



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

**JOSÉ WELLINGTON BATISTA LOPES**

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM MESO-BACIA DO SEMIÁRIDO**

**FORTALEZA**

**2013**

JOSÉ WELLINGTON BATISTA LOPES

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM MESO-BACIA DO SEMIÁRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Agrícola**.

Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido

Linha de pesquisa: Hidrologia e Hidrosedimentologia

Orientador: Prof. José Carlos de Araújo

FORTALEZA

2013

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- L853m      Lopes, José Wellington Batista.  
              Modelagem hidrossedimentológica em meso bacia do semiárido / José Wellington Batista Lopes. –  
              2013.  
              83 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias,  
              Departamento de Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola,  
              Fortaleza, 2013.  
              Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.  
              Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.  
              Coorientação: Dr. Pedro Henrique Augusto de Medeiros.
1. Monitoramento hidrológico. 2. Assoreamento. 3. Disponibilidade hídrica. 4. Semiárido. I. Título.

JOSÉ WELLINGTON BATISTA LOPES

**MODELAGEM HIDROSEDIMENTOLÓGICA EM MESO-BACIA DO SEMIÁRIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido. Linha de pesquisa: Hidrologia e Hidrosedimentologia.

Aprovado em: 05/08/2013

**BANCA EXAMINADORA**



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



Prof. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Co-orientador)  
Instituto Federal de Ciência, Tecnologia e Educação do Ceará - IFCE - Campus Maracaniú



Prof. Francisco Nildo da Silva  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB



Prof. Carlos Alexandre Gomes Costa  
Universidade Federal de Goiás - UFG

Aos meus Pais **José Calisto Lopes** e **Antonia Batista Lopes** pela dedicação, apoio, confiança e amor incondicionais.

Aos meus irmãos **Carlos Werisson** e **Jamille**, por todo o apoio e confiança sem mensuração.

À **Larissa** pelo amor, carinho e incentivo.

*A vocês a Minha eterna gratidão*

“A vida só é possível através dos desafios.

A vida só é possível quando você tem tanto o bom tempo quanto o mau tempo, quando tem prazer e dor; quando tem inverno e verão, dia e noite; quando tem tristeza tanto quanto felicidade, desconforto tanto quanto conforto. A vida passa entre essas duas polaridades. Movendo-se entre essas duas polaridades, você aprende a se equilibrar e entre essas duas asas, você aprende a voar...”

*Osho*

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Ceará (UFC) e ao Departamento de Engenharia Agrícola pela oportunidade de concluir o Mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de mestrado e auxílio financeiro por meio do projeto ECOMASD.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo auxílio financeiro por meio do projeto IPAS.

Ao Grupo de Pesquisas Hidrossedimentológica do Semiárido (HIDROSED), pelo apoio intelectual e financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Prof. José Carlos de Araújo, pela amizade, orientação, confiança, ensinamentos e pelo exemplo profissional de competência e honestidade.

Ao Prof. Pedro Medeiros, pela orientação, dedicação, ensinamentos e incentivo durante o mestrado.

Aos membros da banca: Prof. Pedro Medeiros, Prof. Francisco Nildo e Prof. Carlos Alexandre pelas contribuições.

Aos amigos e colaboradores de campo, Cleidson, Auderice, Dona Gorete, pelo apoio e hospitalidade.

Aos amigos, Marcos Amauri, Marcos Neves, Alexandre Reuber, André Rufino, Newdmar Fernandes, Alan Sombra, Ricardo Andrade pela convivência, respeito, incentivo, pelos conhecimentos partilhados e pelas conversas jogadas fora.

Aos colegas do Grupo HIDROSED pelo convívio: Sávio Fontenele, José Vidal, George Mamede, Teresa Raquel, Cicero Lima, Cristian Epifânio, Deborah Mithya, Mário Wiegand, Chistine Farias, Artênio Cabral, Débora Barboza, Diego Castro, Ana Caroline, Eliakim Araújo, Efraim Araújo, Kassius e em especial aos companheiros Laldiane Pinheiro, Leonardo Schramm e Thiago Xavier pelo apoio em campo para a realização das batimetrias.

E a todos, que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste trabalho.

## RESUMO

Problemas práticos relacionados aos recursos hídricos e a necessidade de resolução desses foi o que impulsionou a modelagem hidrológica, pois uma melhor compreensão do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica se fez necessária. Assim esta pesquisa foi conduzida com o objetivo de avaliar, por meio da modelagem hidrossedimentológica, o comportamento de uma bacia hidrográfica de meso-escala no semiárido, assim como sua disponibilidade hídrica. A área foco do estudo foi a Bacia Representativa de Madalena, Ceará, com 124km<sup>2</sup>. Os modelos WASA-SED (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with Sediment Dynamics Component*) e VYELAS (*Volume-YieldElasticity*) foram utilizados na avaliação. Algumas conclusões puderam ser constatadas a partir dos resultados obtidos: i) O monitoramento contínuo das variáveis hidrológicas em bacias hidrográficas do semiárido se faz necessário, pois a insuficiência de dados dificulta a análise do desempenho de modelos hidrológicos; ii) A quantificação do assoreamento em reservatórios é essencial para a validação de rotinas sedimentológicas do modelo para longos períodos de avaliação; iii) Os parâmetros do solo são determinantes na qualidade dos resultados e o detalhamento da parametrização melhora sensivelmente o desempenho do modelo WASA; iv) O predomínio do cenário de estiagem para os próximos anos compromete o abastecimento devido ao baixo volume acumulado atualmente no reservatório; v) A disponibilidade hídrica do reservatório estratégico da bacia (Marengo) em anos extremos de baixa pluviometria, para uma vazão com 90% de garantia, é 96% inferior à disponibilidade para os anos médios.

**Palavras-chave:** Monitoramento hidrológico. Assoreamento. Modelagem hidrossedimentológica. Disponibilidade hídrica.



## ABSTRACT

Practical problems related to water resources and the need for resolution of these was what drove the hydrological modeling, since understanding of the hydrological behavior of the basin was needed. So, this research was conducted to assess, through hydrossedimentological modeling, the behavior of a semiarid meso scale watershed as well as its water availability. The study area was the Madalena Representative Basin, Federal State of Ceará, with 124km<sup>2</sup>. Rainfall, accumulated volume and sedimentation in two reservoirs were monitored. The WASA-SED (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments Sediment Dynamics with Component*) and VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*) models were used in the evaluation. Some conclusions could be obtained from the results: i) Continuous monitoring of hydrological variables in watersheds of the Brazilian semiarid is necessary because the scarcity of data makes it difficult to analyze the performance of hydrological models, ii) Sedimentation measurements in reservoirs is essential for validating of sedimentological routines of model for evaluation of long periods, iii) The soil parameters are determinant in the quality of the results and details of the parameterization significantly improves the performance of the WASA model, iv) The predominance of drought scenario for the next years must affect water supply due to the low volume currently accumulated in the reservoir, v) Water availability of the strategic reservoir of the basin (Marengo reservoir) in extreme years of low rainfall, for 90% reliability yield, is 96% lower than the availability expected for regular years.

