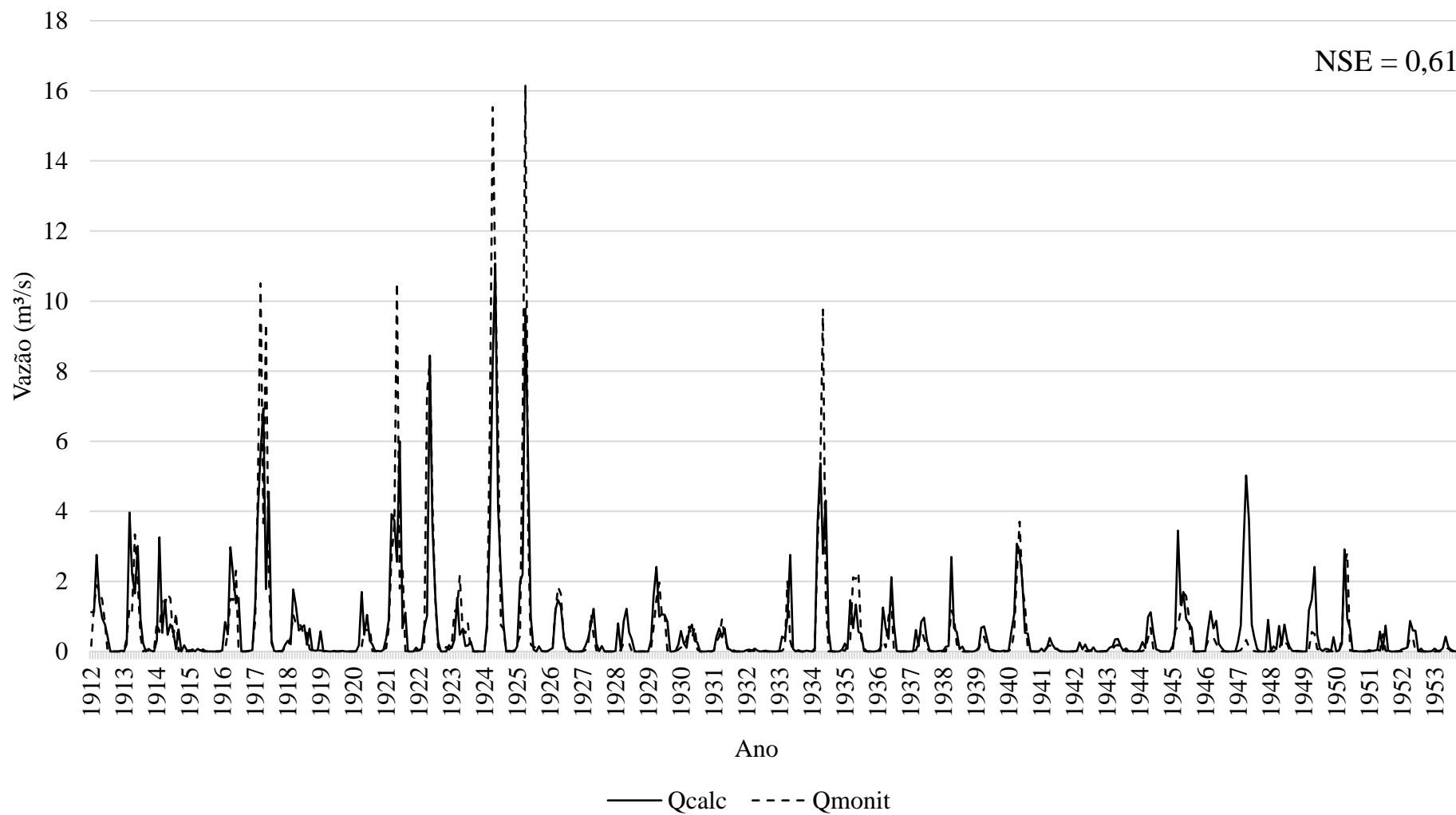
Na Tabela 8, ao se observar os resultados da calibração do parâmetro Ω (entre 0,72 e 1,32, para as bacias simuladas), verifica-se que este se manteve dentro da faixa de valores próprios do coeficiente de Ryves (U), a saber, de 0,5 a 1,4 (AGUIAR, 1978). Esta análise sublinha a analogia na função dos dois parâmetros, U e Ω , para os modelos de Aguiar e AguiarVM, respectivamente.

As Figuras 32 a 37 trazem os hidrogramas resultantes do monitoramento da COGERH e da modelagem hidrológica (calibração e validação) pelo modelo AguiarVM. Pela análise das médias das séries de vazões observada e simulada (Tabela 8), verificou-se que nos casos em que o erro relativo foi positivo, a representação das vazões extremas foi melhor que nos casos em que o erro relativo verificado foi negativo.

Esta característica pode ser observada com clareza verificando-se, por exemplo, o hidrograma da Figura 35 (validação do modelo no Açude General Sampaio), em que a representação das vazões extremas foi inferior ao real em todos os picos superiores a 50 m³s⁻¹. De outra forma, observando-se o gráfico da validação do modelo no Açude Joaquim Távora

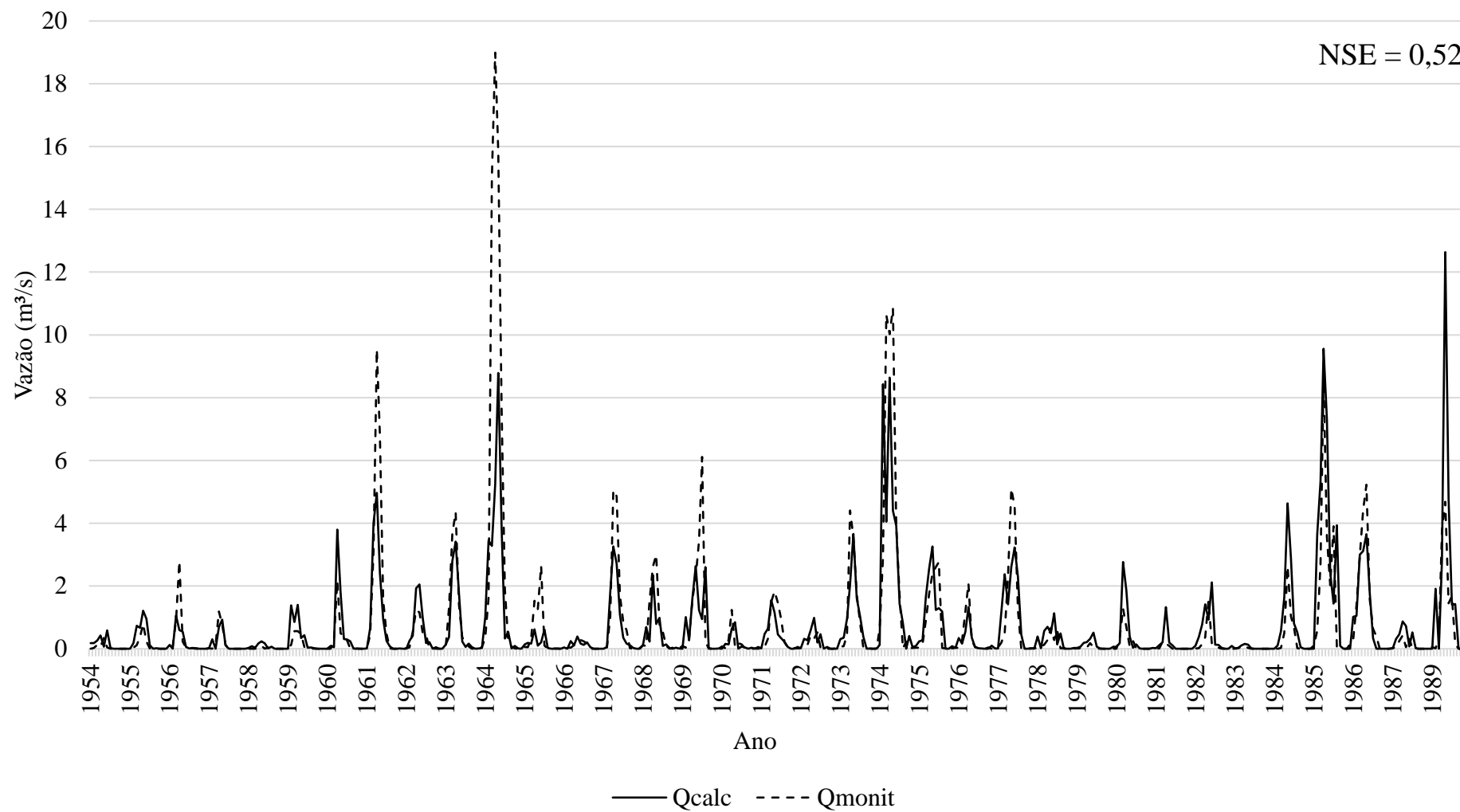
(Figura 37), verificou-se melhor aderência do modelo aos picos de vazões observadas. Nesse ponto, é importante destacar que as vazões extremas da Figura 37 são inferiores a $6 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, revelando uma tendência de melhor desempenho do modelo na representação de escoamentos de baixa magnitude.

Figura 32 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o açude **Cedro**, CE – Etapa de **calibração**.



Fonte: Autor

Figura 33 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o açude **Cedro**, CE – Etapa de **validação**.



Fonte: Autor

Figura 34 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o Açude **General Sampaio**, CE – Etapa de **calibração**.

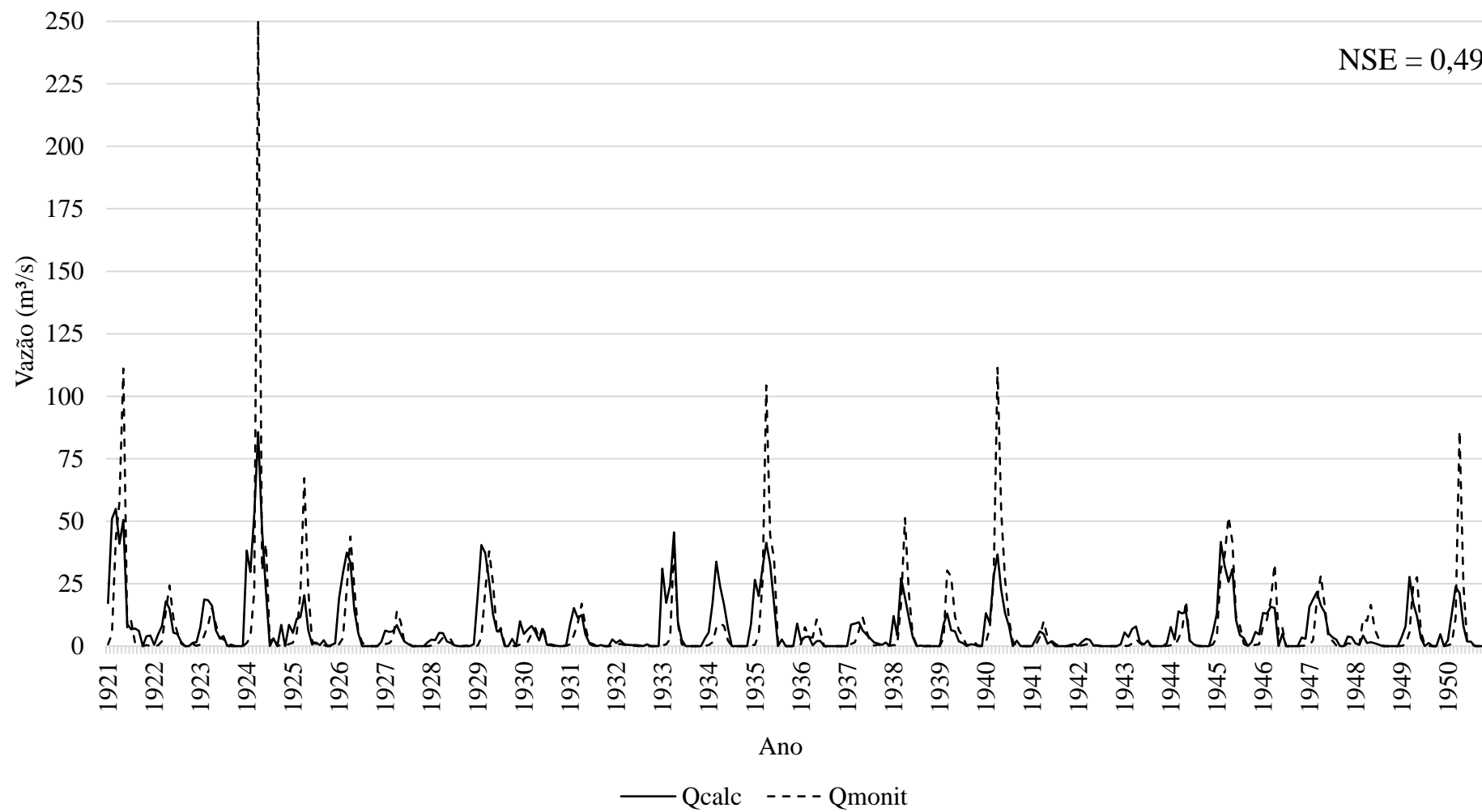
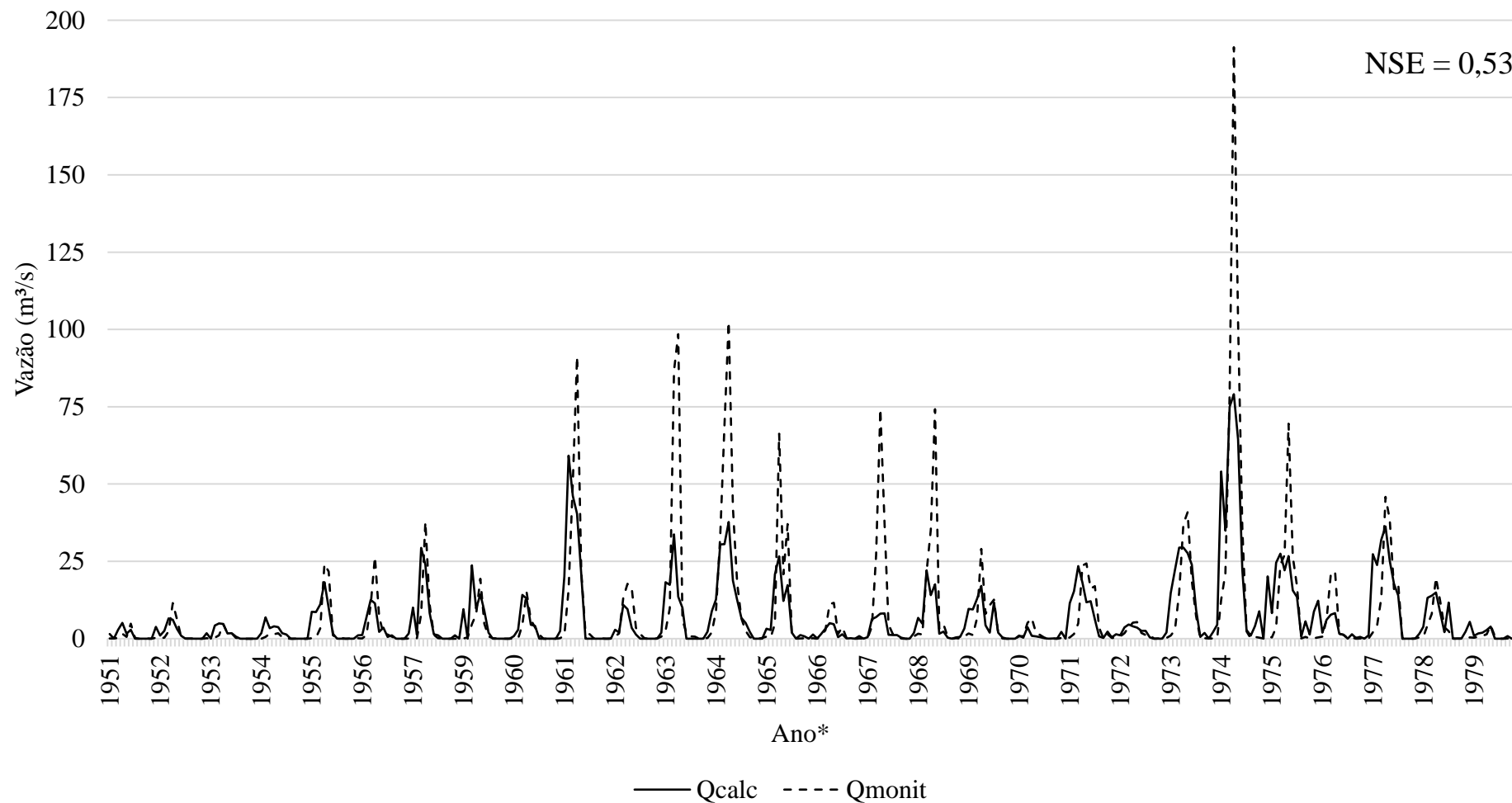


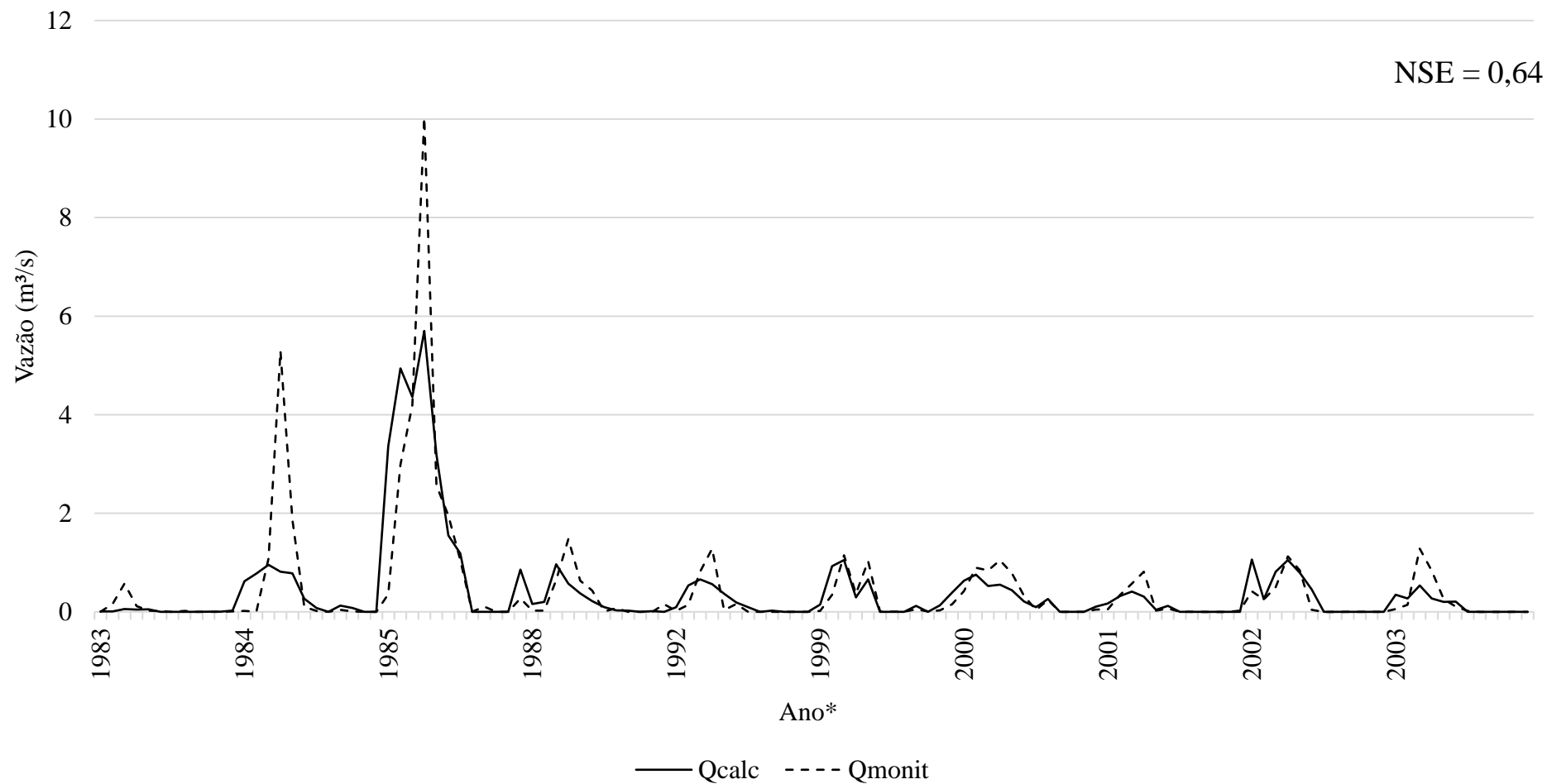
Figura 35 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o açude **General Sampaio**, CE – Etapa de **validação**.