**Keywords:** Hydrological monitoring. Siltation. Hydrossedimentological modeling. Water availability.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>9</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>11</b>
2.1. Hidrologia do semiárido.....	11
2.2. Modelagem hidrológica.....	12
2.2.1. Considerações iniciais .....	12
2.2.2. Modelos hidrológicos e sedimentológicos de base física.....	15
2.2.3. Modelo WASA-SED.....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODO .....</b>	<b>25</b>
3.1. Área de estudo.....	25
3.1.1. Reservatórios monitorados.....	29
3.2. Monitoramento.....	31
3.2.1. Hidrológico.....	31
3.2.2. Levantamentos batimétricos.....	33
3.3. Parametrização do modelo WASA-SED.....	34
3.4. Simulação de cenários.....	44
3.5. Avaliação da disponibilidade hídrica .....	44
<b>4.RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>46</b>
4.1. Monitoramento.....	46
4.1.1. Hidrológico.....	46
4.1.2.Levantamentos batimétricos.....	47
4.2. Parametrizações do Modelo WASA-SED.....	49
4.3. Simulação de cenários.....	62
4.4. Avaliação da disponibilidade hídrica .....	63
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>67</b>
<b>ANEXO A - CÓPIA DOS PROJETOS DE CONSTRUÇÃO E AMPLIAÇÃO DO AÇUDE MARENGO.....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXO B - CÓPIA DOS PROJETOS DE CONSTRUÇÃO E AMPLIAÇÃO DO AÇUDE SÃO JOAQUIM .....</b>	<b>81</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade de entender o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica para a resolução de problemas práticos foi o que impulsionou a hidrologia, e mais ainda a modelagem hidrológica. Inicialmente a modelagem se concentrava em responder questões mais “simples” como a distribuição de uma série de vazões para as mais diversas aplicações. No entanto, a necessidade de responder a questões mais complexas, ligadas ao estudo de fluxo de elementos tóxicos no solo, às modificações climáticas, ao sistema solo-planta-atmosfera entre outros, estimulou a busca por uma representação mais fiel dos processos físicos. Com isso, discussões mais relevantes sobre a modelagem hidrológica foram impulsionadas pela necessidade de lidar com problemas ambientais e que exigiam a compreensão dos processos físicos. Esses problemas exigiram e exigem o conhecimento do comportamento da bacia, de como os processos físicos ocorrem e interagem no sistema.

Assim a modelagem hidrológica passou a ser vista como uma ferramenta fundamental no planejamento da bacia hidrográfica, podendo-se citar como exemplos de aplicação as estimativas de disponibilidade de recursos hídricos, previsão de vazão, análise hidrológica e impactos das alterações do uso do solo sobre o comportamento hidrossedimentológico. Apesar dos avanços em quantidade e qualidade dos modelos hidrológicos e sedimentológicos, a representação fiel dos processos físicos é tarefa difícil e que demanda tempo, haja visto que a forma de representação de cada processo do ciclo no sistema varia com a escala da bacia, com os objetivos dos estudos envolvidos, com a disponibilidade de dados, seja para calibração ou validação, e com precisão dos parâmetros medidos e que são fornecido ao modelo. Todos esses fatores somados refletem na qualidade dos resultados encontrados, entre outras palavras, os modelos hidrológicos adequados para uma determinada escala ou clima não são, em geral, adequados para a simulação em condições diferentes. Por este fato que, em uma mesma bacia, a aplicação de diferentes modelos quase sempre resulta em resultados diferentes.

A análise dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas é uma das vertentes que destacam as vantagens na utilização de modelos hidrológicos, em que a utilização daqueles proporciona custos menores e, além disso, economia de tempo para analisar mudanças físicas e antrópicas na bacia hidrográfica, como por exemplo, a mudança da cobertura do solo, que em geral, em uma bacia experimental, levaria muito tempo e pessoal capacitado para analisar os fenômenos hidrológicos (NÓBREGA, 2008).

Particularmente em regiões semiáridas, o desenvolvimento da hidrologia e da modelagem se deu um pouco tardiamente. As simulações ocorriam pela adequação de modelos hidrológicos desenvolvidos para outras regiões e/ou clima diferentes e, em muitos casos, sem avaliação da acurácia e precisão do modelo, conduzindo a considerações para além da realidade regional. Essas questões ressaltam a importância na escolha de um modelo para simulação, em que não somente os princípios conceituais do modelo, mas também da sua robustez, precisão e facilidade de parametrização devem ser levados em consideração. A disponibilidade de dados e parâmetros é também determinante na escolha do modelo, em muitas situações a utilização de modelos mais complexos é impossibilitada devido ao pequeno número de dados e parâmetros medidos.

No semiárido, a modelagem torna-se necessária devido aos processos hidrológicos particulares e à dinâmica populacional existente, em que a relação crescimento demográfico e irregularidade na distribuição espacial das concentrações populacionais dificulta o gerenciamento dos recursos hídricos. Em muitos casos, os locais das concentrações populacionais, onde geralmente se constata maiores demandas em relação às ofertas, nem sempre coincidem com os locais das disponibilidades hídricas. Desta forma, o atendimento aos volumes demandados pode ser dificultado devido a menor disponibilidade hídrica (FIGUEIREDO, 2011). A disponibilidade hídrica também sofre alterações devido à erosão hídrica, pois a taxa de produção de sedimentos eleva-se, promovendo redução gradativa das águas armazenadas nos reservatórios superficiais (DE ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006).

Dessa forma, este estudo foi conduzido com o objetivo geral de avaliar, por meio da modelagem hidrossedimentológica, o comportamento de uma bacia hidrográfica de meso-escala no semiárido.

Para tal foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- i) Medir as principais variáveis hidrológicas e o assoreamento em dois reservatórios da bacia;
- ii) Parametrizar e avaliar o desempenho de um modelo hidrossedimentológico desenvolvido para grandes bacias semiáridas;
- iii) Avaliar a disponibilidade hídrica em anos normais e secos;
- iv) Simular possíveis cenários de seca nos anos subseqüentes.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Hidrologia do semiárido

A compreensão da dinâmica dos processos hidrológicos no semiárido está diretamente relacionada com a disponibilidade e análise das informações relativas a solo, vegetação, e clima. Isto devido às peculiaridades existentes nesse ambiente, como por exemplo, as precipitações, que são caracterizadas pela grande variabilidade espacial e temporal (GOODRICH *et al.*, 2008; WERNER; GERSTENGARBE, 2003).

Devido à variabilidade pluviométrica, a dinâmica das águas superficiais torna-se um fator essencial para a manutenção do homem no semiárido, permitindo a exploração agrícola, desde que mediante a adoção de técnicas de manejo que maximizem o uso eficiente da água, com o propósito de minimizar os impactos da escassez hídrica durante os períodos de estiagem (MALVEIRA; DE ARAÚJO; GÜNTNER, 2011; KROL *et al.*, 2006; VAN OEL *et al.*, 2008).

A evaporação/evapotranspiração no semiárido é outra característica que reflete as especificidades do ambiente. O processo evaporação/evapotranspiração é responsável pela perda até 80% da precipitação. A evaporação no solo é elevada, podendo atingir até 28% da precipitação (DUQUE, 1980; PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988). Em termos potenciais, a evapotranspiração pode ser até cinco vezes maior que o total precipitado, assinalando a deficiência hídrica natural existente nesse sistema (DE ARAÚJO; PIEDRA, 2009; MAMEDE, 2008).

Sobre o escoamento superficial, Chow, Maidment e Mays (1988) relatam que os principais mecanismos de escoamento que podem acontecer em bacias hidrográficas são: escoamento superficial hortoniano, escoamento subsuperficial, escoamento de base, escoamento superficial por saturação subsuperficial e precipitação direta no canal.

Já Haan *et al.* (1993) destacam que os processos mais relevantes na geração do escoamento superficial são a precipitação, a infiltração, o armazenamento superficial e fluxo de água sobre o solo. Além disso, a escala também apresenta relevância, como constatado por Cammeraat (2004), em medidas realizadas na região semiárida da Espanha. Este autor demonstra que as condições críticas para geração de escoamento são distintas nas diferentes escalas. Na pequena escala, pequenos eventos chuvosos, de curta duração, porém com intensidade moderada, são capazes de gerar escoamento; em escalas maiores, a resposta da bacia é extremamente dependente da intensidade da chuva e de uma duração mínima que

permita a conexão das encostas com a rede de drenagem. Segundo Medeiros (2009), de um modo geral, os limites a serem ultrapassados para a ocorrência de escoamento superficial aumentam com a escala espacial.

No caso do semiárido, o escoamento superficial geralmente ocorre quando a intensidade da chuva supera a capacidade de infiltração e armazenamento do solo (processo Hortoniano), conforme constatado por Costa (2007) na Bacia Experimental de Aiuaba, no semiárido brasileiro, e Cantón *et al.* (2001), no semiárido espanhol. Este processo é a principal fonte de geração de picos de descarga em bacias, especialmente em áreas com estrutura de solos compactados ou desprovidos de cobertura vegetal (GARFUR *et al.*, 2003; KIMOTO *et al.*, 2002; THOMAZ, 2009).

Em escala de microbacias, o escoamento superficial em regiões semiáridas na Austrália apresenta grande variabilidade espacial e temporal do coeficiente de escoamento, e mesmo em áreas com cobertura vegetal e declividade semelhantes, o arranjo da cobertura vegetal pode determinar as respostas hidrológicas diferentes (BARTLEY *et al.*, 2006).

Hidrologicamente, o papel da vegetação reside em promover o aumento da matéria orgânica, o que intensifica o processo de infiltração da água no solo, assim como a redução da densidade e o aumento da condutividade hidráulica (BRACKEN; CROKE, 2007). Boix-Fayos *et al.* (2006) relatam que em ambientes extremos (*e.g.* condições áridas e semiáridas) onde a vegetação é esparsa ou ocorre em faixas (CAMMERAAT, 2004) estes efeitos são mais evidentes. Nessas regiões, observou-se que as áreas de solo desprovidas de vegetação funcionam como promotoras de escoamento, enquanto que as vegetadas funcionam como receptoras de tais recursos.

## 2.2. Modelagem hidrológica

### 2.2.1. Considerações iniciais

Conceitualmente, a modelagem hidrológica pode ser entendida como a conexão de funções que representam processos associados dentro do ciclo hidrológico, considerando a bacia hidrográfica como unidade experimental (MALVEIRA, 2009).

Os modelos surgem a partir da necessidade do homem em representar os processos que ocorrem na natureza, sejam na problemática hidrológica, ambiental, social ou econômica. As primeiras iniciativas na busca dessas soluções são datadas do início do século

XX, onde se buscava uma representação hidrológica a partir da teoria da hidrógrafa unitária (SHERMAN, 1932).

A intensificação da pesquisa e a utilização de modelos hidrológicos são fortemente observadas nas últimas décadas, motivadas pela necessidade de soluções práticas para problemas de caráter sócio-hidrológico, aos quais podem-se citar os estudos de controle de inundações, operação de reservatórios, planejamento do uso da água. Com essa intensificação, o surgimento de diferentes modelos ocorre e já no início da década de 70, Yevjevich (1974) abriu a discussão sobre os dois grandes grupos de modelos hidrológicos para a geração de séries de vazão, dividindo-os em:

i) os modelos estocásticos, que tratam os processos de forma estatística no tempo, com as variáveis respondendo a uma distribuição específica. Nesses é apresentada uma distribuição de soluções associadas a uma probabilidade, segundo uma determinada distribuição de probabilidade. Assim, os resultados são expressos em termos de probabilidade.

ii) os modelos determinísticos ou conceituais, usualmente denominados de modelos chuva-vazão, têm por objetivo a representação do sistema físico natural, ou seja, os processos do ciclo hidrológico.

Adiante, ao referir-se a modelos hidrológicos, ter-se-á em mente o segundo grupo supracitado, portanto, a classe dos modelos determinísticos.

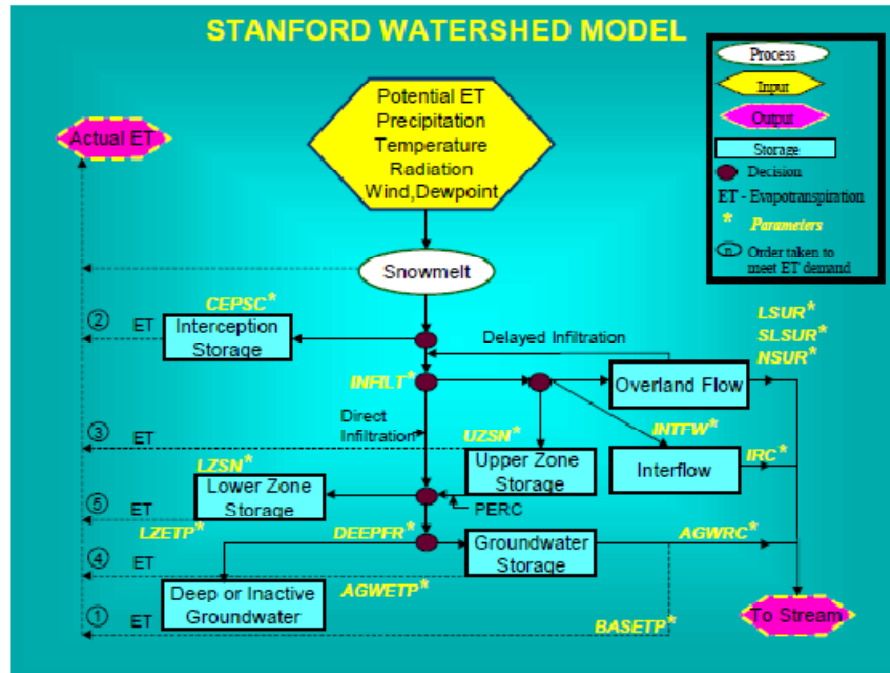
Algumas subdivisões aparecem na classe dos modelos determinísticos, a depender da forma como os processos físicos são representados no modelo. Nesses, equações diferenciais ou formas simplificadas baseadas nessas podem ser utilizadas na representação dos processos físicos ou mesmo equações empíricas baseadas em experimentação. Assim, pode-se denominar que os modelos determinísticos podem ser de base física ou empírica.