*Para o ano de 1958, não havia dados consistentes para simulação

Fonte: Autor

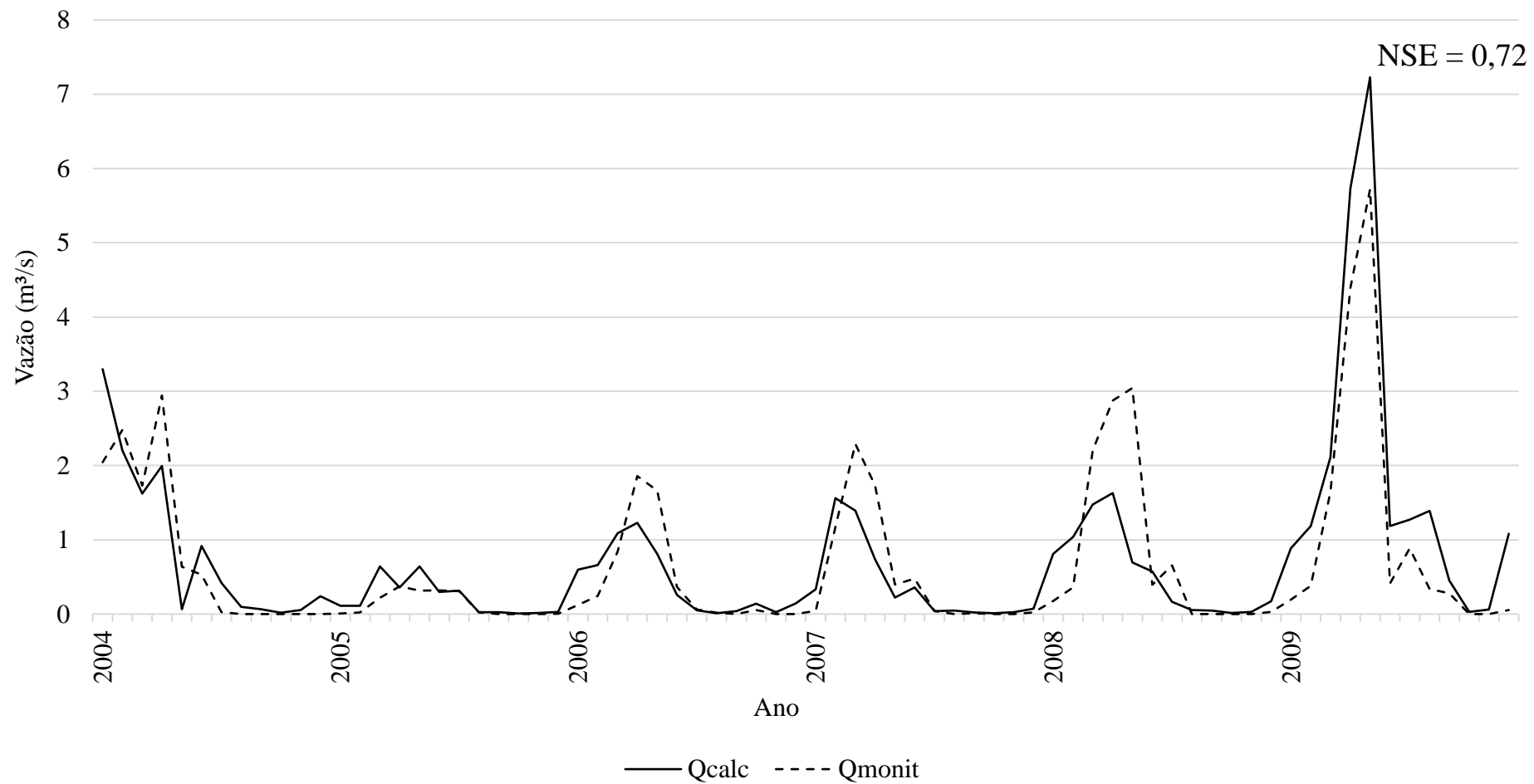
Figura 36 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o açude **Joaquim Távora**, CE – Etapa de **calibração**.



*Para os anos de 1986 e 1987, 1989 a 1991 e de 1993 a 1998 não havia dados consistentes para simulação

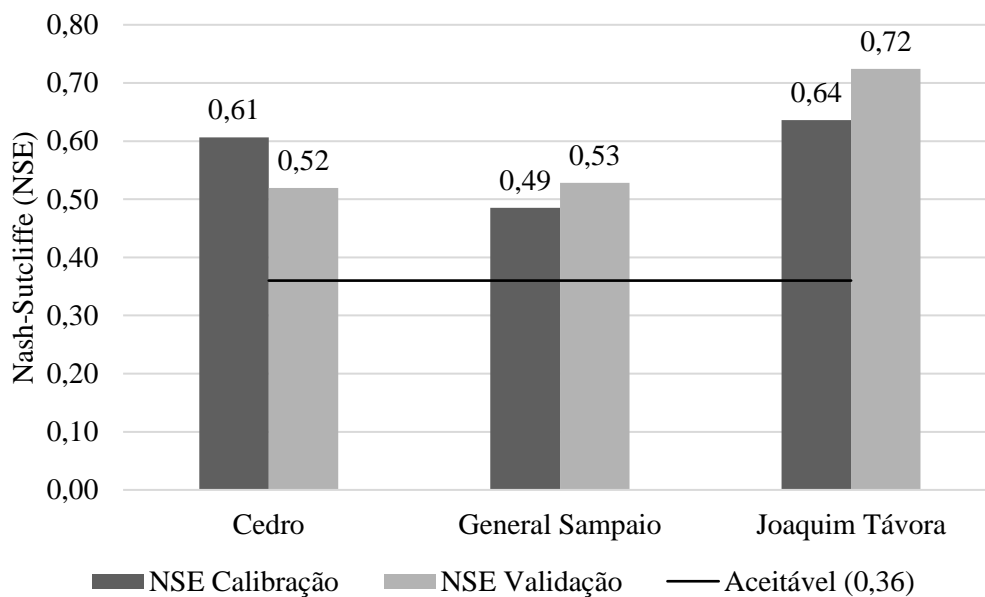
Fonte: Autor

Figura 37 – Comparativo entre o hidrograma resultante do monitoramento COGERH (Q_{monit}) e o resultante do modelo AguiarVM (Q_{calc}) para o açude **Joaquim Távora**, CE – Etapa de **validação**.



A Figura 38 expõe os valores auferidos para o coeficiente de Nash- Sutcliffe (NSE) em cada etapa da modelagem, para os três reservatórios simulados. Observa-se que o modelo se mostrou representativo do escoamento das três bacias hidrográficas dos açudes, apresentando coeficiente NSE acima do limite classificado como “aceitável”, segundo a classificação de Gottschalk e Motovilov (2000), ou seja, $NSE > 0,36$.

Figura 38 – Coeficientes de Nash-Sutcliffe para as etapas de calibração e validação do modelo AguiarVM aplicado aos reservatórios Cedro, General Sampaio e Joaquim Távora, no Ceará.



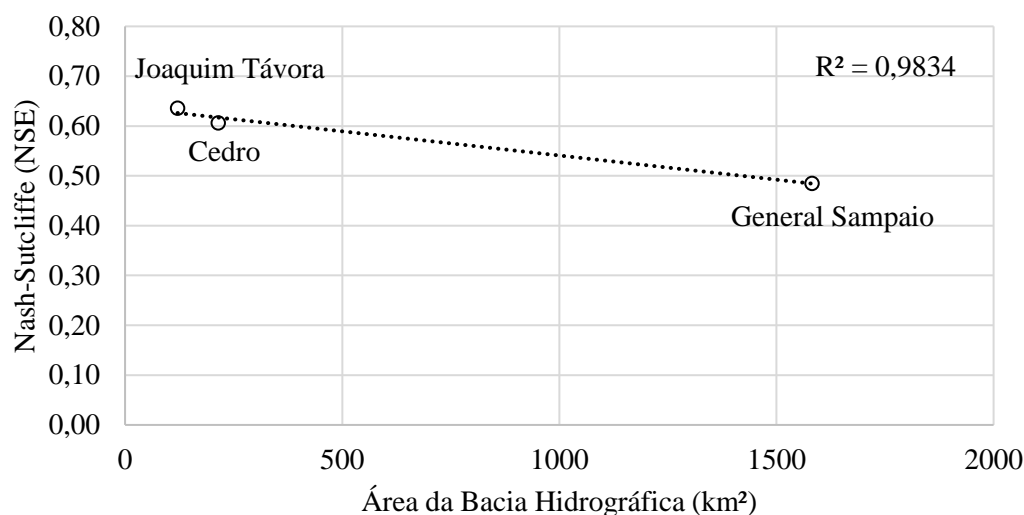
Fonte: Autor

Não obstante o bom desempenho do modelo, observa-se a pouca aderência do modelo nas vazões extremas. Esta característica pode ser causada pelo fato de a vazão ser proveniente, unicamente, da lâmina de chuva, sem se considerar a umidade antecedente do solo. Isto, portanto, torna o modelo limitado para estudos de eventos extremos e dimensionamento de obras de interferência hídrica, por exemplo. No entanto, para caracterização de regime hidrológico médio e de disponibilidade hídrica, o modelo apresenta-se válido, principalmente em áreas com escassez de dados.

Comparando-se os resultados obtidos (NSE de calibração) com a magnitude da área das bacias hidrográficas dos reservatórios, observa-se maior representatividade do escoamento quanto menor é a bacia, conforme indica a linha de tendência da Figura 39. Essa característica é observada em modelos mais simplistas, a exemplo do Método Racional, recomendado para bacias de até 3 km². Para modelos de forte base física, a exemplo do WASA, o efeito compensatório entre processos simulados confere uma característica inversa, isto é, apresenta

resultados melhores, quanto maior a área modelada (LOPES, 2013). Não obstante, o modelo AguiarVM apresentou baixa variação de validade (NSE) frente à alta variação de área, indicando aplicabilidade para a faixa de áreas dos casos simulados.

Figura 39 – Relação entre o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE de calibração) e a área da bacia hidrográfica dos açudes General Sampaio, Cedro e Joaquim Távora, Ceará.



Fonte: Autor

No que tange à comparação entre a vazão anual calculada pelo método original de Aguiar e o somatório das vazões mensais de determinado ano, obtidas pelo modelo AguiarVM, a Tabela 9 apresenta os resultados.

Tabela 9 – Dados comparativos entre a vazão anual observada, a vazão anual calculada pelo método de Aguiar e o somatório anual das vazões mensais, obtidas pelo modelo AguiarVM nas bacias hidrográficas dos açudes Cedro, General Sampaio e Joaquim Távora, no Ceará.

Açude	Fator de ajuste mensal Ω	Calibração			Validação		
		Va Obs ¹ (hm ³)	Va Aguiar ² (hm ³)	ΣVm AguiarVM ³ (hm ³)	Va Obs ¹ (hm ³)	Va Aguiar ² (hm ³)	ΣVm AguiarVM ³ (hm ³)
Cedro	1,32	17	31	18	21	34	20
General Sampaio	0,72	221	134	221	268	140	229
Joaquim Távora	0,87	14	10	13	20	18	23

¹ Média das vazões anuais observadas;

² Média das vazões anuais calculadas pelo método de Aguiar;

³ Média do somatório anual das vazões mensais obtidas pelo modelo AguiarVM.

Fonte: Autor

Conforme observado na Tabela 9, o método de Aguiar superestimou as vazões anuais na bacia do açude Cedro e as subestimou nas bacias dos açudes General Sampaio e Joaquim Távora. Com isso a calibração do parâmetro Ω do modelo AguiarVM buscou minimizar a superestimativa da vazão anual calculada pelo método de Aguiar, no caso do açude Cedro, elevando o valor do referido parâmetro. Nos casos das bacias dos açudes General Sampaio e Joaquim Távora, a subestimação do método de Aguiar foi compensada na calibração do parâmetro Ω , em que este recebeu valores inferiores à unidade, elevando os valores de vazão escoada.

Dado o exposto, avalia-se o modelo hidrológico AguiarVM como eficiente. Apesar de demandar apenas uma variável independente (precipitação) e um parâmetro (de ajuste mensal – Ω – calibrável), o modelo auferiu resultados compatíveis com as medidas de campo.

4.2 Aplicação do modelo de operação

4.2.1 Etapa de diagnóstico

A partir dos dados de levantamento volumétrico do açude Marengo realizado pelo Grupo HIDROSED (LOPES, 2013), considerou-se um estoque hídrico superficial total de 15,8 hm³, conforme Tabela 10, que mostra a relação Cota-Área-Volume do referido reservatório.

Tabela 10 – Tabela Cota-Área-Volume do açude Marengo

Cota (m)	Área (m ²)	Volume (m ³)
280,0	0	0
280,1	2.496	1.724
282,1	40.308	30.191
284,1	217.289	254.562
286,1	503.188	982.982
288,1	840.467	2.306.177
290,1	1.283.150	4.396.505
291,6	1.649.300	6.604.562
294,1	2.129.261	11.303.960
296,0	2.719.635	15.766.814

Fonte: Lopes (2013)

No que diz respeito às demandas existentes no Açude Marengo, estas são, principalmente, de abastecimento humano com captação a partir da sua bacia hidráulica. De acordo com Pinheiro (2011), entre 2009 e 2010, o número de pessoas abastecidas pelo reservatório era de 394, correspondendo a cerca de 80 famílias. Mais recentemente, a COGERH

emitiu a Nota Técnica 007/2017, atualizando este valor para 103 famílias, conforme descrito na Tabela 11 (CEARÁ, 2017).

Tabela 11 – Diagnóstico de demanda para abastecimento humano do Açude Marengo

Comunidade	Localização em relação ao Açude Marengo	Nº de famílias	Vazão estimada (L/s)
Quieto I	Montante	48	0,28
Vila e Raiz	Jusante	16	0,09
Quieto II	Jusante	39	0,23
Total		103	0,60

Fonte: Ceará (2017)

Com respeito a demandas para irrigação,

praticamente não há demandas de irrigação a montante do reservatório. [...] Em anos anteriores, com suporte da COGERH, foram realizadas reuniões para discussão da perenização do Riacho São Nicolau para avaliação da possibilidade do atendimento às demandas de jusante: irrigação para o desenvolvimento das culturas de Banana, Mamão e Feijão. De acordo com o relato da comunidade local não houve diretriz de liberação de vazão para o referido riacho. Segundo o relatado, por conta própria, usuários de jusante realizaram a abertura da estrutura de saída do açude, tornando a operação conflituosa e desproporcional. Uma vez cessada a perenização do riacho, pela incapacidade hídrica do açude, os usos de jusante passaram a ser atendidos por meio da escavação de poços profundos e poços rasos que são supridos pelo fluxo de base da aluvião, decorrente da revência natural do reservatório (CEARÁ, 2017).

Com isso, a demanda total do açude Marengo, na configuração diagnosticada se resume ao abastecimento humano de três comunidades, totalizando uma vazão de $0,60 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$, e irrigação de montante, insignificante.

4.2.2 Cenários de tendência de chuvas

A partir dos dados do posto pluviométrico Madalena (código ANA 00439063), calcularam-se os vetores anuais de precipitação (normais de janeiro a dezembro) nas condições abaixo da média, na média e acima da média histórica. Para os meses de fevereiro a maio (quadra chuvosa), a variação média observada quando da ocorrência de chuvas abaixo da média foi de 0,63 (isto é, 63% menor que a média) e de 0,87 quando da ocorrência de chuvas acima da média (isto é, 87% maior que a média). Esses resultados atestam elevada variabilidade nas chuvas da região (MEDEIROS; DE ARAÚJO, 2014; MARENGO, 2009).

Tabela 12 – Estimativas de precipitações médias, abaixo da média e acima da média na bacia hidrográfica do açude Marengo (1988 – 2021)

Mês	P _{média} (mm)	P _{abaixo} (mm)	P _{acima} (mm)
Jan	54,0	11,6	139,7
Fev	71,2	27,0	138,8
Mar	122,2	52,4	195,1
Abr	135,3	53,0	251,9
Mai	79,1	22,4	163,6
Jun	38,2	8,6	83,6
Jul	21,1	2,2	49,6
Ago	4,0	0,0	30,9
Set	0,8	0,0	28,0
Out	0,4	0,0	12,8
Nov	1,2	0,0	12,6
Dez	10,4	0,0	42,9

Fonte: Autor

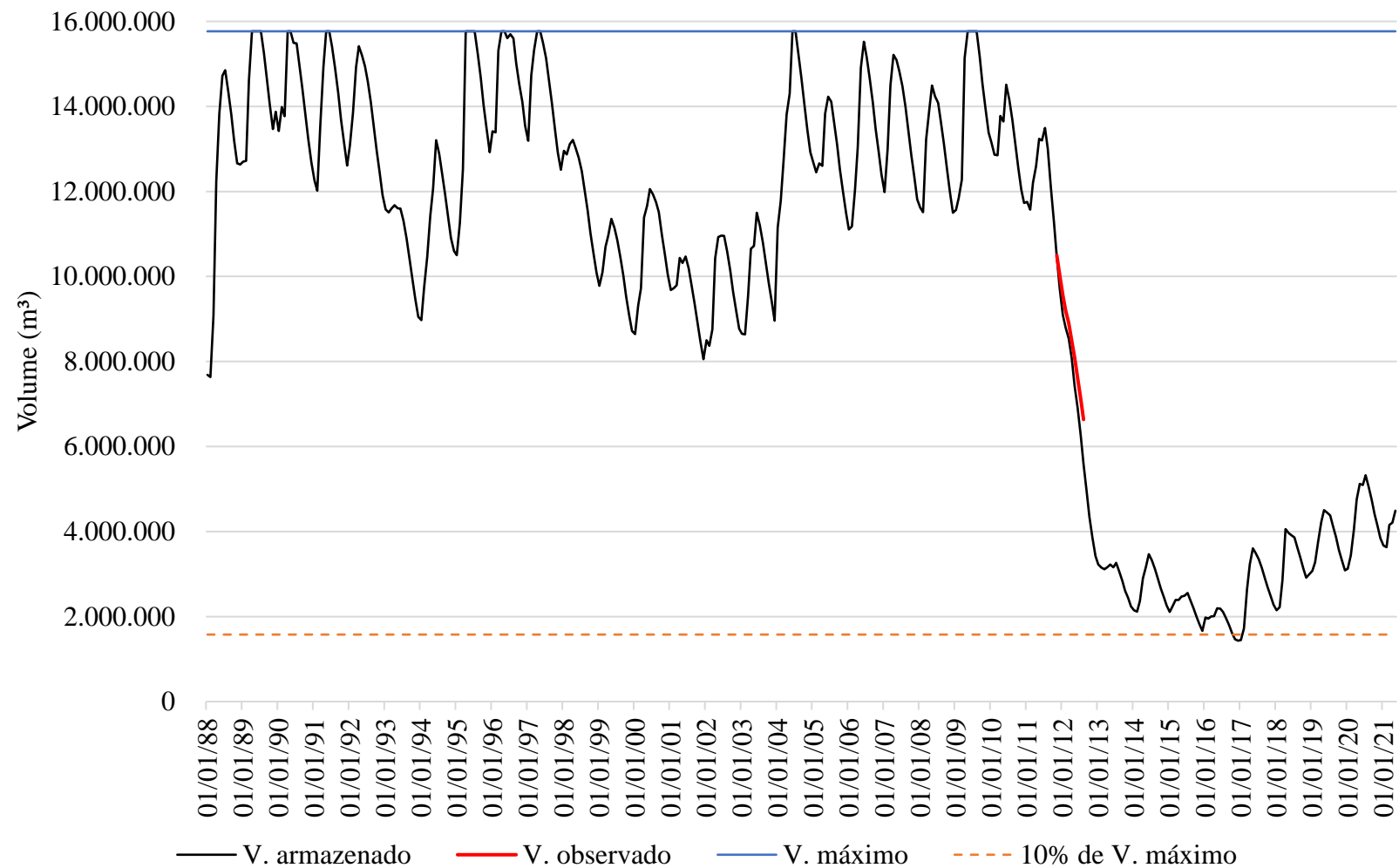
4.2.3 Modelagem hidrológica

Uma vez calculados os vetores de precipitações, aplicaram-se os dois modelos hidrológicos chuva-vazão a fim de serem obtidos os respectivos valores de vazões escoadas: o modelo SMAP (LOPES *et al.*, 1981, 1982) e o modelo AguiarVM.

Modelagem pelo modelo SMAP

Realizando-se a simulação do balanço hídrico com a otimização dos parâmetros calibráveis do modelo SMAP, obtiveram-se os resultados expostos na Figura 40. Na parametrização, *Sat* e *Pes* foram calibrados com os valores 3.206 e 2,03, respectivamente, obtendo-se $NSE = 0,92$ para a correlação entre o volume observado e volume calculado, no período de 11/2011 a 08/2012.

Figura 40 – Evolução volumétrica simulada (com afluentes provenientes do modelo SMAP) e observada no Açude Marengo.