A variabilidade espacial a qual os processos são representados é outra forma de subdivisão. Caso a variabilidade espacial dos processos seja explicitamente considerada, o modelo é dito semi-distribuído; caso os processos sejam considerados de forma concentrada, diz-se que o modelo é concentrado. A evolução da modelagem traz consigo novos conceitos sobre os modelos, como é o caso dos modelos semi-distribuídos como, por exemplo, o WASA-SED. Nesse modelo especificamente, a variabilidade espacial é considerada por meio de unidades hidrológicas (*Landscape units* ou unidades de paisagem), ou seja, áreas que apresentam características similares.

A discretização temporal também trata de uma subdivisão dos modelos, sendo que essa escala de tempo está diretamente relacionada ao fenômeno hidrológico e aos objetivos do estudo.

Segundo Xavier (2002), grande parte da pesquisa desenvolvida em hidrologia nas décadas de 70 e 80 foi direcionada à categoria dos modelos conceituais concentrados, seguindo a tendência inaugurada por Crawford e Linsley (1966) no desenvolvimento do modelo Stanford (SWM). Na Figura 1 é apresentado o fluxograma do modelo Stanford.

Figura 1 - Fluxograma do Stanford Watershed Model IV (Adaptado de Donigian, 2006)



Conforme Donigian (2006), a evolução da modelagem hidrológica está diretamente relacionada com as alterações na legislação ambiental e os avanços na qualidade e quantidade de processamento dos dados. Seguindo essa lógica, o mesmo autor elaborou uma “linha do tempo” das principais atividades desenvolvidas na modelagem em 40 anos (1960 – 2004), derivadas a partir do SWM (Figura 2).

A dificuldade na utilização dos modelos conceituais concentrados residiu na operacionalização. Para que os modelos fossem capazes de simular uma série representativa de vazões, o processo de calibração dos parâmetros tornou-se o objetivo principal da pesquisa. A pesquisa em torno do tema calibração foi iniciada por Dawdy e O’Donnell (1965) e concentrou grande parte dos esforços na modelagem hidrológica nas décadas de 70 e 80.

Beven (1989) apresentou os principais problemas que comprometem o uso dos modelos conceituais concentrados:

i) as equações utilizadas nos modelos conceituais são apenas uma representação aproximada dos processos físicos reais, e introduzem erros a partir da estrutura do modelo;



ii) a heterogeneidade espacial da resposta do sistema não pode ser reproduzida por parâmetros médios da bacia;

iii) a acurácia com a qual um modelo pode ser calibrado e validado depende fortemente dos erros nos dados de entrada; muitos dados de entrada, como a evapotranspiração e a precipitação, estão sujeitos a consideráveis incertezas;

iv) há um grande perigo de parametrização excessiva quando se deseja simular todos os processos relevantes;

v) os parâmetros calibrados podem apresentar determinado grau de interdependência, dificultando o processo de calibração, e fornecendo diferentes conjuntos de parâmetros que levariam a resultados semelhantes.

Até o exposto pode-se perceber que a modelagem hidrológica está sujeita a diversas incertezas e a uma série de limitações associadas a questões intrínsecas (*e.g.* estrutura do modelo) ou extrínsecas (*e.g.* dados de entrada) que, a depender do estudo e dos objetivos que o circundam, podem conduzir a resultados irreais ou sem alguma utilização prática. No entanto, em muitos casos, o grau de confiabilidade dos resultados obtidos está diretamente relacionado aos critérios de parametrização e coerência adotados pelos usuários.

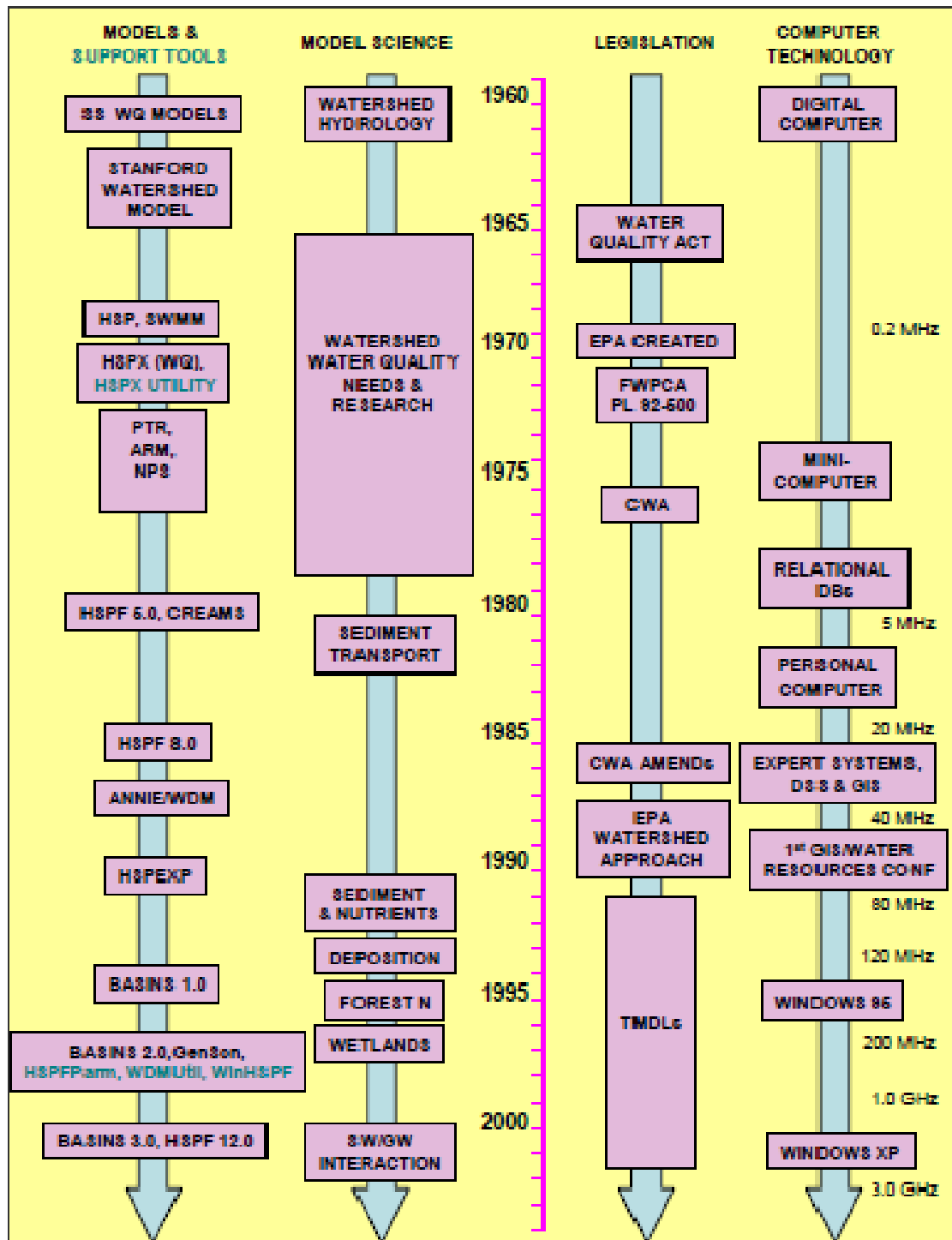
### *2.2.2. Modelos hidrológicos e sedimentológicos de base física*

Concernente às limitações expostas dos modelos conceituais concentrados, principalmente na representação da variabilidade espacial do uso e ocupação do solo na bacia e, em alguns casos, do grande número de parâmetros calibráveis, os modelos de base física permitem uma melhor compreensão dos processos ocorrentes na bacia, sob diferentes escalas e em diversas abordagens práticas.

Passo inicial para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos de base física, o Stanford Watershed Model (SHE) impulsionou as pesquisas no tema. Nesse modelo, o comportamento da bacia hidrográfica foi representado por um conjunto de equações diferenciais associadas aos diferentes processos físicos e em diferentes escalas. Apesar disso, Beven (1989) expôs críticas aos modelos de base física e em especial ao SHE. O autor destaca algumas questões centrais como, o uso de equações desenvolvidas em laboratório para a escala de campo; a consideração de que os parâmetros do modelo em uma determinada escala são os mesmos para escalas inferiores e superiores. Outro aspecto dos modelos de base física é a necessidade de um denso conjunto de informações sobre a bacia, o que em muitos casos

requer práticas onerosas como coleta e monitoramento constantes ou a incorporação de parâmetros de outras regiões, visando uma boa representação dos processos envolvidos.

Figura 2 - Evolução da modelagem hidrológica, 1960 – 2004. (DONIGIAN, 2006).



As leis básicas da física tais como o princípio da conservação da massa, energia e quantidade de movimento (equações de Saint Venant) são as equações básicas para

representar os processos hidrológicos. Desde o desenvolvimento dos primeiros modelos de base física, diversos estudos mostram vantagens e desvantagens daqueles, sendo que nesse tópico destacam-se as pesquisas de base e que impulsionaram a discussão no tema como os estudos de Abbott *et al.* (1986 a e b), Beven (1989) e Beven e O'Connell (1982).

As questões ressaltadas nos trabalhos ora citados explicitam problemas ainda discutidos, questionados e que norteiam grande parcela dos esforços na modelagem hidrológica, como a escala, a calibração, a validação e as incertezas inerentes aos parâmetros e resultados, podendo ser considerados uma restrição à aplicação dos modelos. Além do mais, a necessidade de calibração dos parâmetros e as hipóteses empregadas para solucionar as equações geram erros difíceis de serem suprimidos.

Mesmo diante das limitações dos modelos físicos, percebe-se a ampla faixa de utilização desses, em função de permitir um melhor entendimento dos processos hidrológicos e por representar mais similarmente o desenvolvimento do ciclo. Diversos modelos de base física, que calculam escoamento, erosão e o transporte de sedimentos, foram e estão sendo desenvolvidos para atender diferentes regiões e objetivos.

Adiante são descritos de forma sucinta alguns modelos hidrossedimentológicos, apresentando-se suas principais características.

### *I. Modelo AÇUMOD*

O AÇUMOD é um modelo hidrológico distribuído que efetua o balanço hídrico dos açudes implantados na rede de drenagem da bacia hidrográfica, considerando as respectivas regras de operação dos mesmos. Esse modelo mantém a mesma estrutura do modelo SIMMQE, tendo simplificado e adaptado ao microcomputador os seus comandos de leituras, entradas de dados e saídas, além das modificações introduzidas para torná-lo mais adaptado às regiões semiáridas. A bacia hidrográfica é discretizada em uma malha retangular formada por quadrículas quadradas. Em cada quadrícula, o ciclo hidrológico é representado por um modelo hidrológico conceitual, onde em cada uma dessas, são indicados parâmetros descritivos do ciclo hidrológico, assim como atributos para representar o sentido da drenagem e a possível existência de elementos da arquitetura hidráulica da bacia hidrográfica (SILANS *et al.*, 2000).

## *II. Modelo DiCaSM*

DiCaSM (*Distributed Catchment Scale Model*) é um modelo físico e distribuído, que apresenta boa interface computacional, desenvolvido no Centro de Ecologia e Hidrologia (CEH) do Reino Unido (D'AGOSTINO *et al.*, 2010; MONTENEGRO; RAGAB, 2010; MONTENEGRO; RAGAB, 2012; RAGAB; BROMLEY, 2010; RAGAB *et al.*, 2010). Com escala espacial variável e temporal diária, o modelo foi concebido para representar uma estratégia integrada de gestão da água considerando as mudanças globais do clima e mudanças de uso da terra sobre os fluxos de água.

No DiCaSM, existe um banco de dados que serve como base para rotinas de estimativas de alguns parâmetros físico-hídricos necessários no modelo.

DiCaSM permite que um número de diferentes processos físicos sejam simulados na bacia, efetuando o cálculo do balanço hídrico, da interceptação de chuva, infiltração, evapotranspiração, absorção de água pelas plantas e dinâmica de umidade do solo, bem como os fluxos de corrente e recarga de água subterrânea para cada quadrado da grade (“pixel”).

## *III. Modelo MODHAC*

MODHAC é a sigla de Modelo Hidrológico Auto-Calibrável, desenvolvido por Lanna e Schwarzbach (1989) no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É um modelo concentrado de chuva-vazão que, a partir de precipitações diárias, gera uma série de vazões sintéticas. O MODHAC é um modelo conceitual global, com doze parâmetros de calibração e apresenta um bom desempenho no que diz respeito a escoamento (LANNA; SCHWARZBACH, 1989; SOUZA FILHO, 2003; TUCCI, 2005). O seu balanço hídrico permite simular processos de interceptação da água pela vegetação, o armazenamento da água no solo desde a superfície do terreno até a profundidade radicular das plantas, a infiltração e a recarga após a saturação, a evaporação e a evapotranspiração. Foi utilizado durante a fase de diagnóstico do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Ceará – PERH (CEARÁ, 1996) para a geração do escoamento.

## *IV. Modelo TOPMODEL*

O TOPMODEL é um modelo determinístico e semi-distribuído, fundamentado nas características topográficas da bacia hidrográfica. Hidrologicamente, o modelo parte do

pressuposto que a dinâmica da água é o resultado das influências das características de solo e relevo de toda a bacia contribuinte. A partir disso, fornece a vazão do rio e a distribuição espacial da umidade ao longo do tempo, o que permite estimar, através de calibragem, valores característicos de algumas propriedades físico-hídricas do solo. A base conceitual do modelo, cujos principais componentes são: armazenamentos e fluxos na zona não-saturada; armazenamentos e fluxos na zona saturada; e propagação do fluxo na sub-bacia, considera as seguintes hipóteses simplificadoras: i) a dinâmica da zona saturada pode ser obtida por sucessivas representações de estados uniformes; ii) o gradiente hidráulico da zona saturada é igual à declividade local do terreno; iii) a distribuição da transmissividade com a profundidade do solo ocorre segundo uma função exponencial; iv) no intervalo de tempo existe homogeneidade espacial da taxa de recarga que contribui para a área saturada (BEVEN *et al.*, 2002).