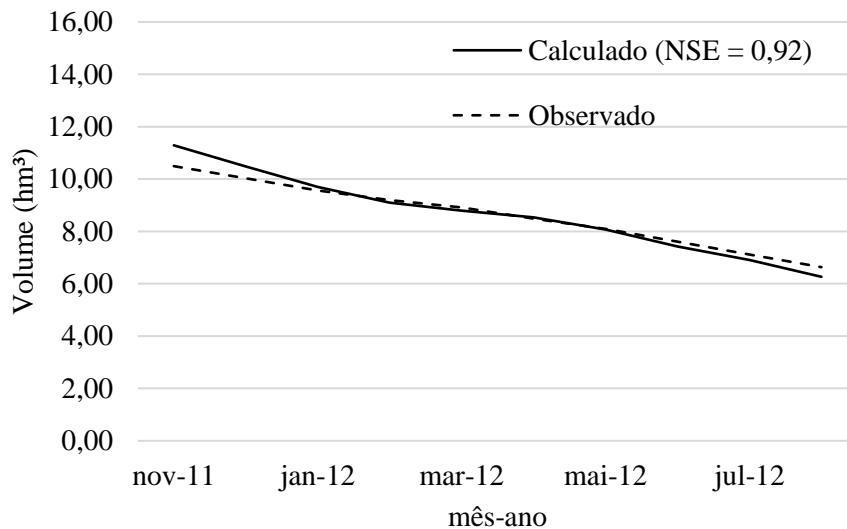


Fonte: Autor

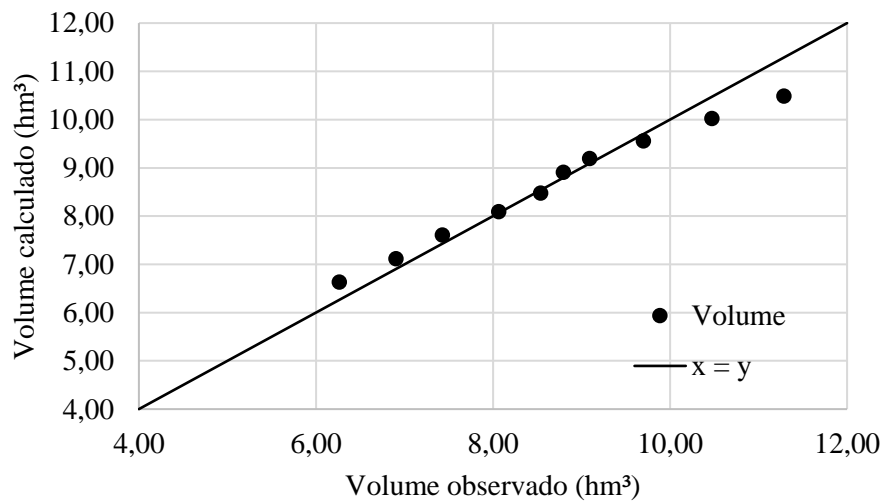
A Figura 41 mostra os dados medidos e modelados, exclusivamente, do período de realização do monitoramento volumétrico do açude Marengo.

Figura 41 – Dados observados e calculados da evolução volumétrica do açude Marengo, com aflúências provenientes do modelo SMAP calibrado.

a) Volume armazenado



b) Comparativo entre volumes observados e calculados

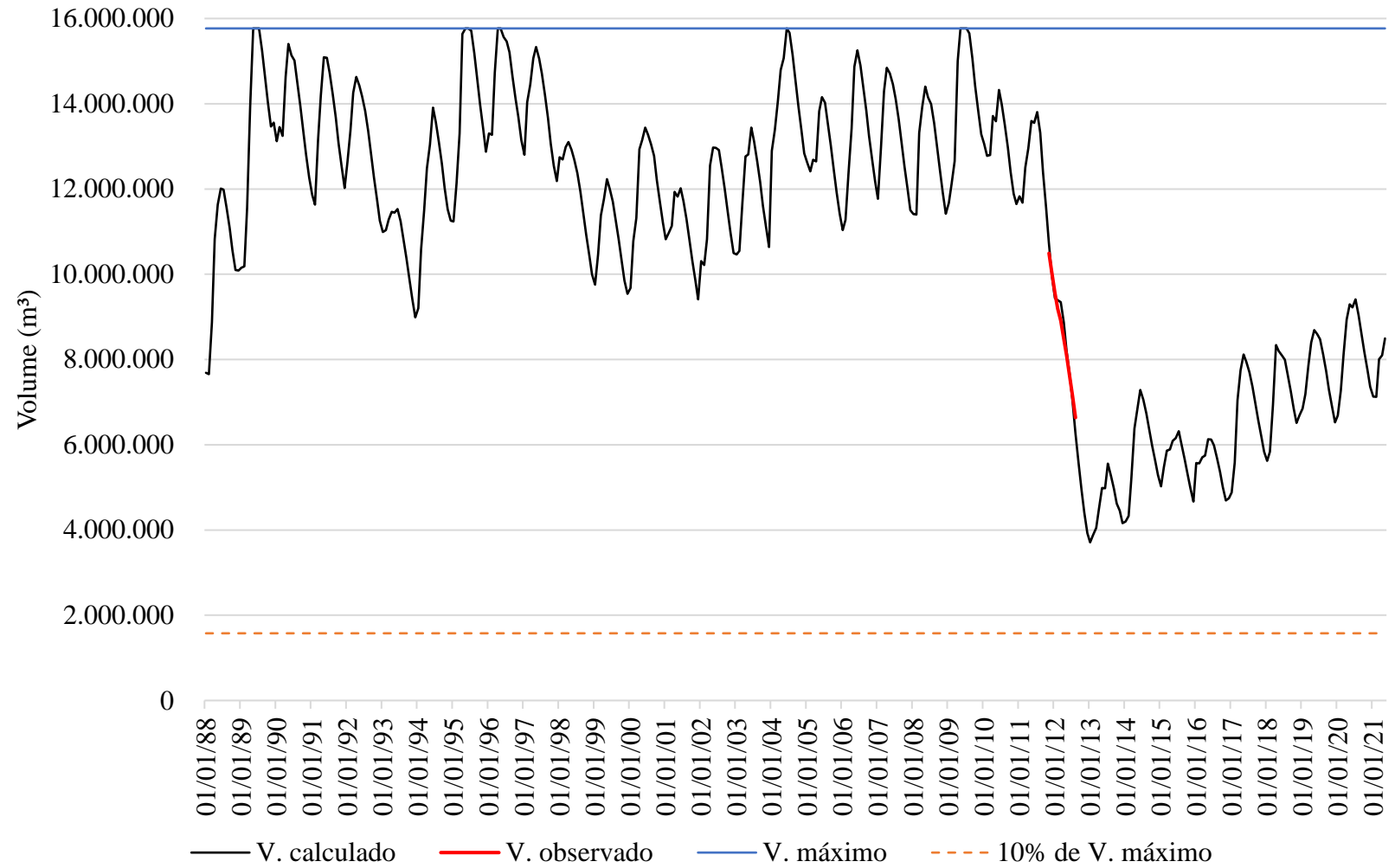


Fonte: Autor

Modelagem pelo modelo AguiarVM

Realizando-se a calibração (com base no balanço hídrico) dos parâmetros do modelo AguiarVM, obtiveram-se os resultados da Figura 42. Na parametrização, U e Ω foram calibrados com os valores 0,65 e 0,93, respectivamente, obtendo-se $NSE = 0,70$ para a correlação entre o volume observado e volume calculado, no período de 11/2011 a 08/2012.

Figura 42 – Evolução volumétrica simulada (com aflúências provenientes do modelo AguiarVM) e observada no Açude Marengo.

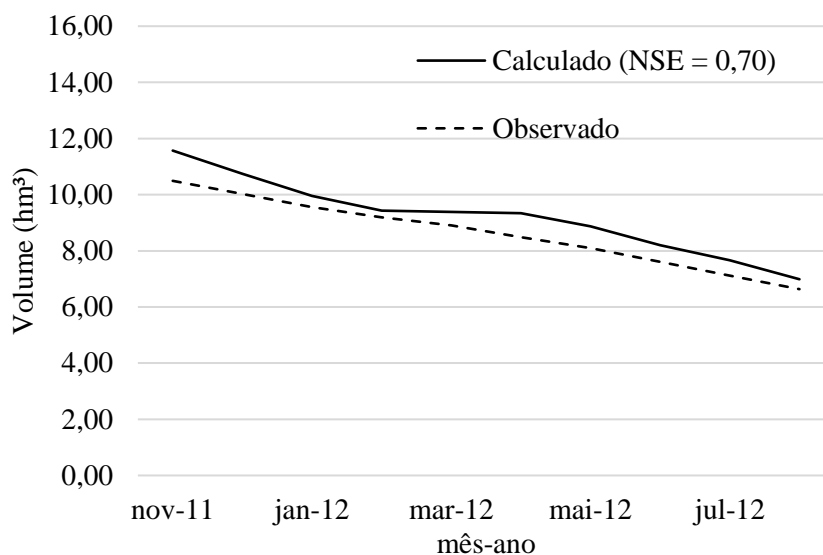


Fonte: Autor

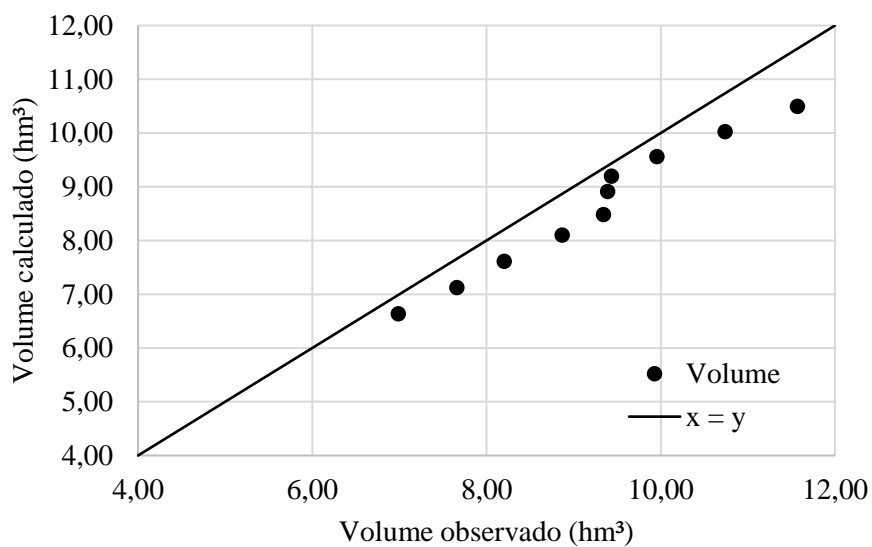
A Figura 43 mostra os dados medidos e modelados, exclusivamente, do período de realização do monitoramento volumétrico do açude Marengo.

Figura 43 – Evolução volumétrica do açude Marengo, com aflúências provenientes do modelo AguiarVM calibrado.

a) Volume armazenado



b) Comparativo entre volumes observados e calculados



Fonte: Autor

Apesar de um bom ajuste dos modelos para o período medido (11/2011 a 08/2012), observa-se que o mesmo é relativamente curto, configurando-se como de baixa representatividade. Esta situação, contudo, é o que se espera em sistemas hídricos não-monitorados. Na ausência total de dados desta natureza, a parametrização do modelo hidrológico poderia ser realizada em um dos reservatórios pertencentes à rede de monitoramento do sistema de recursos hídricos do estado (prioritariamente aquele em que sua bacia hidrográfica inclui o pequeno açude em análise) e extrapolada ao sistema hídrico em pauta.

Aplicação dos modelos hidrológicos aos vetores anuais de precipitação

Realizadas as calibrações dos parâmetros dos modelos hidrológicos, esses foram aplicados na modelagem chuva-vazão da bacia do açude Marengo, a partir dos vetores de precipitação obtidos para as condições de pluviometria média, abaixo da média e acima da média. As Tabelas 13 e 14 expõem os dados obtidos com as modelagens realizadas pelos modelos SMAP e AguiarVM, respectivamente, enquanto as figuras 44, 45 e 46 mostram, graficamente, a comparação dos hidrogramas resultantes dos dois modelos.

Tabela 13 – Modelagem chuva-vazão para as condições de precipitações médias, abaixo da média e acima da média, para a bacia hidrográfica do Açude Marengo, Ceará, utilizando-se o modelo SMAP.

Mês	Vazão escoada (m ³ .s ⁻¹)		
	Média	Abaixo da média	Acima da média
Jan	0,133	0,027	0,373
Fev	0,180	0,060	0,431
Mar	0,346	0,119	0,740
Abr	0,454	0,127	1,235
Mai	0,298	0,055	0,972
Jun	0,149	0,021	0,535
Jul	0,079	0,005	0,315
Ago	0,014	0,000	0,184
Set	0,003	0,000	0,152
Out	0,001	0,000	0,061
Nov	0,003	0,000	0,053
Dez	0,021	0,000	0,162

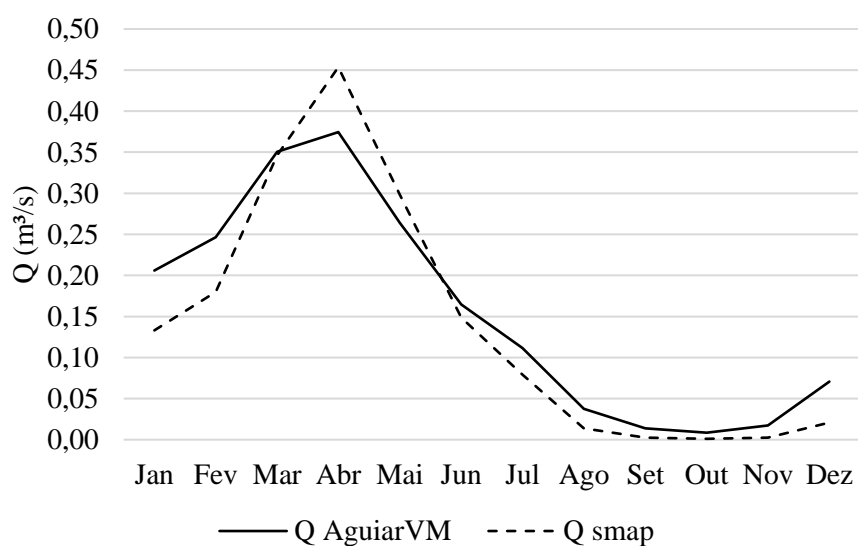
Fonte: Autor

Tabela 14 – Modelagem chuva-vazão para as condições de precipitações médias, abaixo da média e acima da média, para a bacia hidrográfica do Açude Marengo, Ceará, utilizando-se o modelo AguiarVM.

Mês	Vazão escoada ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		
	Média	Abaixo da média	Acima da média
Jan	0,206	0,028	1,371
Fev	0,247	0,049	1,365
Mar	0,350	0,075	1,704
Abr	0,374	0,075	2,011
Mai	0,264	0,043	1,519
Jun	0,165	0,023	0,982
Jul	0,112	0,009	0,700
Ago	0,038	0,000	0,514
Set	0,014	0,000	0,482
Out	0,008	0,000	0,290
Nov	0,017	0,000	0,288
Dez	0,071	0,000	0,636

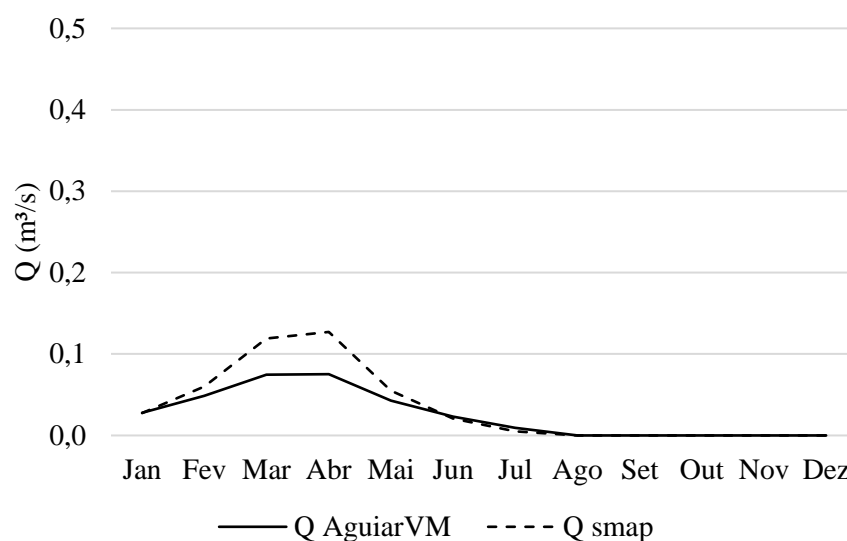
Fonte: Autor

Figura 44 – Hidrogramas resultantes da modelagem hidrológica pelos modelos SMAP e AguiarVM na bacia do Açude Marengo, Ceará, para a condição de precipitações médias.



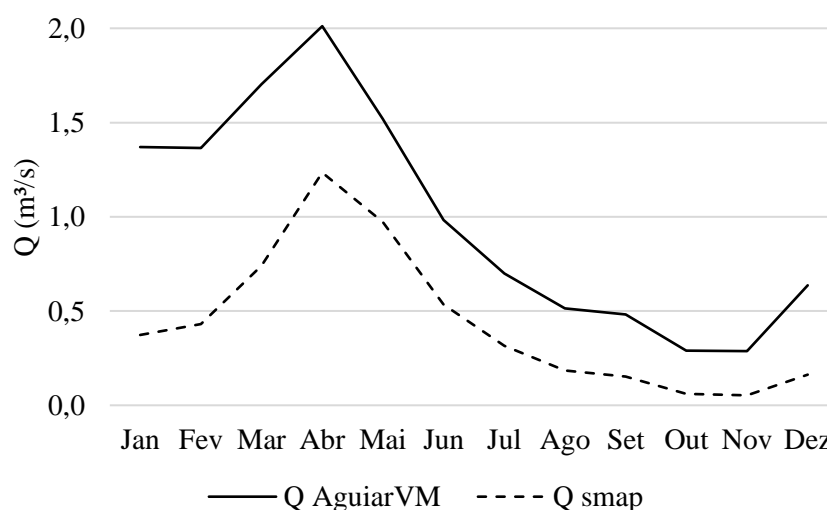
Fonte: Autor

Figura 45 – Hidrogramas resultantes da modelagem hidrológica pelos modelos SMAP e AguiarVM na bacia do Açude Marengo, Ceará, para a condição de precipitações abaixo da média.



Fonte: Autor

Figura 46 – Hidrogramas resultantes da modelagem hidrológica pelos modelos SMAP e AguiarVM na bacia do Açude Marengo, Ceará, para a condição de precipitações acima da média.



Fonte: Autor

À luz da comparação entre os hidrogramas, para cada cenário de tendência de chuvas, observou-se congruência entre os modelos AguiarVM e SMAP, sobretudo em condições de média pluviosidade (Figura 44). A partir destes resultados, a vazão média específica, definida como a relação entre a vazão média de longo período e a área da bacia ($q = Q_m \cdot A^{-1}$) foi calculada em $1,9 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ e $2,1 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ para os modelos SMAP e AguiarVM,

respectivamente. Estes resultados condizem cabalmente com o obtido nos estudos de regionalização de vazões dos rios das sub-bacias Acaraú e Jaguaribe, realizados pela Universidade Federal do Ceará – UFC, em que se estimou o referido parâmetro entre 2,0 e 2,5 $L \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ para a região em questão (UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ, 2001). Estes resultados, portanto, evidenciam não apenas concordância do Modelo AguiarVM com o Modelo SMAP, como também sua congruência com dados medidos no sertão semiárido do Ceará.

4.2.4 Estimativa da disponibilidade hídrica

A fim de se estimar a vazão com 90% de garantia (Q_{90}), a partir da série sintética de vazões provenientes de cada modelo (utilizando-se toda a série histórica de precipitações), foram extraídos os parâmetros, média (μ), desvio padrão (σ), coeficiente de variação (CV) e demais parâmetros de entrada do modelo VYELAS (Tabela 15).

Tabela 15 – Parâmetros do modelo VYELAS para obtenção das curvas de garantia do reservatório Marengo, a partir dos modelos SMAP e AguiarVM.

Parâmetro	Fonte de dados/forma de obtenção	Valores	
		Modelo SMAP	Modelo AguiarVM
Vazão afluente média (μ)	Calculado a partir das vazões obtidas pelos modelos hidrológicos	3,38 $hm^3 \cdot ano^{-1}$	3,11 $hm^3 \cdot ano^{-1}$
Coeficiente variação da vazão afluente (CV)	Calculado a partir das vazões anuais	0,85	0,41
Coeficiente de forma do Reservatório (α)	Calculado a partir da tabela cota-área-volume do reservatório	4.033	4.033
Evaporação no período Seco (E)	Normais climatológicas do Brasil para o município correspondente (INMET)	1,343 $m \cdot ano^{-1}$	1,343 $m \cdot ano^{-1}$
Capacidade do Reservatório	Obtido da tabela cota-área-volume do reservatório	15,8 hm^3	15,8 hm^3
Volume operacional Mínimo	10% da capacidade máxima	1,58 hm^3	1,58 hm^3
Volume inicial no primeiro ano	50% da capacidade máxima do reservatório	7,88 hm^3	7,88 hm^3
Nº de vazões-meta na simulação	Arbitrado	100	100
Mínima liberação anual	Menor valor de vazão afluente histórica	0,29 $hm^3 \cdot ano^{-1}$	0,88 $hm^3 \cdot ano^{-1}$
Máxima liberação anual	Igual à capacidade máxima do reservatório por ano	15,8 $hm^3 \cdot ano^{-1}$	15,8 $hm^3 \cdot ano^{-1}$
Número de simulações estocástica para cada vazão-meta	Arbitrado	50.000	50.000

Fonte: Autor

Além do cálculo da vazão com 90% de garantia (Q_{90}), para a série sintética de vazões resultantes dos modelos SMAP e AguiarVM, também foram calculadas as vazões Q_{99} e Q_{80} , expostas na Tabela 16. Lopes (2016), utilizando o modelo WASA para geração de série sintética de vazões, estimou a Q_{90} do açude Marengo em de $1,23 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$.