#### V. O Modelo KINEROS

O KINEROS (*Kinematic Runoff Erosion Model*) é um modelo de eventos, distribuído, onde a bacia é representada por planos retangulares, canais e elementos de armazenamento. Foi proposto por Woolhiser *et al.*, (1990), ao qual incorporaram o modelo hidrológico de Rovey *et al.*, (1977). O modelo faz uso da equação da continuidade de sedimentos (BENNETT, 1974) e calcula o desprendimento das partículas pelo impacto das gotas de chuva através da equação de Meyer e Wischmeier (1969). A infiltração é modelada através da equação de Smith-Parlange (SMITH *et al.*, 1993). Uma versão melhorada do modelo, o KINEROS2, traz como diferencial a redistribuição da umidade do solo durante a chuva e a capacidade de comportar mais de um pluviógrafo (SMITH *et al.*, 1993).

#### VI. O Modelo WESP

O WESP (*Watershed Erosion Simulation Program*) é um modelo distribuído, que simula eventos de chuva, e foi elaborado para ser aplicado a pequenas bacias nas regiões semiáridas. Foi proposto por Lopes (1987) e utiliza a componente hidráulica do modelo KINEROS e as técnicas de modelagem do WEPP (descrito a seguir). Neste, a bacia é discretizada através de um sistema de planos de escoamento que descarregam em canais de drenagem. O modelo só considera perda de água por infiltração, não sendo considerada a evaporação, e o excesso de infiltração é dado pela equação de Green e Ampt (1911) com

tempo de empoçamento calculado para uma chuva não permanente (CHU, 1978). A simplificação pela onda cinemática foi empregada para a equação da quantidade de movimento. O modelo considera erosão por impacto das gotas de chuva e pelo fluxo superficial. Estes processos são considerados não permanentes e variados e são descritos dinamicamente utilizando taxas de erosão e deposição, simultaneamente, ao invés da abordagem convencional onde são utilizadas funções de transporte de sedimentos para fluxo permanente.

#### *VII. O Modelo WEPP*

O modelo WEPP (*Water Erosion Prediction Project*) é do tipo conceitual e considera a física do solo, a ciência das plantas e a mecânica da erosão (FLANAGAN; NEARING, 1995). Foi desenvolvido pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para ser aplicado a grandes bacias. Nele são incluídos os componentes para planos, canais e para irrigação. A infiltração é baseada na equação de Green e Ampt e o escoamento nos canais é tratado através da modificação da componente de escoamento concentrado do modelo CREAMS. Neste modelo a bacia também é representada por planos e canais.

#### *VIII. O Modelo SHE*

O modelo SHE (*Système Hydrologique Européen*) é do tipo distribuído, de base física e cujas equações são solucionadas através de um esquema de diferenças finitas. Foi desenvolvido pelo consórcio europeu de institutos de hidrologia (BATHURST, 1986; BATHURST *et al.*, 1995). A bacia é discretizada através de uma grade horizontal e vertical. Na versão melhorada, SHETRAN, considera os processos de erosão, transporte e deposição de sedimento e poluentes. Devido à sua concepção, o modelo requer grande número de informações e uma estrutura computacional onerosa, o que inviabiliza a sua utilização pessoal.

#### *IV. O Modelo WASA-SED*

O WASA-SED é um modelo semi-distribuído de processos orientados para o balanço de água e sedimentos, que foi especificamente desenvolvido para simular a geração de escoamento e disponibilidade de água em grandes bacias sob condições semiáridas

(GÜNTNER; BRONSTERT, 2004). A hierarquia top-down para discretização das unidades hidrológicas, utiliza o conceito de paisagem, permitindo capturar a variabilidade dos sistemas. Nesse esquema, são definidas menores unidades de modelagem, o que permite menor trabalho para a parametrização, bem como menor demanda computacional. O WASA inclui um módulo de balanço hídrico diário para reservatórios sob uma abordagem do tipo cascata, que inclui os pequenos reservatórios estatisticamente e explicita os reservatórios estratégicos (GÜNTNER *et al.*, 2004). Os açudes são divididos em seis classes de acordo com a capacidade de armazenamento, sendo admitido um reservatório hipotético em cada classe para o balanço hídrico na mesma. No tópico 2.2.3 apresenta-se uma melhor descrição desse modelo, o qual foi utilizado nesta pesquisa.

### 2.2.3. Modelo WASA-SED

O modelo WASA-SED (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with Sediment Dynamics Component*) (BRONSTERT *et al.*, 2007; FRANCKE *et al.*, 2008; GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004; GÜNTNER *et al.*, 2004; MAMEDE, 2008; MALVEIRA, 2009; MEDEIROS, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2010) é um modelo determinístico, físico e semi-distribuído, que simula o balanço hídrico de uma unidade de drenagem.

O modelo WASA-SED é voltado principalmente para representar o processo chuva-deflúvio e balanço hídrico diário, o qual, por sua vez, inicia-se com o cálculo da umidade do solo, regida pelas trocas hídricas entre solo, vegetação e atmosfera. A partir de um evento de precipitação, a umidade de uma espessura de solo qualquer é avaliada pelo fluxo vertical somado aos fluxos laterais superficiais e subsuperficiais. Assim, a forma do terreno, a litologia e a estrutura das camadas de solo constituem as bases do modelo de escoamento.

Os processos contemplados na modelagem hidrológica são: interceptação (balanço simplificado - GÜNTNER, 2002); evapotranspiração (modelo de duas camadas – SHUTTLEWORTH; WALLACE, 1985); evaporação de reservatórios superficiais (PENMAN, 1948; MONTEITH, 1965); infiltração (GREEN; AMPT, 1911); percolação entre horizontes de solo (ARNOLD *et al.*, 1990); escoamento sub-superficial (relação simplificada para fluxo saturado baseada na equação de Darcy); armazenamento subterrâneo (modelagem simplificada com base em um modelo linear de armazenamento).

Para representar a variabilidade espacial das características da bacia (tais como topografia, tipo de solo e cobertura vegetal) e sua influência na geração de escoamento, é adotada uma discretização espacial hierarquizada (Figura 3) da área de estudo em cinco níveis de escala (GÜNTNER; BRONSTERT, 2004):

Nível 1: Sub-bacia - unidade básica, delimitada de acordo com a localização de reservatórios e postos fluviométricos;

Nível 2: Unidade hidrológica (landscape unit – LU) - associação de vertentes com sequência semelhante de litologia, solo e vegetação ao longo da encosta;

Nível 3: Componente de terreno (TC) - sub-área de uma LU com mesma posição na encosta e características semelhantes de declividade, solo e vegetação;

Nível 4: Componente de solo e vegetação (SVC) - consiste em uma combinação específica de solo e cobertura vegetal em um TC, sendo representado por seu percentual de área dentro do respectivo TC;

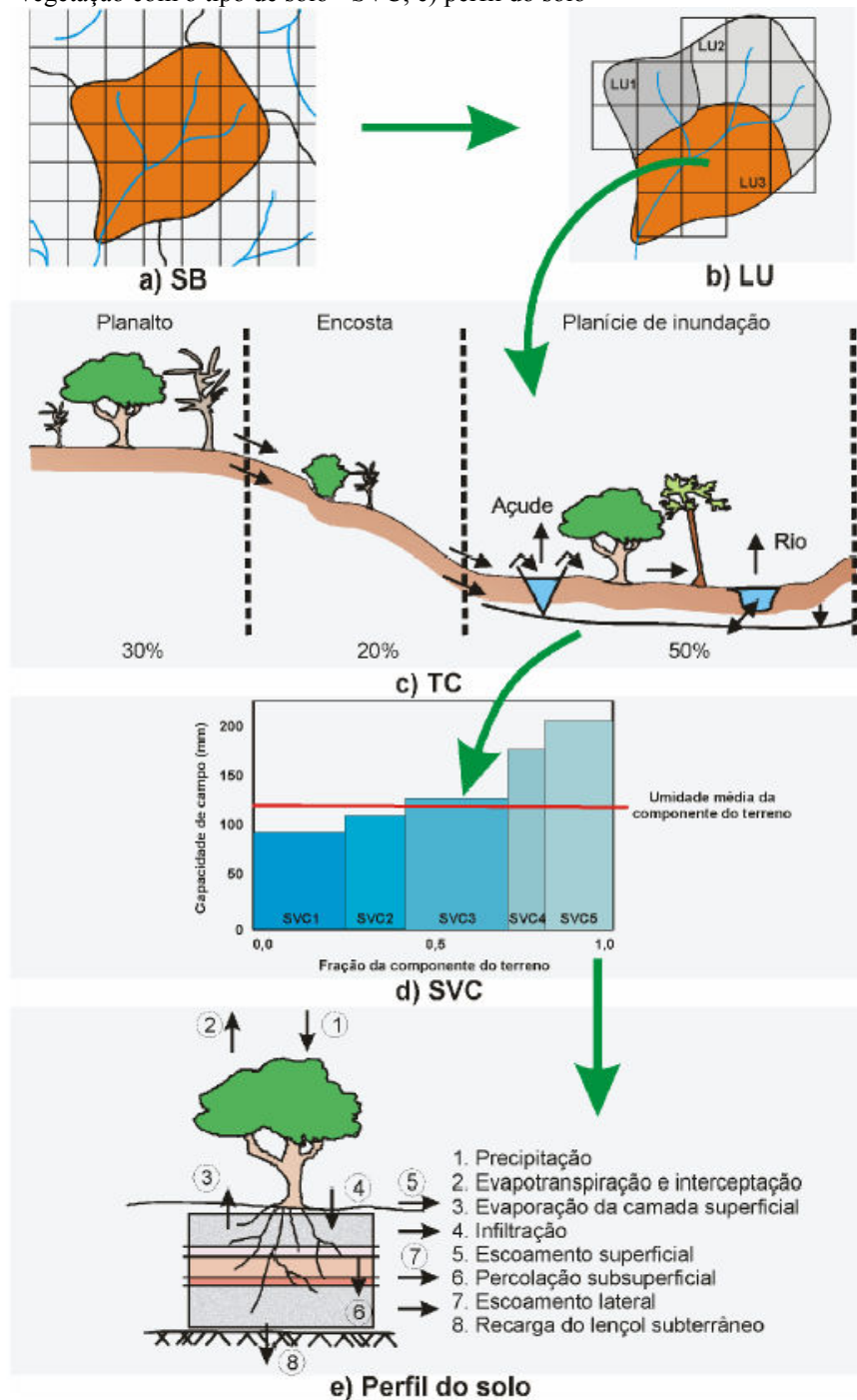
Nível 5: Perfil do solo - menor componente espacial da hierarquia.

Para a obtenção de resultados na escala de bacia ou sub-bacia (nível 1), faz-se necessário a identificação/parametrização dos demais níveis hierárquicos inferiores. Para tanto, são identificadas as unidades de paisagem (LU) (nível 2); essas por sua vez são divididas em componentes de terreno (TC), que são formados em função da topografia (declividades) da encosta (nível 3); no nível subsequente (nível 4) cada componente de terreno é subdividido em associações de solo e cobertura vegetal, gerando o conjunto solo-vegetação (SVC), expresso em percentual que ocupa no respectivo TC.

No modelo WASA-SED, o balanço hídrico é iniciado na escala de perfil de solo (nível 5), onde são especificados os horizontes de solos em cada SVC considerando processos verticais e horizontais, e as transferências de fluxo e agregação do escoamento são computadas até a escala de sub-bacia. Ainda no perfil ocorre o detalhamento da relação entre os horizontes de solo nos diferentes tipos de componente solo-vegetação. Os horizontes de solo vão até o topo do embasamento impermeável ou até a profundidade da zona de raízes, quando o embasamento for muito profundo. Uma vez calculado o escoamento de uma sub-bacia, o mesmo é propagado na rede de drenagem para, então, ser transferido para os reservatórios superficiais (Figura 4).

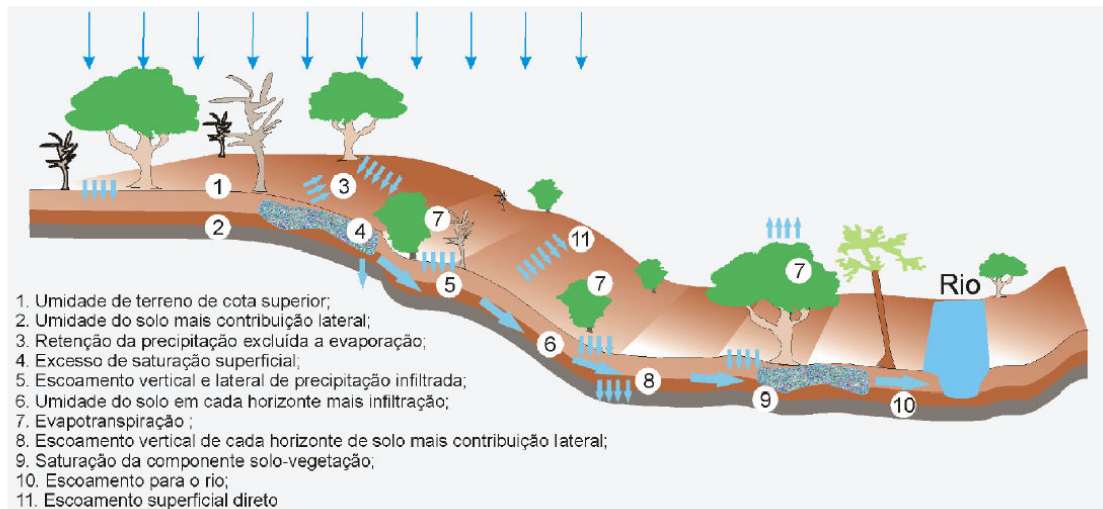


Figura 3 - Hierarquia da modelagem espacial do modelo WASA-SED: a) sub-bacia(SB); b) unidades de estudo na SB (landscape unit) - LU; c) associação da vegetação com a declividade do terreno - TC; d) associação da vegetação com o tipo de solo - SVC; e) perfil do solo