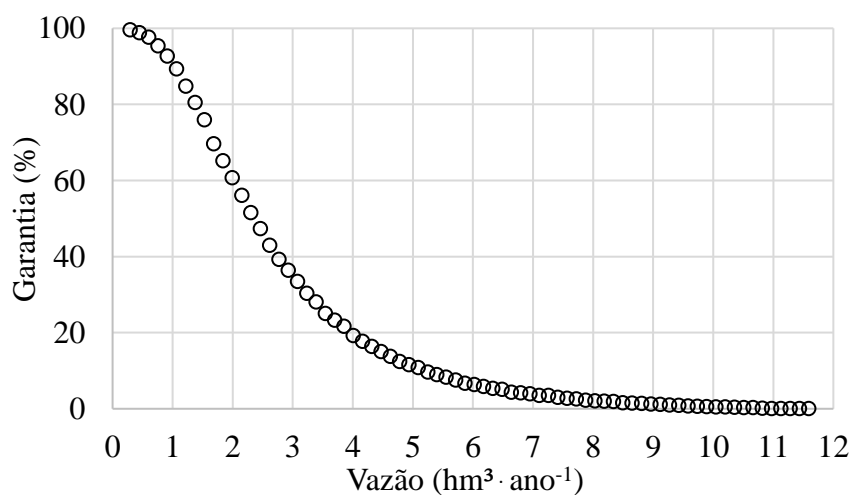
Tabela 16 – Disponibilidade hídrica para diferentes níveis de garantia do açude Marengo

Vazão de retirada em função da garantia	Modelo SMAP ($\text{hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)	Modelo AguiarVM ($\text{hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$)
Q_{99}	0,42	0,96
Q_{90}	1,04	1,36
Q_{80}	1,39	1,59

Fonte: Autor

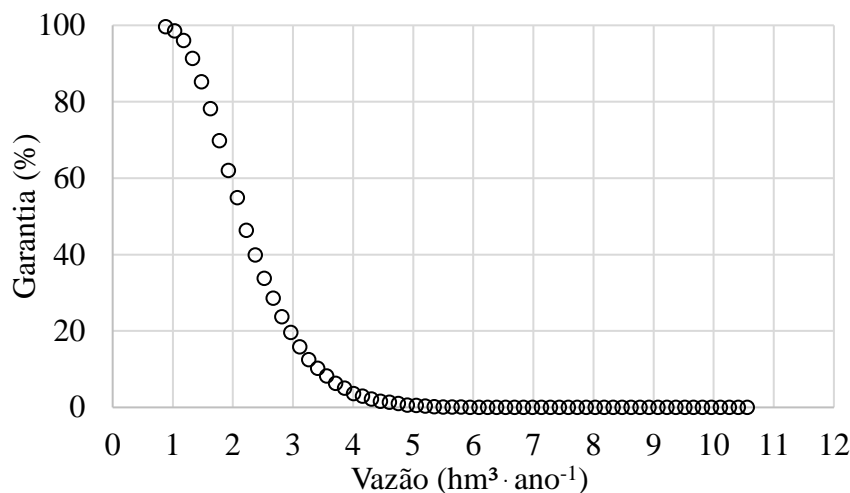
As curvas de garantia obtidas a partir da geração de série sintética de vazões provenientes dos modelos SMAP e AguiarVM estão expostas nas Figuras 47 e 48, respectivamente. A partir destes resultados, constatou-se uma subutilização do recurso hídrico do açude Marengo, que possui uma demanda instalada atual de apenas $0,02 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$, restrita ao abastecimento humano de três comunidades (CEARÁ, 2017).

Figura 47 – Curva de garantia do Açude Marengo, a partir da série sintética de vazões resultantes do Modelo SMAP.



Fonte: Autor

Figura 48 – Curva de garantia do Açude Marengo, a partir da série sintética de vazões resultantes do Modelo AguiarVM.



Fonte: Autor

Frente aos resultados obtidos, sobretudo no que tange ao grau de representatividade do volume medido no açude Marengo (Item 4.3) e à caracterização do regime de vazões afluentes, verificou-se razoabilidade na representatividade da bacia hidrográfica do açude Marengo, para os dois modelos simulados.

Deste ponto da pesquisa, contudo, optou-se pela realização da montagem dos cenários, simulações e otimizações de operação, a partir de vazões escoadas provenientes do modelo SMAP. O modelo SMAP, modelo já consolidado no meio técnico e acadêmico, não apresenta a limitação detectada no modelo AguiarVM, na representatividade de picos de vazões mais elevadas, conforme discutido no tópico 4.1 deste trabalho.

4.2.5 Montagem e simulação de cenários

A fim de se verificar a aplicabilidade do modelo de operação proposto de forma mais abrangente, para o sistema hídrico do açude Marengo, foram montados cenários que consideram incremento na demanda atual, tais como demandas de dessedentação animal e de irrigação. O cenário 1, menos restritivo, contempla a busca pelo atendimento da demanda real atual e dos incrementos simulados. Nos Cenários 2 e 3, são impostas restrições de atendimento às demandas e, por fim, o cenário 4 representa a realidade atual de demanda hídrica do reservatório em pauta, a saber, o abastecimento humano de três comunidades. Dada esta realidade atual do sistema hídrico, destaca-se que, a partir deste ponto da pesquisa, a montagem e simulação dos cenários, assim como as etapas de deliberação participativa, otimização da regra de operação e operação do sistema hídrico se deram de forma exemplificativa. A inserção exemplificativa de

demandas hídricas ao sistema justifica-se, portanto, pela impossibilidade de se verificar a aplicabilidade do modelo proposto, de forma mais extensiva, com apenas uma demanda fixa.

O incremento de demanda considerado contempla a criação total de 170 cabeças de caprinos, 110 de muares, 270 galinhas, 75 ovinos, 30 suínos, 312 cabeças de gado bovino e, ainda, o cultivo de 150 hectares de capim para o suprimento da alimentação do gado leiteiro e a implantação de 15 hectares de banana, cujas estimativas de demanda hídrica são mostradas, a seguir. Para a aplicação do modelo de operação proposto em um sistema hídrico que possua uma demanda instalada que apresente tais tipologias de uso, estas estimativas devem ser realizadas na etapa de diagnóstico, conforme o item 3.3.1. Pela Equação 34, considerando o consumo *per capita* constante no Quadro 4, obteve-se o disposto na Tabela 17:

Tabela 17 – Estimativa de demanda hídrica para dessedentação animal.

Animal	Cabeças	Per capita (L. animal ⁻¹ . dia ⁻¹)	Q (L.s ⁻¹)	Q (L.mês ⁻¹)
Caprinos	170	8	0,02	41
Burros ou Cavalos	110	35	0,04	116
Galinhas	270	0,1	0,00	1
Ovelhas	75	8	0,01	18
Porcos	30	15	0,01	14
Vacas leiteiras	312	90	0,33	842
Demanda total (Des. Animal):			0,40	1.031

Fonte: Autor

Para a estimativa de demanda para irrigação, considerando-se as premissas dos itens a seguir, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 18:

- a) suprimento hídrico das culturas, no primeiro semestre, exclusivamente pela água das chuvas, necessitando irrigação apenas no segundo semestre de cada ano;
- b) implantação da cultura da banana, a partir do segundo semestre do primeiro ano do período da alocação;
- c) utilização de sulcos, como método irrigação da cultura da banana e o método de aspersão, para o capim;
- d) lâmina de evapotranspiração potencial de referência (ET₀) igual à do município de Quixeramobim, conforme Tabela 3.

Tabela 18 – Cálculo de demanda hídrica mensal para irrigação

Banana						
Mês	ET0 (mm)	Kc	ETc (mm)	Ef	A (ha)	Virr (m ³)
Jul	158,1	1,0	158,1	0,5	15,0	47.430
Ago	177,0	1,0	177	0,5	15,0	53.100
Set	182,9	1,0	182,9	0,5	15,0	54.870
Out	201,1	1,2	241,32	0,5	15,0	72.396
Nov	205,2	1,2	246,24	0,5	15,0	73.872
Dez	221,4	1,2	265,68	0,5	15,0	79.704
Capim						
Mês	ET0 (mm)	Kc	ETc (mm)	Ef	A (ha)	Virr (m ³)
Jul	158,1	0,75	118,575	0,75	150,0	237.150
Ago	177,0	0,75	132,75	0,75	150,0	265.500
Set	182,9	0,75	137,175	0,75	150,0	274.350
Out	201,1	0,75	150,825	0,75	150,0	301.650
Nov	205,2	0,75	153,9	0,75	150,0	307.800
Dez	221,4	0,75	166,05	0,75	150,0	332.100

Fonte: Autor

Por fim, realizando-se, para cada mês, o somatório das demandas correspondentes, obteve-se os resultados expostos na Tabela 19.

Tabela 19 – Demanda total mensal do sistema hídrico.

Mês	Demanda hídrica (m ³)	Mês	Demanda hídrica (m ³)
Jan	2.576	Jul	287.156
Fev	2.576	Ago	321.176
Mar	2.576	Set	331.796
Abr	2.576	Out	376.622
Mai	2.576	Nov	384.248
Jun	2.576	Dez	414.380

Fonte: Autor

Para o sistema hídrico, os cenários de alocação propostos para discussão e deliberação participativas são expostos na Tabela 20:

Tabela 20 – Cenários de alocação para o sistema hídrico do açude Marengo, Ceará.

Cenário	Ab. humano		Des. Animal		Irrigação		Q _{lib} média (L.s ⁻¹)
	Q _{lib} (L.s ⁻¹)	% Atend	Q _{lib} (L.s ⁻¹)	% Atend	Q _{lib} (L.s ⁻¹)	% Atend	
Cenário 1	0,60	100%	0,40	100%	67,51	100%	68,51
Cenário 2	0,60	100%	0,38	95%	50,63	47%	33,00
Cenário 3	0,60	100%	0,36	90%	33,76	20%	14,46
Cenário 4	0,60	100%	0,00	0%	0,00	0%	0,60

Fonte: Autor

Em cada cenário, apresenta-se, para cada tipologia de uso, a vazão a ser liberada e seu percentual de atendimento em relação à demanda total estimada. O Cenário 1 corresponde à suposição de atendimento pleno a todas as demandas do sistema. O Cenário 2 supõe a restrição

de 5% na liberação para dessedentação animal e, ainda, restrição de 53% ao atendimento da demanda hídrica para irrigação. Os Cenários 3 e 4 apresentam condições mais restritivas no atendimento às demandas.

O Cenário 1 apresenta um conjunto de demandas cuja vazão requerida está acima da vazão de referência Q_{90} , estimada, anteriormente, em $33 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ ($1,04 \text{ hm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$). O Cenário 2 apresenta uma demanda total igual à vazão de referência, os Cenários 3 e 4 apresentam vazões abaixo da Q_{90} , sendo o Cenário 4, o representativo da demanda real atual do sistema hídrico do açude Marengo.

Os cenários de alocação originaram, por meio de simulações de balanço hídrico (Equação 23), os cenários de operação, apresentados nas Tabelas 21, 22 e 23, nas condições de chuvas na média, abaixo da média e acima da média histórica, respectivamente. Na realização do balanço hídrico, considerou-se um volume inicial de 50% da capacidade máxima do reservatório: $7,88 \text{ hm}^3$.

Tabela 21 – Cenários de Operação do sistema hídrico do açude Marengo para a condição de chuvas na média.

CENÁRIO	$Q_{\text{méd}}$ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{inicial} (m^3)	V_{inicial} (%)	V_{final} (m^3)	V_{final} (%)	ΔVolume (m^3)	ΔVolume (%)
Cenário 1	68,51	7.883.407	50%	4.059.405	26%	-3.824.001	-24%
Cenário 2	33,00	7.883.407	50%	5.927.562	38%	-1.955.845	-12%
Cenário 3	14,46	7.883.407	50%	6.927.775	44%	-955.632	-6%
Cenário 4	0,60	7.883.407	50%	7.679.218	49%	-204.189	-1%

Fonte: Autor

Tabela 22 – Cenários de Operação do sistema hídrico do açude Marengo para a condição de chuvas abaixo da média.

CENÁRIO	$Q_{\text{méd}}$ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{inicial} (m^3)	V_{inicial} (%)	V_{final} (m^3)	V_{final} (%)	ΔVolume (m^3)	ΔVolume (%)
Cenário 1	68,51	7.883.407	50%	1.381.408	9%	-6.501.998	-41%
Cenário 2	33,00	7.883.407	50%	3.095.969	20%	-4.787.437	-30%
Cenário 3	14,46	7.883.407	50%	4.007.138	25%	-3.876.269	-25%
Cenário 4	0,60	7.883.407	50%	4.694.603	30%	-3.188.804	-20%

Fonte: Autor

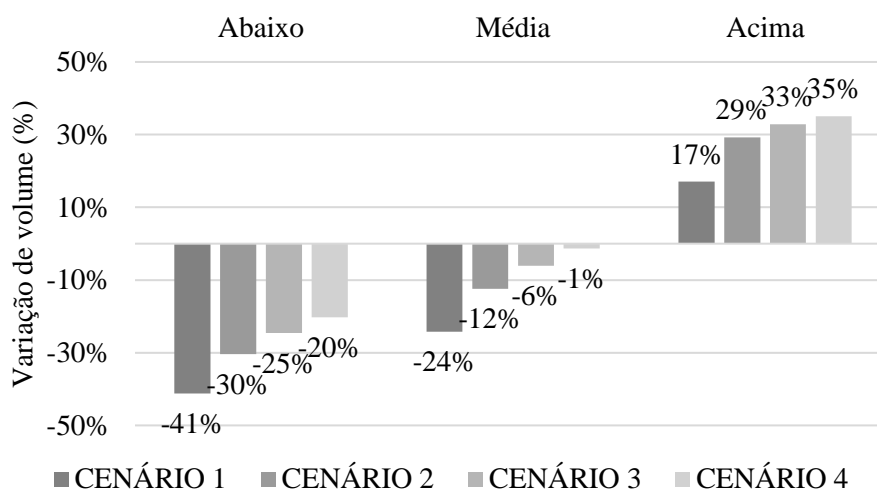
Tabela 23 – Cenários de Operação do sistema hídrico do açude Marengo para a condição de chuvas acima da média.

CENÁRIO	$Q_{\text{méd}}$ ($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)	V_{inicial} (m^3)	V_{inicial} (%)	V_{final} (m^3)	V_{final} (%)	ΔVolume (m^3)	ΔVolume (%)
Cenário 1	68,51	7.883.407	50%	10.573.547	67%	2.690.140	17%
Cenário 2	33,00	7.883.407	50%	12.494.517	79%	4.611.111	29%
Cenário 3	14,46	7.883.407	50%	13.060.838	83%	5.177.431	33%
Cenário 4	0,60	7.883.407	50%	13.410.424	85%	5.527.017	35%

Fonte: Autor

Realizada a montagem dos cenários de operação, duas abordagens de análise foram feitas, a fim de se verificar o comportamento da variação de volume do reservatório. Na primeira análise, fixou-se o volume inicial de 7,88 hm³ (50% do volume total acumulável) e variou-se o cenário de operação e a condição de ocorrência de chuvas. Os resultados desta primeira abordagem estão expostos no gráfico da Figura 49.

Figura 49 – Variação do volume do reservatório Marengo para diferentes cenários de operação (Cenários 1, 2, 3 e 4) nas diferentes condições de ocorrência de chuva (Abaixo da média, na média e acima da média).



Fonte: Autor

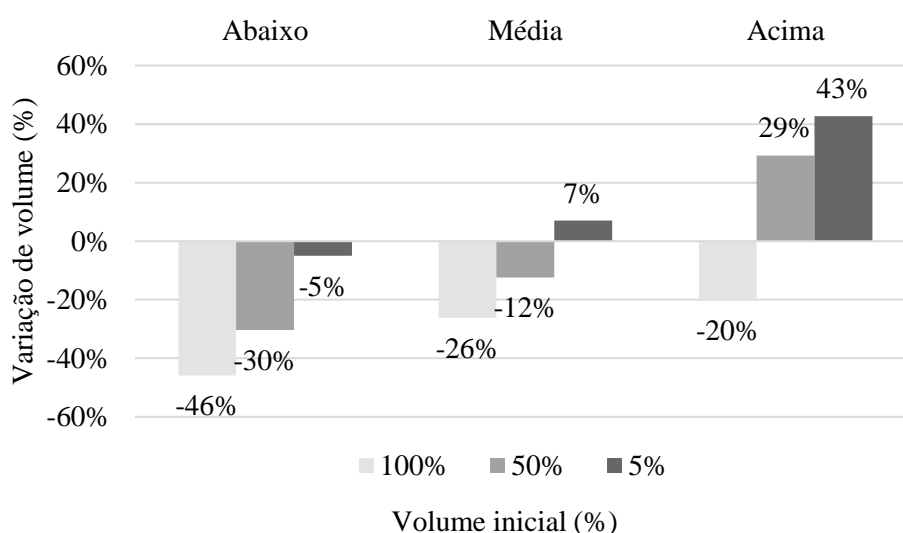
Observou-se que, nos quatro cenários simulados, a variação volumétrica é negativa para a condição de chuvas médias e abaixo da média, e positiva para a condição de chuvas acima da média. Uma observação importante é a variação volumétrica de baixa magnitude (quase nula) para a condição de pluviometria média no Cenário 4, que corresponde ao cenário atual da área de estudo. Este resultado pode favorecer uma inferência de que a população não tenha, de forma natural, imposta ao reservatório, uma pressão de demanda acima de sua capacidade de retornar ao estado inicial do período observado. Considerando-se razoável esta inferência, este fato pode ser fruto da experiência e conhecimento da dinâmica dos recursos naturais da região.

Na segunda abordagem, buscou-se verificar o comportamento da variação de volume para diferentes patamares de volume inicial do açude. Para tal, fixou-se o cenário de operação (Cenário 2) e variou-se o volume inicial e a condição de ocorrência de chuvas. Os resultados obtidos estão expostos no gráfico da Figura 50.

Para a situação em que o reservatório inicia o período de alocação completamente cheio, o açude apresenta déficit volumétrico em qualquer condição de tendência de chuvas, decrescendo este déficit, da condição de chuvas abaixo da média à condição acima da média.

Esta análise é importante para ressaltar que, em cada contexto, a análise de riscos é distinta. Isso indica que, para sistemas hídricos com histórico de alocação, não se torna prudente, à luz desta análise, deliberar vazões de liberação baseado apenas no próprio histórico de liberações, mas também na avaliação do contexto hidrológico em que se está inserido.

Figura 50 – Variação do volume do reservatório Marengo para diferentes valores de volume inicial (100%, 50% e 5%) nas diferentes condições de ocorrência de chuva (Abaixo da média, na média e acima da média).

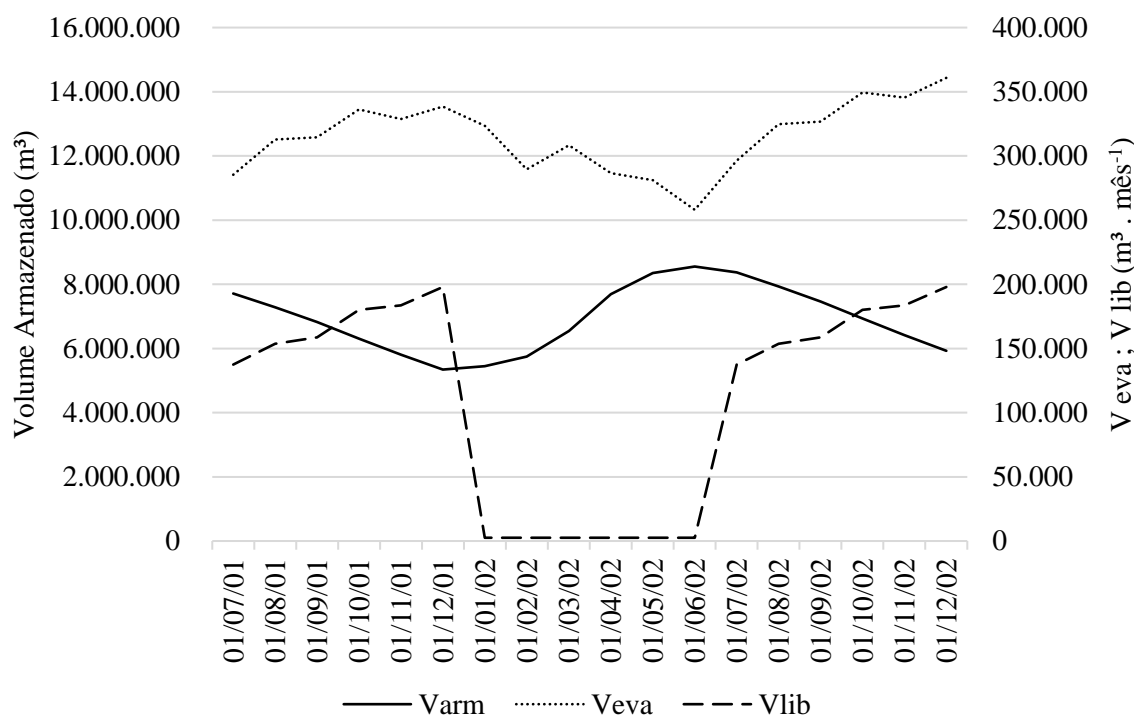


Fonte: Autor

4.2.6 Otimização da regra de operação

A fim de se exemplificar os Itens 3.3.7 e 3.3.8 (otimização da regra de operação e operação do sistema hídrico), supondo a decisão coletiva, em reunião de alocação negociada de água, de se alocar o recurso hídrico de acordo como o segundo cenário da Tabela 21 (condições de chuvas na média histórica), calculou-se a evolução temporal das variáveis envolvidas (volume armazenado – V_{arm} , volume evaporado – V_{eva} e volume liberado – V_{lib}), cujos resultados são expostos na Figura 51. Observou-se, para o segundo semestre dos dois anos simulados, que as elevadas demandas hídricas atreladas às altas taxas de evaporação impactam fortemente na redução de volume armazenado no reservatório. Em contrapartida, a redução dos fatores “demanda para irrigação” e “taxas de evaporação” no primeiro semestre do segundo ano, associados às vazões afluentes, propicia ao açude aporte suficiente para o atendimento das demandas subsequentes, sem o colapso do reservatório.

Figura 51 – Evolução temporal das variáveis simuladas¹ no açude Marengo, para o cenário de operação 2 em condições de chuvas médias.



¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

A partir do modelo de simulação do balanço hídrico supôs-se, também, a decisão pela otimização da regra de operação do cenário deliberado, tendo como função objetivo a minimização das perdas por evaporação (Equação 37). Na otimização, definiu-se como restrições, as liberações mensais mínimas e máximas (Equações 38 e 39) e o volume meta final (Equação 40) igual ao volume final simulado no cenário escolhido pelos atores sociais. As variáveis de decisão do problema são os volumes mensais liberados (V_{lib}).

$$F. O: \text{Min} \sum_{i=1}^{18} V_{ev_i} = \sum_{i=1}^{18} E_i \cdot A_{(t+af)_i} \quad (37)$$

Sujeito a:

$$D_{total\text{mín}} \leq V_{lib_i(jul - dez)} \leq D_{total\text{máx}} \quad (38)$$

$$V_{lib_i(jan - jun)} = D_{ah_i} + D_{da_i} \quad (39)$$

$$V_{final_{otim}} \geq V_{final_{sim}} \quad (40)$$

Nas Equações 37 a 40, V_{ev_i} é o volume evaporado no mês i (m^3); E_i é a lâmina evaporada do mês i (mm); $A(t+afl)_i$ é estimativa da área do espelho d'água após aflúências no mês i (m^2); V_{lib_i} é o volume liberado no mês i (m^3); $D_{total_{mín}}$ é a demanda total mínima estimada para o sistema hídrico (m^3); $D_{total_{máx}}$ é a demanda total máxima estimada para o sistema hídrico (m^3); D_{ah_i} é a demanda estimada para abastecimento humano no mês i (m^3); D_{da_i} é a demanda para dessedentação animal no mês i (m^3); $V_{final_{otim}}$ é o volume final do reservatório na operação otimizada (m^3) e $V_{final_{sim}}$ é o volume final do reservatório na operação simulada (m^3). Como explicitado na equação 38, i , é restrito ao período de julho a dezembro, e ao período de janeiro a junho, na Equação 39. Na Equação 37, i refere-se a qualquer mês do período simulado (18 meses).

A restrição da Equação 40 refere-se à obediência da deliberação participativa da reunião de alocação negociada de água, em que o cenário escolhido apresenta um determinado volume final simulado, importante fator na escolha realizada pelos atores sociais. Realizada a otimização, obteve-se os resultados expostos na Figura 52.

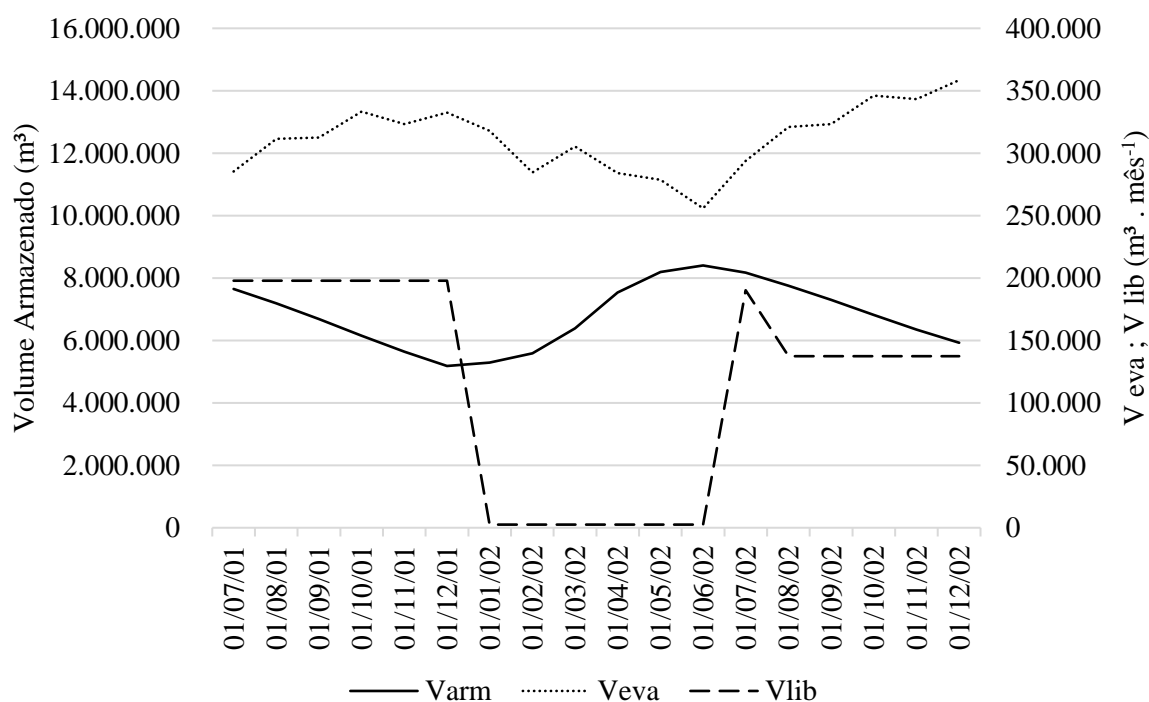
Na Figura 52 observa-se a indicação de uma curva-guia de armazenamento (V_{arm}) que, uma vez operada, resulta na minimização das perdas por evaporação e na manutenção do volume final armazenado, do cenário deliberado (Cenário 2). Com a técnica de otimização observou-se que, na busca pela minimização das perdas por evaporação, a liberação foi incrementada no período inicial da operação, período em que o espelho d'água é maior e, portanto, de maior área sujeita à evaporação (Equação 37). Observou-se que, no segundo semestre do segundo ano, a otimização elevou novamente a liberação pelo mesmo motivo anterior, porém, reduzindo a liberação a partir do mês de agosto, a fim de estabilizar o volume armazenado até o atingimento do objetivo de se assegurar o mesmo volume final do cenário deliberado pelos atores sociais (Equação 40).

Comparando-se os resultados da operação com otimização, com os resultados da operação sem otimização, obteve-se que o método proporciona uma redução no volume evaporado da ordem de $55.000 m^3$ e um incremento no volume ofertado de $42.600 m^3$, um volume suficiente, por exemplo, para o suprimento da demanda de abastecimento humano da mesma população durante cerca de 2 anos e 3 meses.

Obviamente, o armazenamento de um volume significativo como este não se dá de forma trivial, necessitando de infraestrutura para tal, o que, na prática, é inviável para pequenas comunidades do nordeste semiárido. A simulação de otimização realizada, no entanto, fornece uma indicação de sua aplicabilidade potencial em sistemas hídricos como este. De forma mais realista, o excedente de volume liberado, resultante da otimização da operação, poderia ser

destinado a uma expansão de área agricultável na parte inicial do período da alocação, por exemplo, ou mesmo a aplicação deste recurso hídrico em uma nova tipologia de uso.

Figura 52 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo, tendo como função objetivo a minimização das perdas por evaporação.



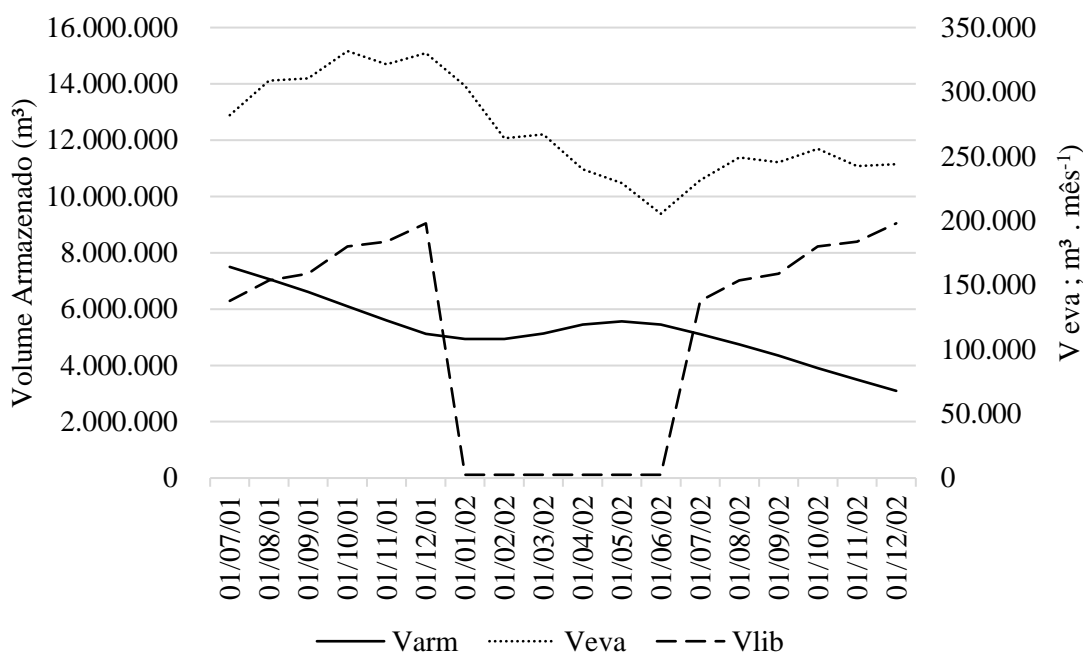
¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

Considerando, em um segundo momento, a mesma alocação negociada de água, mas para uma indicação de tendência de chuvas abaixo da média, calculou-se a evolução das mesmas variáveis para o cenário deliberado em plenária (Cenário 2, Tabela 22), obtendo-se os resultados expostos no gráfico da Figura 53.

Nesta condição, observou-se redução significativa no volume armazenado pelo reservatório (-30%). Esta redução refletiu o fraco aporte hídrico na quadra chuvosa, com vazões afluentes de cerca de 2,5 vezes inferiores às vazões escoadas na bacia em condições de chuvas médias. No segundo semestre do segundo ano, mesmo com a redução do volume evaporado, em virtude da redução da área susceptível à evaporação, o decaimento volumétrico do açude Marengo foi vertiginoso em virtude da demanda hídrica requerida (V_{lib}).

Figura 53 – Evolução temporal das variáveis simuladas¹ no açude Marengo, para o cenário de operação 2 em condições de chuvas abaixo da média.

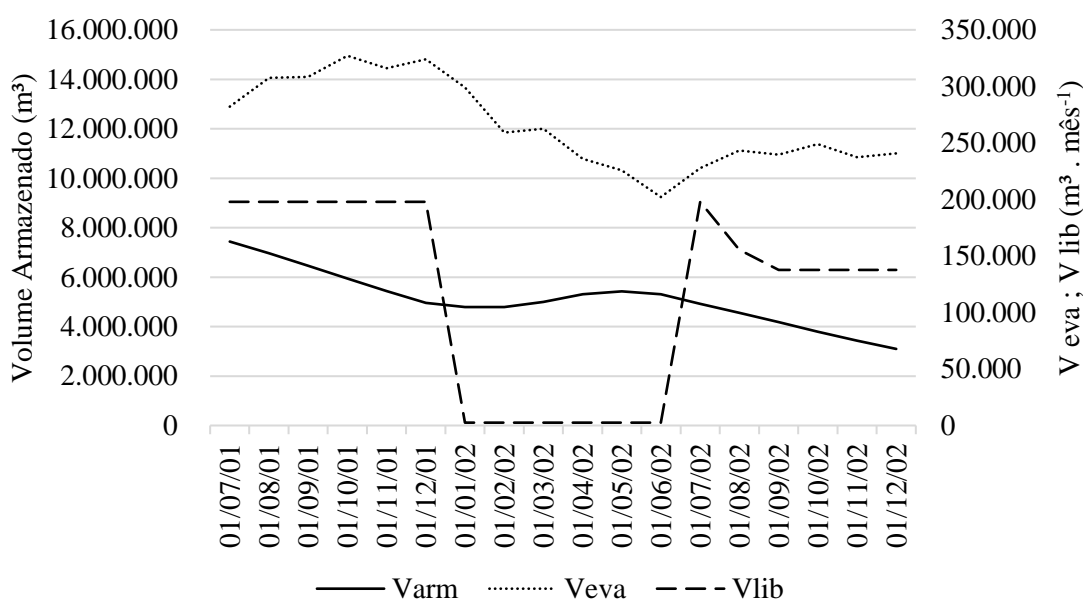


¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

Realizando-se o procedimento de otimização para a mesma Função-objetivo e conjunto de restrições, obteve-se os resultados expostos na Figura 54.

Figura 54 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo na condição de chuvas abaixo da média, tendo como função objetivo a minimização das perdas por evaporação.



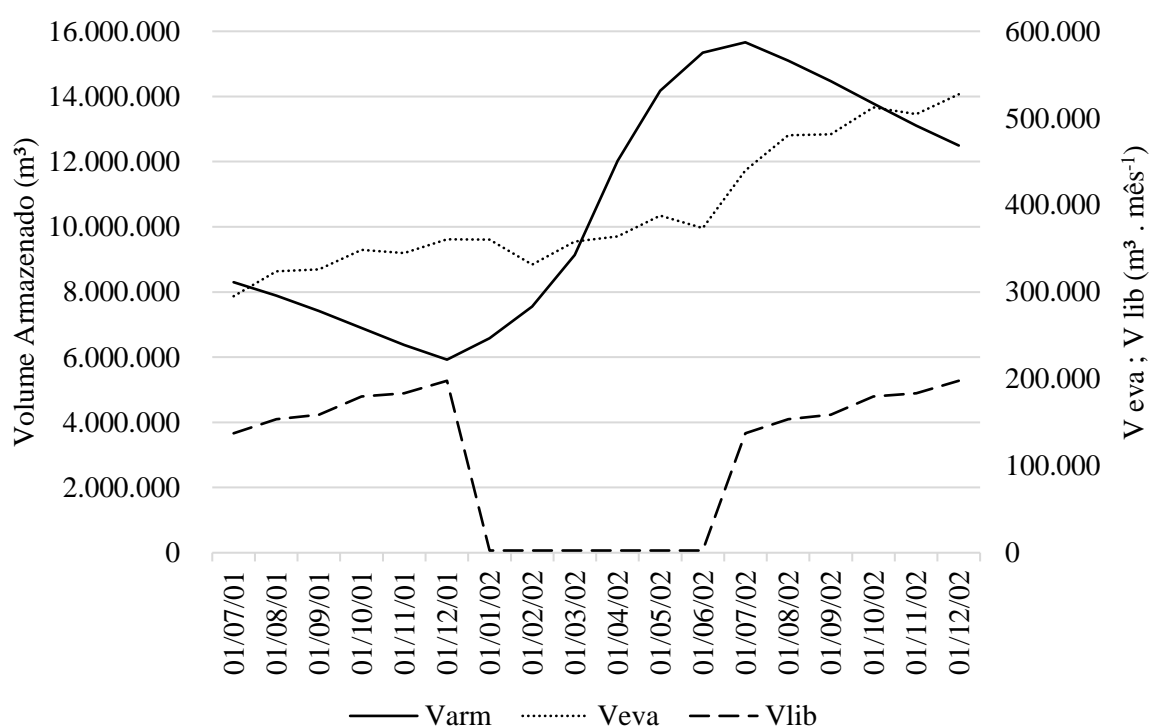
¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

Da observação destes resultados, depreende-se que o algoritmo de otimização, para esta função objetivo, ao mesmo tempo em que eleva ao máximo a vazão liberada a fim de reduzir as perdas por evaporação (em períodos de maior volume armazenado), reduz ao máximo a mesma vazão a fim de se preservar o volume final armazenado, que foi decidido no âmbito da alocação negociada de água (em períodos de menor volume armazenado). Trata-se, portanto, de um problema conflitante, de difícil resolução sem o auxílio de ferramentas metodológicas como esta. Uma vez mais se sublinha a contribuição de técnicas de otimização no ganho qualitativo da gestão participativa de recursos hídricos.

Realizando-se os mesmos procedimentos (simulação do balanço hídrico e otimização do segundo cenário de operação) para a condição de chuvas acima da média (Tabela 23), obtiveram-se os resultados expostos nas Figuras 55 e 56.

Figura 55 – Evolução temporal das variáveis simuladas¹ no açude Marengo, para o cenário de operação 2 em condições de chuvas acima da média.



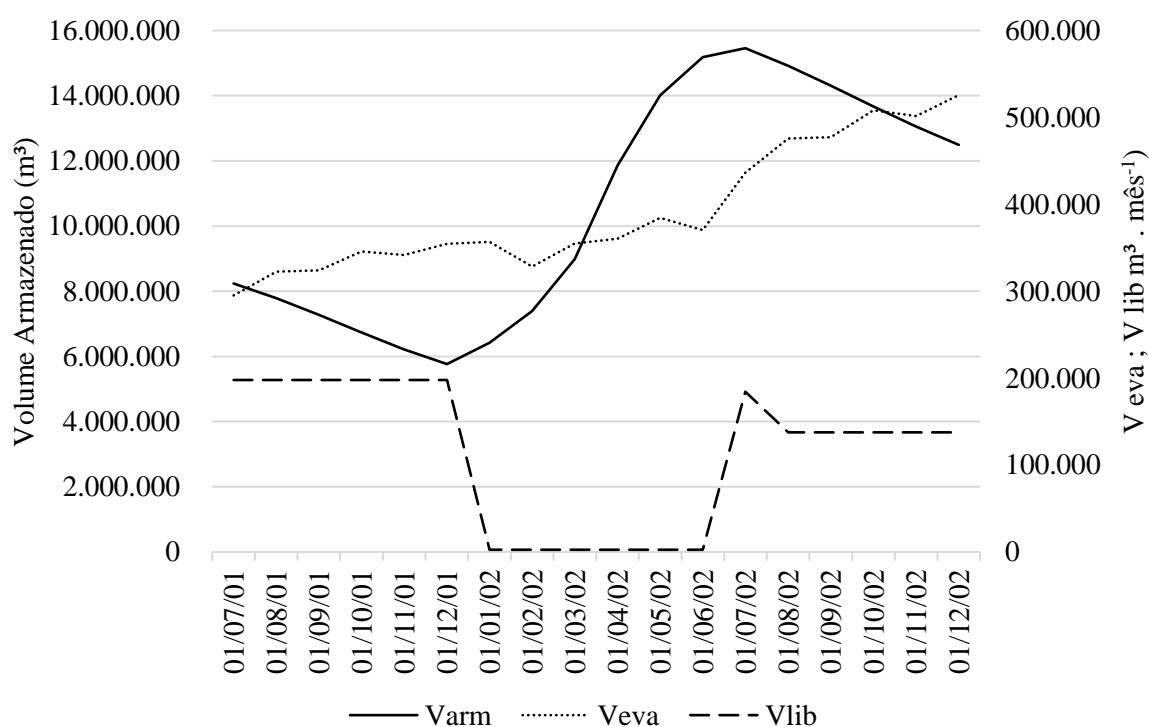
¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

Embora as taxas de evaporação da região sejam inferiores na quadra chuvosa (fevereiro a maio), os volumes evaporados foram crescentes em virtude do grande aporte hídrico e consequente aumento de espelho d'água. Nestas condições de chuvas acima da média, o aporte significativo ao açude Marengo refletiu as elevadas taxas de escoamento superficial em sua bacia hidrográfica, da ordem de 2,3 vezes maiores que a média.

Na simulação realizada, não se observou vertimento, para a parametrização utilizada no modelo SMAP e para o volume inicial simulado. Realizando-se, contudo, testes com a mesma parametrização recomendada para o açude Fogareiro (bacia na qual está inserida a sub-bacia do açude Marengo), observou-se vertimento do açude Marengo em três meses do segundo ano do período alocado (maio, junho e julho), o que não ocorreria nas condições de chuvas médias e abaixo da média, para o cenário de demandas ora simulado. Para efeito de comparação, simulando-se o Cenário 1, de alocação (Tabela 20), ainda ocorreria vertimento durante os mesmos meses supracitados, indicando ser desnecessário a imposição de restrições ao atendimento destas demandas em condições de chuvas acima da média. Dado o exposto, vê-se que a exposição de gráfico de evolução das variáveis V_{arm} , V_{eva} e V_{lib} em reuniões de alocação, podem fornecer maiores subsídios para a tomada de decisão coletiva, o que não é prática comum em pleitos de sistemas hídricos monitorados.

Figura 56 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo na condição de chuvas acima da média, tendo como função objetivo a minimização das perdas por evaporação.



¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

Para a condição de chuvas acima da média, os resultados da otimização ora apresentados mostram um aspecto relevante no uso de técnicas de otimização: a necessidade de as soluções sugeridas necessitarem da avaliação crítica dos tomadores de decisão. Para casos como o descrito anteriormente (ocorrência de vertimentos), a não-necessidade de maiores restrições é

graficamente notória. Para casos como os da Figura 56, contudo, esta conclusão é proveniente de simulações e observações adicionais. Verifica-se que, na busca pela minimização dos volumes evaporados, que são elevados para altos patamares de volume armazenado, o modelo de otimização restringe a liberação no segundo semestre do ano 2. Esta restrição, no entanto, é notoriamente desvantajosa para situações tão confortáveis de volume armazenado.

4.2.7 Aplicações diversas da otimização no contexto da alocação de água

Supondo que o reservatório Marengo apresente, historicamente, uma significativa depleção na qualidade de suas águas a partir de certo nível, a etapa de montagem dos cenários de operação pode levar em conta este aspecto por meio da simulação da regra de operação “volume meta”. Esta abordagem, portanto, desloca a otimização da etapa de melhoria na regra de operação para a etapa de montagem dos cenários de operação.

Tomou-se como nível de referência, a cota 292,28 m, que corresponde ao volume armazenado de 3,15 hm³ (20% da capacidade do reservatório). A partir do Cenário 2 de alocação verificou-se até que momento do período de alocação seria possível atender às demandas descritas no cenário. Para tal, tomou-se como função objetivo, a maximização do volume liberado (Equação 41), tendo como restrição principal, a manutenção do volume armazenado, em qualquer tempo, igual ou superior a 3,15 hm³ (Equação 44). As variáveis de decisão do problema são os volumes mensais liberados (V_{lib}).

$$F. O: Max \sum_{i=1}^{18} V_{lib_i} \quad (41)$$

Sujeito a:

$$D_{ah_i} + D_{da_i} \leq V_{lib_i (jul - dez)} \leq D_{total_i (jul - dez)} \quad (42)$$

$$V_{lib_i (jan - jun)} = D_{ah_i} + D_{da_i} \quad (43)$$

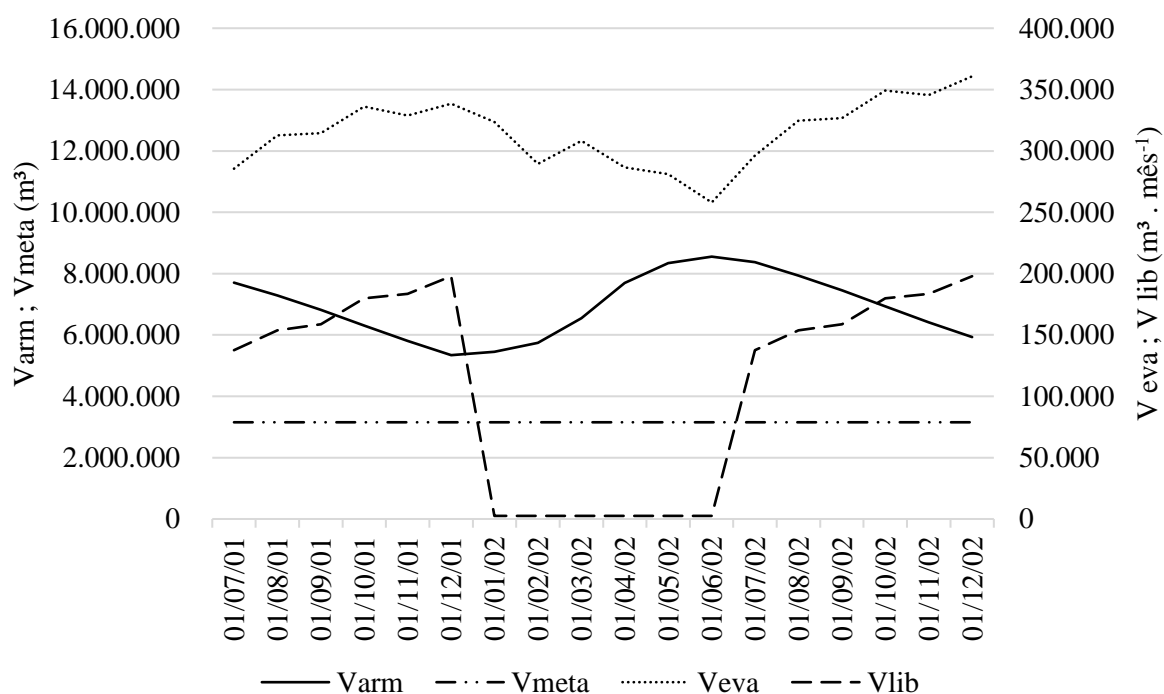
$$V_{arm_i} \geq 0,20 V_{m\acute{a}x} \quad (44)$$

Nas Equações 41 a 44, V_{lib_i} é o volume liberado no mês i (m³); D_{total} é a demanda total estimada para o sistema hídrico no mês i (m³); D_{ah_i} é a demanda estimada para abastecimento humano no mês i (m³); D_{da_i} é a demanda para dessedentação animal no mês i (m³); V_{arm_i} é o volume armazenado no reservatório no mês i (m³) e $V_{m\acute{a}x}$ é o volume máximo acumulável pelo reservatório (m³). Como explicitado na Equação 42, i , é restrito ao período de julho a dezembro,

e ao período de janeiro a junho, na Equação 43. Na Equação 44, i refere-se a qualquer mês do período simulado (18 meses).

Na realidade, a otimização ora realizada possui dois objetivos (otimização multiobjetiva), sendo um expresso na forma de Função-objetivo (maximização do volume liberado) e outro expresso em termos de restrição (volume meta). Tomando, portanto, o Cenário 2, em condições de chuvas em torno da média histórica, abaixo da média e acima da média, obteve-se os resultados expostos nos gráficos das Figuras 57, 58 e 59, respectivamente.

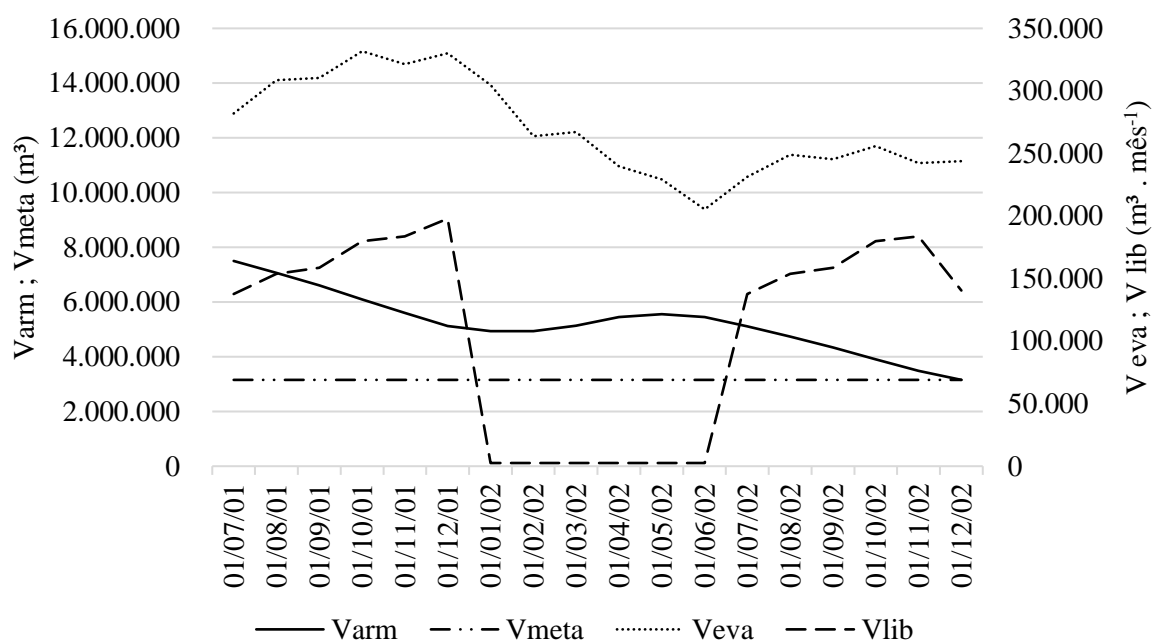
Figura 57 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo na condição de chuvas médias, tendo como função objetivo a maximização do volume liberado e a manutenção do volume meta 20% de $V_{máx}$.



¹V_{arm}: Volume armazenado no reservatório; V_{meta}: Volume meta; V_{eva}: Volume evaporado; V_{lib}: Volume liberado

Fonte: Autor

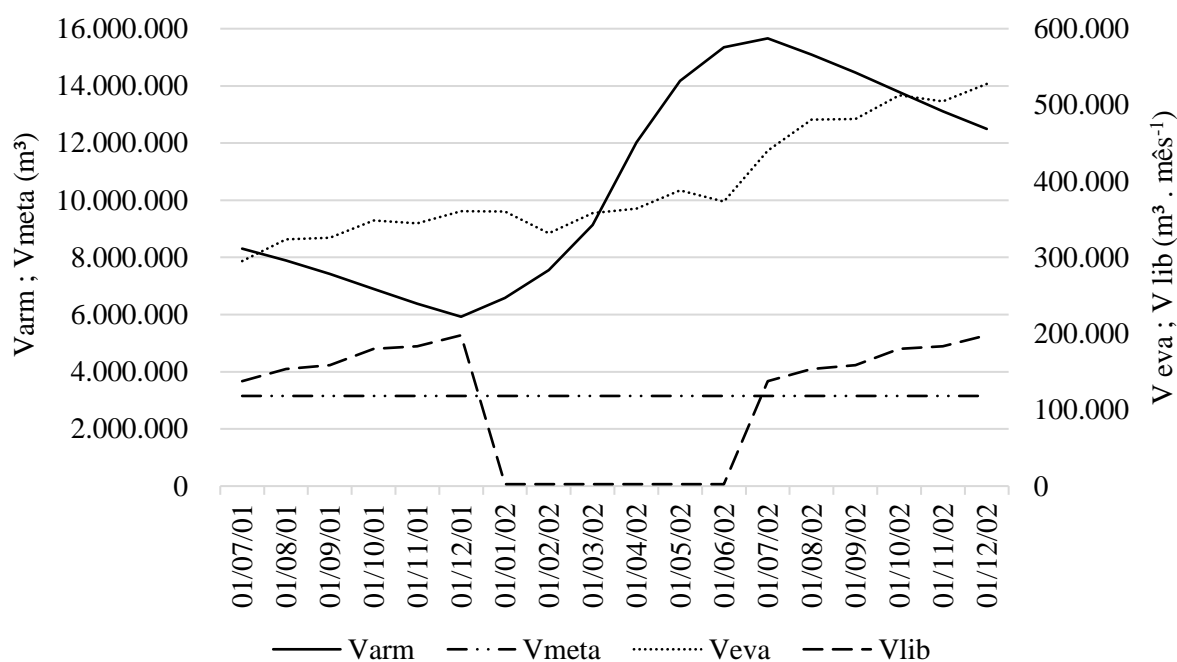
Figura 58 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo na condição de chuvas abaixo da média, tendo como função objetivo a maximização do volume liberado e a manutenção do volume meta 20% de $V_{máx}$.



¹ V_{arm} : Volume armazenado no reservatório; V_{meta} : Volume meta; V_{eva} : Volume evaporado; V_{lib} : Volume liberado

Fonte: Autor

Figura 59 – Resultados¹ da otimização do Cenário 2, para o açude Marengo na condição de chuvas acima da média, tendo como função objetivo a maximização do volume liberado e a manutenção do volume meta 20% de $V_{máx}$.



¹ V_{arm} : Volume armazenado no reservatório; V_{meta} : Volume meta; V_{eva} : Volume evaporado; V_{lib} : Volume liberado

Fonte: Autor

Para as demandas do Cenário 2, nas condições de chuvas na média e acima da média, o volume armazenado pelo açude Marengo não decai a níveis inferiores a 20% de sua capacidade máxima, em nenhum momento do período da alocação, conforme as simulações de balanço hídrico do tópico 4.6 (Figuras 51 e 55). Por isso, o gráfico não otimizado da Figura 51 é coincidente ao gráfico otimizado da Figura 57 (em termos de V_{arm} , V_{eva} e V_{lib}) e, de igual forma, o gráfico não otimizado da Figura 55 é idêntico ao gráfico otimizado da Figura 59. Para a condição de chuvas abaixo da média, no entanto, o volume decai a níveis inferiores ao volume meta no último mês do período de alocação. Neste caso, e em maior medida nos casos de maior demanda hídrica, a otimização possui papel fundamental na indicação do horizonte temporal de manutenção do atendimento das demandas.

Os resultados expostos no gráfico da Figura 58 indicam que, para a manutenção de um volume armazenado igual ou acima do volume meta, as liberações para o atendimento pleno das demandas só podem ocorrer até o mês de novembro do segundo ano. A partir deste ponto, as liberações atendem apenas parcialmente as demandas instaladas. Uma informação como esta, poderia ser levada em conta na etapa de montagem dos cenários de operação, elevando a qualidade da gestão participativa.

Conforme previamente exposto no item 3.4.7 (Otimização da regra de operação), um desafio que se apresenta na implementação da otimização dos volumes mensais liberados é a dificuldade de adequação do usuário à variação mensal na oferta, resultante da otimização. Como observado nas Figuras 52, 54 e 56, a otimização implica em liberação elevada no início do período e redução desta, ao final. Para uma melhor adequação desta variação pode-se, no processo participativo de alocação:

- a) indicar os níveis finais de liberação como sendo a máxima garantia de oferta a culturas perenes somadas à dessedentação de animais de grande porte, que têm tempo maior de ciclo de produção;
- b) incentivar o cultivo com irrigação suplementar para culturas de ciclo curto, tendo como previsão de colheita, o final do último mês de alta liberação. Nesta abordagem, o volume excedente liberado no início do segundo semestre do segundo ano seria o fator limitante da área que poderia ser implementada na bacia.

Tendo em vista tais proposições, é prudente refletir sobre o risco da realização do investimento para a implementação de novas áreas de menor ciclo, frente à incerteza de não se poder plantar a mesma área no ano seguinte ao período de alocação. Estas reflexões devem, portanto, ser feitas caso a caso e no âmbito da participação social.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se que a escassez de dados de monitoramento dos parâmetros hidrológicos e operacionais de reservatórios na região semiárida se constitui em grande entrave para a realização da gestão dos sistemas hídricos isolados, a pesquisa buscou contribuir com essa questão através da modelagem hidrológica. Nesse contexto, desenvolveu-se um modelo de simples aplicação, denominado **AguiarVM**, a partir de uma metodologia consolidada na hidrologia tradicional (método de Aguiar). O modelo, que tem passo temporal de um mês, apresentou congruência não somente com dados medidos no sertão semiárido do Ceará, como também com o modelo SMAP, atestando aplicabilidade na região de interesse, o semiárido do Brasil. O modelo **AguiarVM** foi aplicado a três reservatórios de diferentes dimensões (27 a 322 hm³), obtendo bom desempenho tanto na calibração quanto na validação em todos os casos, o que confirma sua potencialidade para a região, caracterizada pela escassez de dados hidrológicos. A aplicação do modelo **AguiarVM** levou às seguintes conclusões:

- a) o modelo apresentou maior representatividade do escoamento na menor bacia hidrográfica estudada;
- b) não obstante ao exposto acima, o modelo apresentou baixa variação de desempenho (usando-se o coeficiente de Nash e Sutcliffe – NSE) frente à alta variação de área das respectivas bacias hidrográficas, indicando aplicabilidade em todos os casos simulados;
- c) o modelo não obteve aderência nos maiores picos de vazões, mostrando-se limitado para estudos de eventos extremos e dimensionamento de obras hídricas, por exemplo. No entanto, para caracterização de regime hidrológico e estudos de disponibilidade e gestão hídricas, o modelo apresenta potencial;
- d) a modelagem hidrológica com passo temporal mensal se mostrou adequada aos propósitos da pesquisa, dado que o passo mensal é compatível com o planejamento de curto prazo (anual) e com a operação de reservatórios semiáridos.

O modelo de operação proposto tem as seguintes etapas: diagnóstico; modelagem hidrológica; montagem e otimização de cenários de alocação. Na etapa de diagnóstico de oferta e demanda hídrica, verificou-se, com o auxílio da análise de disponibilidade hídrica, uma subutilização do reservatório, apresentando uma vazão com 90% de garantia (Q₉₀) da ordem de 1,04 hm³ · ano⁻¹, e uma demanda atual de cerca de 0,02 hm³ · ano⁻¹. O modelo de operação proposto, no tempo em que contribuiu com a reflexão sobre a prática da gestão integrada em sistemas hídricos não monitorados, também apresentou etapas aplicáveis à operação de

sistemas hídricos monitorados, apresentando-se como possíveis contribuições em sua prática. A montagem de cenários de operação, tendo como base, dentre outros elementos, a informação de tendência de chuvas, conferiu ganhos em flexibilidade e confiabilidade ao processo. Tal abordagem conferiu ao modelo proposto, a possibilidade de avaliação da sustentabilidade do sistema hídrico, para um período futuro definido, no que diz respeito à sua capacidade de atendimento a determinadas demandas. Nesta etapa, verificou-se que, para a área de estudo e dentro dos períodos chuvosos (fevereiro a maio), as chuvas históricas abaixo da média apresentaram lâminas 63% inferiores à média e, quando da ocorrência de precipitações acima da média, estas foram 87% superiores à média. A extensão do período de alocação de seis para 18 meses, proposta no modelo de operação, se mostrou importante para o alargamento da visão de logo prazo de atores sociais participantes do processo de alocação. Este aspecto, aliado à informação de tendência de chuvas, permite trazer à baila uma importante discussão, relevante à alocação presente, mas que seria tratada apenas em ocasião posterior: a quadra chuvosa do ano seguinte.

Em relação à operação do reservatório, a pesquisa contribuiu ao demonstrar que as técnicas de otimização podem conferir ganho à gestão de recursos hídricos quando são utilizadas como ferramentas para o incremento da eficiência da operação de cenários deliberados de forma participativa. Tal abordagem não depreciou, substituiu ou invalidou a participação social, mas potencializou os ganhos da escolha realizada. Tais ganhos se materializaram na forma de saldo volumétrico na operação do reservatório, na forma de possibilidade de incremento de áreas agricultáveis, na forma de diversificação das tipologias de uso e, até mesmo, na forma de incorporação de aspectos qualitativos da água.

O modelo de operação desta pesquisa, que permite a inserção de reservatórios não-monitorados, propõe gestão hídrica descentralizada e participativa. Nossa proposição, no entanto, não tem como objetivo sugerir a inserção de pequenos sistemas hídricos na atual rede de monitoramento das agências de água (focada nos reservatórios estratégicos), mas suscitar a prática da gestão participativa nos pequenos sistemas.

Como recomendação desta dissertação de mestrado, sugere-se, para pesquisas futuras, a verificação da aplicabilidade do modelo em um sistema hídrico que contemple (1) a existência de dados de vazões afluentes observadas ou dados de monitoramento de nível do reservatório em uma maior extensão de tempo, a fim de se obter uma parametrização consistente do modelo hidrológico e (2) a possibilidade do exercício da participação social no contexto da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, Francisco Gonçalves. *Estudo Hidrométrico do Nordeste Brasileiro*. Boletim Técnico. Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS, [S.l.: s.n.], V. 36, N. 2, 1978.
- ALBINATI, Ricardo Castelo Branco. Aqüicultura em pequenos açudes no Semi-árido. *Bahia Agrícola*, [S.l.], v. 7, n° 2, abr. 2006. p. 66-72.
- ALEXANDRE, Debora Mithya Barros. *Gestão de pequenos sistemas hídricos no semiárido nordestino*. 2012. 151 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciência Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2012.
- ALEXANDRE, Alan Michell Barros; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B. Incorporação do impacto da rede de reservatórios superficiais artificiais de caráter intranual na modelagem hidrológica chuva-vazão. *In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 8. p. 155-185.
- ALEXANDRE, Bruno Magalhães; MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto. Redução da disponibilidade hídrica pelo assoreamento no açude Tijuquinha, Baturité-Ce. *In: III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido*, [S.l.], 2017.
- ANTUNES, Paula *et al.* Participatory multi-criteria analysis of irrigation management alternatives: the case of the caia irrigation district, portugal. *International Journal Of Agricultural Sustainability*, [S.l.], v. 9, n. 2, p. 334-349, maio 2011.
- AQUINO, Sandra Helena Silva de. *Relatório Final de Atividades do Projeto Rede Clima: Alocação de Água no Estado do Ceará e uso da Informação Climática*. [S.l.: s.n.], 2012. 40 p.
- AQUINO, Sandra Helena Silva de; SILVA, Daniele Costa da; SILVA, Samiria Maria Oliveira da; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. Alocação de longo prazo no estado do Ceará. *In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 13. p. 257-275.
- ARAÚJO, John Kenedy; CAMPOS, José Nilson B. O método dos fragmentos na estimativa de disponibilidades hídricas em açudes no Semi-Árido. *In: CAMPOS, José Nilson B. Hidrologia de Reservatórios – A construção de uma teoria*. Fortaleza: ASTEF/ Expressão Gráfica e Editora Ltda., 2006. Cap. 15 p. 245-250.
- ARAÚJO, Jose Carlos de. Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: modelagem e validação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l.], v. 8, n. 2, p. 39-56, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v8n2.p39-56>. Acesso em: 18 jul. 2020.

ARAÚJO, José Carlos de. Gestão das águas de pequenos açudes na região semiárida. In: SOUSA MEDEIROS, Salomão de. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. Instituto Nacional do Semiárido, [S.l.: s.n.], 2011. p. 307-324.

ARAÚJO, Bruno Aragão Martins de. *Alocação de água no Ceará: diagnóstico e desafios*. 2012. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza, 2012.

ARAÚJO, José Carlos de; MAMEDE, George; LIMA, Berthyer de. Hydrological Guidelines for Reservoir Operation to Enhance Water Governance: application to the brazilian semiarid region. *Water*, [S.L.], v. 10, n. 11, p. 1628-1640, 12 nov. 2018. MDPI AG.

BARBOSA, Fabio Chaffin. *Estimativa das necessidades de irrigação e avaliação do impacto da cobrança pelo uso de recursos hídricos na bacia do Baixo Jaguaribe - CE*. 2005. 115 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciência Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2005.

BARBOSA, Paulo Sérgio Franco. Modelos de Programação Linear em Recursos Hídricos. In: *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS-ABRH. Porto Alegre, 2002. p. 97-163.

BARRAQUE, Bernard. Integrated and participative river basin management: a social sciences perspective. In: TCHIGUIRINSKAIA, Ioulia, et al., organizadores. *River Basins - from Hydrological Science to Water Management*: [Kovacs Colloquium, UNESCO, Paris, June 2008] = Bassins Versants - de l'hydrologie à La Gestion de l'eau. IAHS Press, 2008.

BARROS, Magno da Silva; MARINS, Cristiano Souza; SOUZA, Daniela de Oliveira. O uso do método de análise hierárquica (AHP) na tomada de decisões gerenciais - um estudo de caso. In: *ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO*, 29., 2009, Salvador. Anais [...]. Salvador: Abepro, 2009.

BARROS, Sâmea Valensca Alves. *Otimização dos usos múltiplos em pequenos açudes na Bacia do Açude de Sumé-PB*. 147f. il. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2010.

BARROS, Francisco Venícius Fernandes; MARTINS, Eduardo Sávio P. R.; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. Regionalização de parâmetros do modelo chuva-vazão SMAP das bacias hidrográficas do Ceará. In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 9. p. 186-207.

BEVEN, K. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. 2. ed. Chichester: Wiley-blackwell, 2012. 488 p.

BHATIA, Nikhil; SRIVASTAV, Roshan; SRINIVASAN, Kasthiringan. Season-Dependent Hedging Policies for Reservoir Operation—A Comparison Study. *Water*, [S.L.], v. 10, n. 10, p. 1311-1327, 22 set. 2018. MDPI AG.

BRAGA, Benedito Pinto Ferreira. Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos. In: *Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos*. NOBEL/ABRH. São Paulo, 1987. p. 427-518.

BRAGA, Benedito; BARBOSA, Paulo Sérgio Franco; NAKAYAMA, Paulo Takashi. Sistemas de suporte à decisão em recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.L.], v. 3, n. 3, p. 73-95, 1998.

BRAGA JUNIOR, Benedito Pinto Ferreira. 1987. Técnicas de otimização e simulação aplicadas em sistemas de recursos hídricos. In: *MODELOS para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel: ABRH. Cap.5, p.427 – 517.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente dos Recursos Hídricos e da Amazônia Legal. *Lei n. 9.433: Política Nacional de Recursos Hídricos*. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, 1997. 72p.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). *Resolução nº 357*, Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências de 17 de março de 2005. Brasília, 2005.

BRASIL. Bancada Federal do Nordeste. (org.). *Seca: análises, pressupostos, diretrizes, projetos e metas para o planejamento de um novo nordeste I*. Brasília: Câmara dos Deputados, 2013. 227 p.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *A Evolução da Gestão dos Recursos Hídricos no Brasil*. Brasília: ANA, 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *Fortalecimento dos entes do SINGREH*. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/fortalecimento-dos-entes-do-singreh>. Acesso em: 17 nov. 2020a.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). *Alocação de água*. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/regulacao/resolucoes-e-normativos/regras-especiais-de-uso-da-agua/alocacao-de-agua-inicial+&cd=1&hl=pt-BR&ct=clnk&gl=br>. Acesso em: 19 nov. 2020b.

BRASIL. Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). *Normais Climatológicas do Brasil: período: 1981 - 2010*. 2021. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 27 abr. 2021.

BRAVO, Juan Martín; COLLISCHONN, Walter.; PILAR, Jorge Víctor.; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios Utilizando um Algoritmo Evolutivo. *In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste*. Curitiba. 2006.

BRAVO, Juan Martín; COLLISCHONN, Walter; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; PILAR, Jorge Víctor. Otimização de Regras de Operação de Reservatórios com Incorporação da Previsão de Vazão. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 181-196, 2008.

CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira (org.). Introdução à Modelagem Dinâmica Espacial. 2003. *In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/>. Acesso em: 28 nov. 2020.

CAMPOS, José Nilson B. *A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers under High Evaporation rate*. Tese (Doutorado) – Colorado State University, Fort Collins, Colorado. 1987.

CAMPOS, José Nilson B. *Dimensionamento de Reservatórios: o Método do Diagrama Triangular de Regularização*. 1. ed. Fortaleza, Edições UFC, 1996. 51p.

CAMPOS, José Nilson B. *Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização*. Fortaleza, Ed. UFC, 112 p., 2005

CAMPOS, José Nilson B. *Hidrologia de Reservatórios – A construção de uma teoria*. Fortaleza: ASTEF/ Expressão Gráfica e Editora Ltda., 2006. 285p.

CAMPOS, José Nilson B. *Lições em modelos e simulação hidrológica*. 166 f. il. Fortaleza: ASTEF/ Expressão Gráfica e Editora Ltda., 2009.

CAMPOS, José Nilson B. Modeling the Yield Evaporation Spill in the Reservoir Storage Process: The Regulation Triangle Diagram. *Water Resources Management*, p. 1-25, 2010.

CARDOSO, Giovanni Brígido Bezerra; MARTINS, Eduardo Sávio P. R.; SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. Uso de Otimização/Simulação e Previsão de Afluências na Operação Tática dos Reservatórios do Sistema Jaguaribe-Metropolitano - CE. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l.], v. 11, n. 4, p. 175-186, 2006.

CEARÁ (Estado). Lei nº 14844, de 28 de dezembro de 2010. *Política Estadual de Recursos Hídricos*. Fortaleza, CEARÁ, 30 dez. 2010.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). *Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Jaguaribe. Fase I – Diagnóstico*. Fortaleza, [s.n.], 1999.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). *Relatório de Avaliação da Segurança Hídrica: Aspectos Quantitativos*. Elaboração do Plano de Segurança Hídrica das bacias Hidrográficas Estratégicas do Acaraú, Metropolitanas e da SubBacia do Salgado. Fortaleza, [s.n.], 2016. 193 p.

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). *Nota Técnica nº 007/2017. Solicitação para o monitoramento dos reservatórios Marengo e Santa Catarina, Madalena-Ce. Quixeramobim. 2017.*

CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). Secretaria dos Recursos Hídricos. *Alocação Negociada de Água. 2019.* Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/alocacao-negociada-de-agua/>. Acesso em: 19 nov. 2020.

CEARÁ. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. *Manual do SIGA.* Fortaleza, [s.n.], 2018. 166 p.

CHAPRA, Steven C. *Surface water-quality modelling.* New York: McGraw-Hill, 1997. 844p.

CHEONG, Tae Sung; KO, Ick-Hwan; LABADIE, John W. Development of multi-objective reservoir operation rules for integrated water resources management. *Journal Of Hydroinformatics*, [S.l.], v. 12, n. 2, p. 185-200, 14 nov. 2009.

CHOW, Ven Te.; MAIDMENT, David R.; MAYS, Larry W. *Hidrología aplicada.* Santafé de Bogotá: McGraw-Hill, 1994.

CIRILO, José Almir. Programação Não Linear Aplicada a Recursos Hídricos. In: *Técnicas Quantitativas para o Gerenciamento de Recursos Hídricos.* 2ª Edição. Editora da Universidade/UFRGS–ABRH. Porto Alegre, p. 305-359. 2002.

COELHO, Christine *et al.* In Situ and Satellite Observation of CDOM and Chlorophyll-a Dynamics in Small Water Surface Reservoirs in the Brazilian Semiarid Region. [S.l.] *Water*, vol. 9, no 12, dezembro de 2017, p. 913.

COGERH. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – UFC – Universidade Federal do Ceará. *Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela COGERH,* Disponibilizado em capítulos, [S.l.: s.n.], 2013.

COLLISCHONN, Walter; BRAVO, Juan Martin; PILAR, Jorge V. Otimização da operação de Reservatórios: Estado da Arte. In: *Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.* João Pessoa. 2005.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. *Hidrologia para engenharia e ciências ambientais.* 2ª Edição revisada e ampliada, Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). Porto Alegre. 2015. 336p. : il.

DANTAS NETO, Silvrano Adonias *et al.* *Manual Técnico para Construção de Pequenas Obras de Abastecimento de Água no Semiárido Brasileiro.* Fortaleza: Expressão Gráfica, 2013.

DE ARAÚJO, José Carlos.; GÜNTNER, Andreas; BRONSTERT, Axel. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. *Hydrological Sciences - Journal des Sciences Hydrologiques*. 51(1) February, [S.l.], 2006.

FENG, Zhong-Kai *et al.* Multiple hydropower reservoirs operation optimization by adaptive mutation sine cosine algorithm based on neighborhood search and simplex search strategies. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 590, p. 1-17, nov. 2020.

FREITAS, Marcos Airton de Souza. Modelos diários chuva-vazão em bacias do semi-árido brasileiro. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, n. 15, p. 31-38, dez. 1994.

GARJULLI, Rosana. Experiência de gestão participativa dos recursos hídricos: o caso do Ceará. In: ALVES, Rodrigo Flecha Ferreira; e CARVALHO, Giordano Bruno Bomtempo (orgs.). *Experiência de gestão de recursos hídricos*. Brasília: ANA, 2001.

GOMES, Maurício de Gois; MEDEIROS, Joana Darc Freire de. Otimização da alocação de água em reservatório semiárido em cenários de escassez hídrica. In: *XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2019, Foz do Iguaçu. Anais do XXIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2019.

GONDIM, Ronner Braga. *Avaliação do impacto do reuso de águas na alocação hídrica dos reservatórios estratégicos da bacia do rio Acaraú, Ceará*. 146 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2018.

GOTTSCHALK, Lars.; MOTOVOLOV, Yury. Maco-scale hydrological modelling – a scandinavian experience. International Symposium on: “Can Science and Society save crisis in the 21st century – Reports from the World”. *Japan Society of Hydrology and Water Resources*. Tokyo. Pp. 38-45. 2000.

GÜNTNER, Andreas. *Large-Scale Hydrological Modelling in the Semi-Arid North-East of Brazil*. 2002. 128 f. Dissertation (Doctor of Natural Sciences) – Department of Geocology, University of Potsdam, Potsdam, 2002.

GÜNTNER, Andreas; BRONSTERT, Axel. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 297, n. 1-4, p. 136-161, set. 2004. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.04.008>. Acesso em: 18 jul. 2020.

IKHAR, Prerana. R.; REGULWAR, Dattatray. G.; KAMODKAR, Ravindra. U. Optimal reservoir operation using soil and water assessment tool and genetic algorithm. *Journal Of Hydraulic Engineering*, [S.l.], v. 24, n. 2, p. 249-257, 22 dez. 2017.

LABADIE, John W. Optimal Operation of Multireservoir Systems: State-of-the-Art Review. *Journal of Water Resources Planning and Management*, [S.l.], vol. 130, n. 2, março de 2004, p. 93–111

LI, Fawen *et al.* Inter-annual change of the drought limit water level of a reservoir based on system dynamics. *Water Policy*, [S.l.], v. 21, n. 1, p. 91-107, 7 nov. 2018.

LIMA, Henrique Vieira Costa, LANNA, Antônio Eduardo Leão. Modelos para Operação de Sistemas de Reservatórios: Atualização do Estado da Arte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, [S.l.], v.10, n. 3, jul/ago 2005, pp. 5-22.

LIMA, Thales Bruno Rodrigues. *Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos*. 94 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.

LIU, Dong *et al.* Bi-objective algorithm based on NSGA-II framework to optimize reservoirs operation. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 585, p. 1-12, jun. 2020.

LOPES, João Eduardo Gonçalves; BRAGA JÚNIOR., Benedito Pinto Ferreira; CONEJO, João Gilberto Lotufo. Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado. *In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, v.2, 42-62, Fortaleza, 1981.

LOPES, João Eduardo Gonçalves; BRAGA JÚNIOR., Benedito Pinto Ferreira; CONEJO, João Gilberto Lotufo. *SMAP: A simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology*. [S.l.], Ed. V.P. Singh: Water Resources Publications, 1982.

LOPES, José Wellington Batista. *Modelagem hidrossedimentológica em meso-bacia do semiárido*. 85 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2013.

LOPES, José Wellington Batista. *Disponibilidade hídrica em reservatórios no semiárido brasileiro: interações entre assoreamento e escassez*. 107 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2016.

LOUCKS, Daniel P.; STEDINGER, Jery R.; HAITH, Douglas A. *Water resource systems planning and analysis*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 559 p. 1981.

LOUCKS, Daniel P.; VAN BEEK, Eelco. *Water Resource Systems Planning and Management*. [S.l.], Springer International Publishing, 2017

LUCAS, Edmundo Wallace Monteiro; SOUSA, Francisco de Assis Salviano de; SILVA, Fabricio Daniel dos Santos; LUCIO, Paulo Sergio. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu- Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, [s.l.], v. 24, n. 3, p.308-322, set. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v24n3/a05v24n3.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2020.

MAAS, Arthur; HUFSCHEMIDT, Maynard M.; DORFMAN, Robert *et al.* *Design of water resource systems*. Cambridge: Harvard University. 1962. 620 p.

MACAMBIRA, Allison; NASCIMENTO, Antônia; MEDEIROS, Pedro. Densidade de Açudes e seu impacto sobre a Disponibilidade Hídrica na Bacia Hidrográfica do Açude Fogareiro - Ce. In: *III Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido*, [S.l.], 2017.

McMAHON, Thomas Aquinas; MEIN, Russel G. *Reservoir Capacity and Yield*. Amsterdam, Oxford: Elsevier Scientific. 1978.

MACIEL, Wlisses Matos. *Otimização econômica do uso da água no perímetro irrigado tabuleiro de Russas utilizando programação linear e não-linear*. 130 f. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, 2016.

MALVEIRA, Vanda Tereza Costa. *Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do açude Orós*. 2009. 103 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil: Recursos Hídricos) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE, George Leite. *et al.* Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil. *Journal of Hydrologic Engineering*, [S.l.], v. 23, n. 12, p. 1-13, 2018.

MARENGO, José Antônio. Vulnerabilidade, Impactos e adaptação às mudanças de clima no semiárido do Brasil, In: *Parcerias Estratégicas/Centro de Gestão de Estudos Estratégicos-Ministério da Ciência e Tecnologia*, v.1, n.1, Brasília DF, p. 149-176, [s.n.], 2009.

MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto. *Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas*. 2009. 165 f. Tese (Doutorado), Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza – CE, 2009.

MEDEIROS, Pedro Henrique Augusto, DE ARAÚJO, José Carlos. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. *J Soils Sediments* 14, [S.l.], 1216–1223, 2014.

MEN, Baohui *et al.* Reservoir Operation Policy based on Joint Hedging Rules. *Water*, [S.l.], v. 11, n. 3, p. 1-15, 26 fev. 2019.

MOLLE, François; CADIER, Eric. *Manual do Pequeno Açude*. Recife: SUDENE/Cooperación Française/ORSTON, 1992. 529 p.

MOLLE, François. Nirvana Concepts, Narratives and Policy Models: Insights from the Water Sector. *Water Alternatives*, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 131-156, 2008.

MOREIRA, Rodrigo de Matos. *Alocação de Recursos Hídricos em Regiões Semi-Áridas*. 2001. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, COPPE/ UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

NASH, James Eamonn, SUTCLIFFE, John Vernon. River flow forecasting through conceptual models – Part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, [S.l.], v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NUNES, Tereza Helena Costa. *A gestão do reservatório Epitácio Pessoa e regras de operação otimizadas*. 74f. il. Dissertação (Mestrado) – Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2015.

ODUM, Eugene P. *Fundamentals of ecology*. 3 ed. Philadelphia: W. B. Saunders, 1971. 474p.

PAULINO, Walt Disney. Desenvolvimento de um sistema de suporte a decisão em gestão dos recursos hídricos: o caso do SAGREH. In: *III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 1996, Salvador. III Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 1996. p. 79-82.

PEREIRA, Guilherme da Silva; CAVALCANTI, Bruna de Sousa; "SIGA: O NOVO SISTEMA DE SUPORTE À DECISÃO PARA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS", p. 449-456. In: *Anais do XIV Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Ambiental* [= Blucher Engineering Proceedings v.3 n.2]. São Paulo: Blucher, 2016.

PEREIRA, Walter Jhameson Xavier. *Calibração de um modelo hidrológico de escala diária para bacias hidrográficas do semiárido cearense*. 86 f.: il. color. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2017.

PINHEIRO, Francisco Dantas. *Açudagem particular em cooperação no Ceará*. Fortaleza. Série conViver, n. 1.: DNOCS, 2004. 736 p.

PINHEIRO, Laldiane de Souza. *Proposta de índice de priorização de áreas para saneamento rural: estudo de caso assentamento 25 de maio, CE*. 2011. 108 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

PINHEIRO, Marcos Danillo Rodrigues. *Equações para Eficiência na Operação do Reservatório Jenipapeiro no Município de Dep. Irapuan Pinheiro - Ce*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal do Ceará, Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, *Campus Quixadá*, 2019. 48 f.: il.

RABELO, Lara Maria Oliveira. *Redimensionamento Hídrico do Açude Cedro*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal do Ceará, Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, *Campus Quixadá*, 2021. 64 f.: il.

REBOUCAS, Jonathan Alves; ALMEIDA, Cicero Lima de; CIPRIANO, Soraia Arruda; SILVA, Kevin Brasil da. Proposta de utilização da interface Python/ArcGIS na elaboração da curva cota-área-volume de reservatórios. In: *Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa Inovação*, 2012, Palmas. Ciência, tecnologia e inovação: ações sustentáveis para o desenvolvimanto regional, 2012.

REDDY, M. Janga; KUMAR, D. Nagesh. Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops using elitist-mutated particle swarm optimization. *Hydrological Sciences Journal*, [S.l.], v. 52, n. 4, p. 686-701, ago. 2007.

REN, Kang; HUANG, Shengzhi; HUANG, Qiang; WANG, Hao; LENG, Guoyong; WU, Yunchen. Defining the robust operating rule for multi-purpose water reservoirs under deep uncertainties. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 578, p. 124-134, nov. 2019. Elsevier BV. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124134>. Acesso em: 18 jul. 2020.

REUSS, Martin. Is It Time to Resurrect the Harvard Water Program? *Journal of Water Resources Planning and Management*, [S.l.], vol. 129, no 5, setembro de 2003, p. 357–60.

RIBEIRO, Diego de Castro Maia *et al.* Aplicação do modelo de suporte à decisão na alocação de longo prazo em uma bacia hidrográfica do estado do Ceará. In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 21. p. 447-454.

RICART, Sandra *et al.* How to improve water governance in multifunctional irrigation systems? Balancing stakeholder engagement in hydrosocial territories. *International Journal Of Water Resources Development*, [S.l.], v. 35, n. 3, p. 491-524, 26 mar. 2018.

ROA-GARCÍA, María Cecilia. Equity, efficiency and sustainability in water allocation in the Andes: Trade-offs in a full world. *Water Alternatives*, [S.l.], v. 7, n. 2, p. 298-319. 2014.

RODELLA, Lidia Maria Alves. *Modelo de programação linear para apoio a decisão na distribuição de água de sistemas integrados de abastecimento*. 2014. 93 f. Tese (Doutorado) - Curso de Economia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SALLY, Hilmy; LÉVITE, Hervé; COUR, Julien. Local Water Management of Small Reservoirs: Lessons from Two Case Studies in Burkina Faso. *Water Alternatives*, [S.l.], v. 4, n. 3, p. 365-382, 2011.

SANTOS, Valterlin da Silva. *Um modelo de otimização multiobjetivo para análise de sistemas de recursos hídricos*. 143f. il. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, 2007.

SETTI, Arnaldo Augusto. *Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos*. 2. ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2001. 226 p.

SILVA, Vicente P. R. da *et al.* Análise da pluviometria e dias chuvosos na região Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 15, n. 2, p.131-138, dez. 2010

SILVA, Samíria Maria Oliveira da. SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. Transferência de risco na alocação de água do estado do Ceará: Mecanismos de compensação financeira como

estratégia de gestão de risco. In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 17. p. 340-364.

SILVA, Luciano Meneses Cardoso da; FREITAS, Marcos Airton de Sousa. Aplicativo para Operação de Reservatórios em Situações de Escassez. In: *VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste*, 2002, Maceió. Anais do VI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Porto Alegre: Editora da ABRH, 2002. v. 1

SILVA, Silvia Rayanne Alves da. *Desenvolvimento de Equação de Liberação Ótima em Reservatórios em Períodos de Estiagem: Estudo de Caso do Açude Pedras Brancas*. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Instituto Federal do Ceará, Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Campus Quixadá, 2019. 62 f.: il.

SILVEIRA, Geraldo Lopes da.; TUCCI, Carlos Eduardo Morelli.; SILVEIRA, André L.L. da. Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.3, jul/set 1998, 111-131.

SINGH, Vijay P., organizador. *Computer models of watershed hydrology*. Rev. ed, Water Resources Publications, 1995.

SOARES, Nazaré Suziane; COSTA, Juliana Alcântara; COSTA, Carlos Alexandre Gomes. Escoamento superficial na bacia hidrográfica do açude Forquilha-CE pelo método SCS-CN. In: *XVIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 2019, Fortaleza. anais..., 2019. p. 1-12.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. A política nacional de recursos hídricos: Desafios para sua implantação no semiárido brasileiro. In: SOUSA MEDEIROS, Salomão de. *Recursos hídricos em regiões áridas e semiáridas*. [S.l.], Instituto Nacional do Semiárido, 2011. p. 1-26.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; COSTA, Leila Maria Carvalho; BECCO, José Eliseu. Alocação de água: eficiência e justiça. In: SOUZA FILHO, Francisco de Assis de; CAMPOS, José Nilson B; AQUINO, Sandra Helena Silva de (org.). *Gerenciamento de Recursos Hídricos no Semiárido*. Fortaleza: Expressão Gráfica e Editora, 2013. Cap. 8. p. 155-185.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. *Modelos Hidrológicos - Parte I*. [s.n.], 2020. (7m57s). Disponível em: https://www.youtube.com/playlist?list=PLCc_upGIW7aGXczIDWK0TjUWheHcaOqvs. Acesso em: 27 nov. 2020.

SOUZA FILHO, Francisco de Assis de. *Alocação de água no Ceará*. [s.n.], 2020. (16m14s). Disponível em: <https://www.facebook.com/fastefufc/videos/399016411346772/>. Acesso em: 26 mar. 2021.

SRIKANTHAN, Ratnasingham; MACMAHON, Thomas Aquinas. Stochastic Generation of Monthly Streamflows. *Journal of the Hydraulics Division*, [S.l.], ASCE, vol. 108, n. HY3, 1980.

SVANIDZE, Givi Gedeonovich. *Mathematical modeling of hydrologic series for hydroelectric and water resources computations*. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, U.S.A. 1980.

TINOCO, Vicente *et al.* Evaluation of reservoir operation strategies for irrigation in the Macul Basin, Ecuador. *Journal Of Hydrology: Regional Studies*, [S.l.], v. 5, p. 213-225, mar. 2016.

TODINI, Ezio. Rainfall-runoff modeling: Past, present and future. *Journal of Hydrology*, [S.l.], v. 100, p. n.1/3, 341-352, 1988.

TURGUT, Mert Sinan *et al.* A novel Master–Slave optimization algorithm for generating an optimal release policy in case of reservoir operation. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 577, p. 1-24, out. 2019.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4ª edição. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2007.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ. *Regionalização de vazões das sub-bacias Acaraú e Jaguaribe*. [s.n.], Fortaleza, 2001. 78 p.

VIEIRA, Dirceu Brasil. *As técnicas de irrigação*. 1. Ed. São Paulo: Ed. Globo, 1989. 263p.

VIEIRA, Allan Sarmiento *et al.* Escolha das regras de operação racional para subsistema de reservatórios no semiárido nordestino. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v. 7, n. 1, p. 37-50, jan. 2010.

VILLELA, Swami Marcondes; MATTOS, Arthur, *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill, São Paulo - SP, 1975.

WANG, Jiabiao *et al.* Improving real-time reservoir operation during flood season by making the most of streamflow forecasts. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], jan. 2021.

WEHN, Uta *et al.* Stakeholder engagement in water governance as social learning: lessons from practice. *Water International*, [S.l.], v. 43, n. 1, p. 34-59, 24 nov. 2017.

WURBS, Ralph A. Reservoir-System Simulation and Optimization Models. *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 119, no 4, julho de 1993, p. 455–72.

WURBS, Ralph A. *Modeling and analysis of reservoir system operations*. Englewood Cliffs: Prentice- Hall. 1996.

WURBS, Ralph A. *Comparative Evaluation of Generalized River/reservoir System Models*. [S.l.], Tech. Rep. 282. Texas Water Resources Institute, 2005.

YAKOWITZ, Sidney. Dynamic programming applications in water resources. [S.l.], *Water Resour. Res.*, 18(3), 673–696. 1982

YANG, Guang *et al.* A Bayesian adaptive reservoir operation framework incorporating streamflow non-stationarity. *Journal Of Hydrology*, [S.l.], v. 594, p. 1-18, mar. 2021.

YEH, William W.-G. Reservoir management and operation models: a state-of-the-art Review. *Water Resources Research*, Washington, v.21, n.12, p.1797-1818. 1985.

ZHANG, Shuping, FOERSTER, Saskia, MEDEIROS, Pedro, de ARAÚJO, José Carlos. Bathymetric Survey of Water Reservoirs in North-Eastern Brazil Based on TanDEM-X Satellite Data. *Science of The Total Environment*, [S.l.], vol. 571, novembro de 2016, p. 575–593.

ZIAEI, Mina; SHUI, Lee Teang; GOODARZI, Ehsan. Optimization and simulation modelling for operation of the Zayandeh Rud Reservoir. *Water International*, [S.l.], v. 37, n. 3, p. 305-318, maio 2012.

APÊNDICE A – ROTINA DO PROGRAMA DE EXECUÇÃO DO MODELO AGUIARVM

```

PROGRAM AguiarVM
! Programa para desagregação de vazões anuais do
método de Aguiar: AguiarVM

implicit none
real U,S,a,b,c,d,om
real ::
An(1000),H(1000),Rmm(1000),Va(1000),alfa(1000
)
real :: Me(1000),P(1000),Qmm(1000),Qms(1000)
integer Na
integer Nm
character*30
arqent1,arqent2,arqsai1,arqsai2,titulo1,titulo2
common /dados1/
An,H,Rmm,Va,alfa,Na,U,S,a,b,c,d,arqent1,arqsai1,t
itulo1
common /dados2/
Me,P,Qmm,Qms,om,Nm,arqent2,arqsai2,titulo2
call entrada
call calculo1 !Cálculo do volume anual(Va), a partir
da precipitação anual(H)
call calculo2 !Cálculo da Vazão escoada (Qms), a
partir da precipitação mensal (P)
call saida

END PROGRAM AguiarVM

subroutine entrada
real U,S,a,b,c,d,om
real ::
An(1000),H(1000),Rmm(1000),Va(1000),alfa(1000
)
real :: Me(1000),P(1000),Qmm(1000),Qms(1000)
integer Na
integer Nm
character*30
arqent1,arqent2,arqsai1,arqsai2,titulo1,titulo2
common /dados1/
An,H,Rmm,Va,alfa,Na,U,S,a,b,c,d,arqent1,arqsai1,t
itulo1
common /dados2/
Me,P,Qmm,Qms,om,Nm,arqent2,arqsai2,titulo2
integer i
integer j

write (*,*)
'*****'
write (*,*) '      METODO DE AGUIAR
VERSAO MENSAL(AguiarVM)'
write (*,*) '      Departamento de Engenharia
Agricola-DENA'

write (*,*) ' Programa de Pos-graduacao em
Engenharia Agricola-PPGEA'
write (*,*) '      Universidade Federal do Ceara-
UFC'
write (*,*) '      Francisco Delfabio Teixeira de
Oliveira (2021)'
write (*,*)
'*****'
write (*,*)
write (*,*) 'Entre com o nome do arquivo de
entrada dos dados anuais: '
read (*,*) arqent1
open (11,file=arqent1,status='old')
write (*,*) 'Entre com o nome do arquivo de saídas
anuais: '
read (*,*) arqsai1
open (12,file=arqsai1,status='new')
read (11,*)titulo1
read (11,*)S
read (11,*)U
read (11,*)a
read (11,*)b
read (11,*)c
read (11,*)d
read (11,*)Na

write (*,*) 'Entre com o nome do arquivo de
entrada dos dados mensais: '
read (*,*) arqent2
open (13,file=arqent2,status='old')
write (*,*) 'Entre com o nome do arquivo de saídas
mensais: '
read (*,*) arqsai2
open (14,file=arqsai2,status='new')
read (13,*)titulo2
read (13,*)om
read (13,*)Nm

i = 1
do while (i.le.Na)
  read (11,*) An(i),H(i)
  i = i+1
enddo

j = 1
do while (j.le.Nm)
  read (13,*) Me(j),P(j)
  j = j+1
enddo
end subroutine

```



```

integer Na
integer Nm
character*30
arqent1,arqent2,arqsai1,arqsai2,titulo1,titulo2
common /dados1/
An,H,Rmm,Va,alfa,Na,U,S,a,b,c,d,arqent1,arqsai1,t
itulo1
common /dados2/
Me,P,Qmm,Qms,om,Nm,arqent2,arqsai2,titulo2
integer i
integer j

```

!Saída de resultados anuais (Bloco de notas)

```

write (12,*)
*****
write (12,*) '      METODO DE AGUIAR
VERSAO MENSAL(AguiarVM)'
write (12,*) '      Departamento de Engenharia
Agricola-DENA'
write (12,*) ' Programa de Pos-graduacao em
Engenharia Agricola-PPGEA'
write (12,*) '      Universidade Federal do Ceara-
UFC'
write (12,*) '      Francisco Delfabio Teixeira de
Oliveira (2021)'
write (12,*)
*****
write (12,*) '      TABELA DE SAÍDAS
ANUAIS'
write (12,*)
write (12,*) 'Titulo do projeto: ',titulo1
write (12,*) 'Dados principais de entrada:'
write (12,*) '-----
-----'
write (12,*) 'Area da bacia:',S/1000000,'km²'
write (12,*) 'Coeficiente de Correcao:',U
write (12,*) 'Coeficiente de H:',a
write (12,*) 'Coeficiente de H2:',b
write (12,*) 'Coeficiente de H3:',c
write (12,*) 'Coeficiente de H4:',d
write (12,*) 'Número anos da modelagem:',Na,'
anos'
write (12,*) '-----
-----'
write (12,*)
write (12,*) 'Dados de saída:'
write (12,*) 'H = Precipitacao anual (mm);'
write (12,*) 'Rmm = Escoamento anual(mm);'
write (12,*) 'Va = Volume escoado anual (hm³);'
write (12,*) 'Alpha = Fator de proporcionalidade
(m²).'
write (12,*) '-----
-----'
write (12,*) ' Ano   H(mm)   Rmm(mm)
Va(hm³) Alpha(m²)'

```

```

write (12,*) '-----
-----'
i=1
do while (i.le.Na)
  write (12,101)
  An(i),H(i)*1000,Rmm(i),Va(i),alfa(i)
  i=i+1
enddo
write (12,*) '-----
-----'
write (12,*) 'Programa concluído com sucesso'
101 format
(2x,F6.0,1x,F9.1,1x,F9.1,1x,F9.3,1x,F12.0)

```

!Saída de resultados mensais (Bloco de Notas)

```

write (14,*)
*****
write (14,*) '      METODO DE AGUIAR
VERSAO MENSAL(AguiarVM)'
write (14,*) '      Departamento de Engenharia
Agricola-DENA'
write (14,*) ' Programa de Pos-graduacao em
Engenharia Agricola-PPGEA'
write (14,*) '      Universidade Federal do Ceara-
UFC'
write (14,*) '      Francisco Delfabio Teixeira de
Oliveira (2021)'
write (14,*)
*****
write (14,*) '      TABELA DE SAÍDAS
MENSAIS'
write (14,*)
write (14,*) 'Titulo do projeto: ',titulo2
write (14,*) 'Dados de entrada:'
write (14,*) 'Fator de ajuste de proporcionalidade
mensal (Omega):',om
write (14,*) '-----
-----'
write (14,*) 'Dados de saída:'
write (14,*) 'Mês = Ordem numérica do Mês;'
write (14,*) 'P = Precipitação mensal (mm);'
write (14,*) 'Qmm = Volume mensal (m³/mês);'
write (14,*) 'Qms = Vazão escoada (m³/s);'
write (14,*) '-----
-----'
write (14,*) ' Mês   P(mm)   Qmm(m³/mês)
Qms(m³/s) '
write (14,*) '-----
-----'
j=1
do while (j.le.Nm)
  write (14,102) Me(j),P(j),Qmm(j),Qms(j)
  j=j+1
enddo

```

```

write (14,*) '-----'
-----'
write (14,*) 'Programa concluído com sucesso'
102 format (2x,F5.0,6x,F5.1,3x,F12.1,2x,F9.3)

!Saída de resultados mensais (Tela)

write (*,*)
'*****'
write (*,*) '    METODO DE AGUIAR
VERSAO MENSAL(AguiarVM)'
write (*,*) '    Departamento de Engenharia
Agricola-DENA'
write (*,*) ' Programa de Pos-graduacao em
Engenharia Agricola-PPGEA'
write (*,*) '    Universidade Federal do Ceara-
UFC'
write (*,*) ' Francisco Delfabio Teixeira de
Oliveira (2021)'
write (*,*)
'*****'
write (*,*) '    TABELA DE SAÍDAS
MENSAIS'
write (*,*)
write (*,*) 'Titulo do projeto: ',titulo2
write (*,*) 'Dados de entrada:'
write (*,*) 'Fator de ajuste de proporcionalidade
mensal (Omega):',om
write (*,*) '-----'
-----'
write (*,*) 'Dados de saída:'
write (*,*) 'Mês = Ordem numérica do Mês;'
write (*,*) 'P = Precipitação mensal (mm);'
write (*,*) 'Qmm = Volume mensal (m³/mês);'
write (*,*) 'Qms = Vazão escoada (m³/s);'
write (*,*) '-----'
-----'
write (*,*) '  Mês   P(mm)   Qmm(m³/mês)
Qms(m³/s)  '
write (*,*) '-----'
-----'
j=1
do while (j.le.Nm)
  write (*,103) Me(j),P(j),Qmm(j),Qms(j)
  j=j+1
enddo
write (*,*) '-----'
-----'
write (*,*) 'Programa concluído com sucesso'
103 format (2x,F5.0,6x,F5.1,3x,F12.1,2x,F9.3)

end subroutine

```

APÊNDICE B – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS ANUAIS DO MODELO AGUIARVM

Cedro_EntradaA *Titulo do Projeto*
224000000 *Area S (m²)*
1.30 *Coeficiente de Correcao U*
28.53 *Coeficiente de H*
112.95 *Coeficiente de H²*
351.91 *Coeficiente de H³*
118.74 *Coeficiente de H⁴*
3 *Número de anos da modelagem Na*

1963	1.1136
1964	1.926
1965	0.8049

APÊNDICE C – EXEMPLO DE ARQUIVO DE ENTRADA DE DADOS MENSAIS DO MODELO AGUIARVM

Cedro_EntradaM *Titulo do Projeto*

1.26 *omega: fator de ajuste de proporcionalidade*

36 *Número de meses da modelagem Nm*

1	117
2	322.8
3	269
4	194.8
5	81.2
6	25.7
7	22.4
8	7.9
9	0
10	1.4
11	1.9
12	69.5
13	201.1
14	266.4
15	460.3
16	421.2
17	315.3
18	186
19	50
20	12.8
21	4.6
22	1.3
23	0
24	7
25	60.3
26	43.4
27	166.5
28	219.4
29	119.5
30	179.1
31	6.1
32	0.8
33	1.4
34	3.3
35	0
36	5.1

APÊNDICE D – EXEMPLO DE ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS ANUAIS DO MODELO AGUIARVM

METODO DE AGUIAR VERSAO MENSAL(AguiarVM)
Departamento de Engenharia Agricola-DENA
Programa de Pos-graduacao em Engenharia Agricola-PPGEA
Universidade Federal do Ceara-UFC
Francisco Delfabio Teixeira de Oliveira (2021)

TABELA DE SAÍDAS ANUAIS

Título do projeto: Cedro_EntradaA

Dados principais de entrada:

Area da bacia: 224.000 km²
Coeficiente de Correcao: 1.30000
Coeficiente de H: 28.5300
Coeficiente de H2: 112.950
Coeficiente de H3: 351.910
Coeficiente de H4: 118.740
Número anos da modelagem: 3 anos

Dados de saída:

H = Precipitacao anual (mm);

Rmm = Escoamento anual(mm);

Va = Volume escoado anual (hm³);

Alpha = Fator de proporcionalidade (m²).

Ano	H(mm)	Rmm(mm)	Va(hm ³)	Alpha(m ²)
1963.	1113.6	195.1	56.806	51011412.
1964.	1926.0	516.3	150.341	78058472.
1965.	804.9	83.5	24.303	30193808.

Programa concluído com sucesso

APÊNDICE E – EXEMPLO DE ARQUIVO DE SAÍDA DE DADOS MENSAL DO MODELO AGUIARVM

*****	27.	166.5	3154277.0	1.217
METODO DE AGUIAR VERSAO	28.	219.4	4465561.0	1.723
MENSAL(AguiarVM)	29.	119.5	2076832.4	0.801
Departamento de Engenharia Agricola-DENA	30.	179.1	3457947.3	1.334
Programa de Pos-graduacao em Engenharia Agricola-PPGEA	31.	6.1	48914.0	0.019
Universidade Federal do Ceara-UFC	32.	0.8	3782.8	0.001
Francisco Delfabio Teixeira de Oliveira (2021)	33.	1.4	7656.7	0.003
*****	34.	3.3	22555.1	0.009
TABELA DE SAÍDAS MENSALIS	35.	0.0	0.0	0.000
	36.	5.1	39035.2	0.015

Titulo do projeto: Cedro_EntradaM

Dados de entrada:

Fator de ajuste de proporcionalidade mensal
(Omega): 1.26000

Programa concluído com sucesso

Dados de saída:

Mês = Ordem numérica do Mês;

P = Precipitação mensal (mm);

Qmm = Volume mensal (m³/mês);

Qms = Vazão escoada (m³/s);

Mês	P(mm)	Qmm(m ³ /mês)	Qms(m ³ /s)
1.	117.0	3416500.8	1.318
2.	322.8	12272232.0	4.735
3.	269.0	9753381.0	3.763
4.	194.8	6494555.5	2.506
5.	81.2	2156293.8	0.832
6.	25.7	506038.0	0.195
7.	22.4	425578.7	0.164
8.	7.9	114466.3	0.044
9.	0.0	0.0	0.000
10.	1.4	12935.7	0.005
11.	1.9	19006.3	0.007
12.	69.5	1772426.4	0.684
13.	201.1	10344733.0	3.991
14.	266.4	14743247.0	5.688
15.	460.3	29366466.0	11.330
16.	421.2	26258832.0	10.131
17.	315.3	18231074.0	7.034
18.	186.0	9375758.0	3.617
19.	50.0	1791110.0	0.691
20.	12.8	321739.7	0.124
21.	4.6	88612.5	0.034
22.	1.3	18029.7	0.007
23.	0.0	0.0	0.000
24.	7.0	150398.5	0.058
25.	60.3	877238.6	0.338
26.	43.4	579635.5	0.224