Fonte: Guntner (2002), adaptado por Malveira (2009)

Figura 4 - Representação esquemática da série temporal do balanço hídrico do solo no modelo WASA a partir da atualização do teor de água do solo



Fonte: Malveira (2009)

Medeiros *et al.* (2010) consideram que o modelo WASA-SED apresenta algumas características que o diferenciam da maioria dos demais modelos de simulação hidrossedimentológica, como aplicabilidade a extensas áreas. Como exemplo dessa capacidade do modelo, Güntner e Brosnert (2004) simularam todo o Estado do Ceará e do Piauí, com uma área de aproximadamente 400.000 km<sup>2</sup>.

Ainda, o modelo contempla características específicas do semiárido simulando processos que se destacam nesses ambientes como, por exemplo, escoamento do tipo Hortoniano, reinfiltração de escoamento a jusante, redistribuição lateral de escoamento e densa rede de pequenos açudes.

Com base nestas informações, e na constatada aplicabilidade do modelo (GÜNTNER e BROSNTERT, 2004; GÜNTNER *et al.*, 2004; MALVEIRA, DE ARAÚJO e GÜNTNER, 2011; MAMEDE, 2008; MEDEIROS *et al.*, 2010; MUELLER *et al.*, 2010), o modelo WASA-SED foi adotado para a realização do presente estudo.

### 3. MATERIAIS E MÉTODO

#### 3.1. Área de estudo

##### *Bacia Representativa de Madalena*

Antes de fazer qualquer caracterização da bacia objeto de estudo, denominada de Bacia Representativa de Madalena (BRM), cabe uma descrição do Assentamento 25 de Maio (A25M) ao qual a BRM encontra-se inserida.

O A25M (Figura 5) é situado entre os municípios de Madalena (maior parte do seu território), Boa Viagem e Quixeramobim, microrregião dos Sertões de Quixeramobim, Sertão Central do Estado do Ceará, distante a 210 km de Fortaleza e tem como principal acesso a BR-020. A área ocupada é de aproximadamente 230 km<sup>2</sup> e habitada por 586 famílias, organizadas em 13 comunidades. O A25M dispõe de onze pequenos açudes (capacidades entre 60 mil e 5 milhões de m<sup>3</sup>) e um açude de médio porte (~15 hm<sup>3</sup>), todos situados na sub-bacia do rio Banabuiú, pertencente à bacia do rio Jaguaribe (COELHO, 2013).

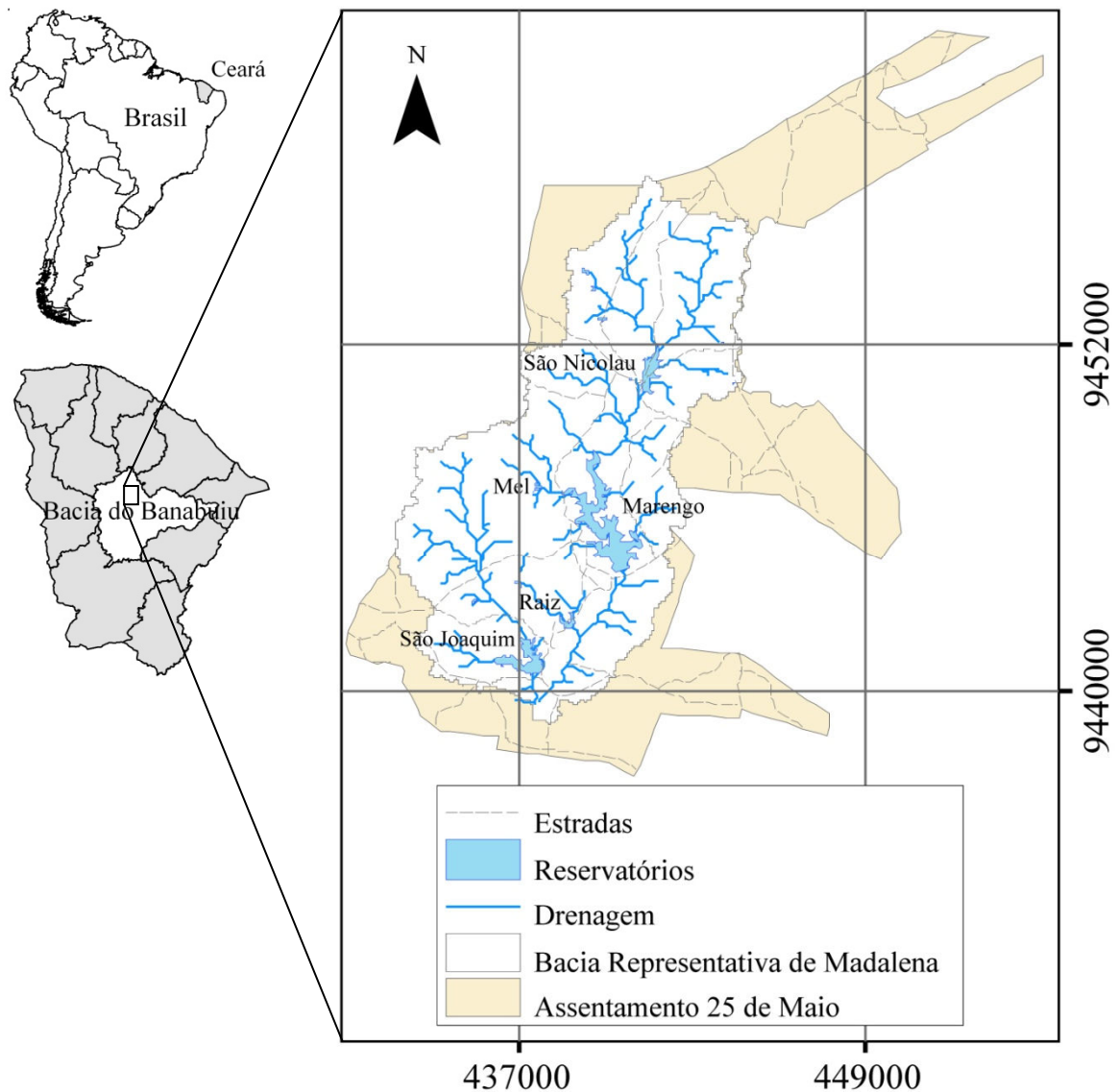
Constituído por 16 Associações de Moradores e um Conselho Comunitário, o A25M foi criado em 1989 pelo INCRA, no qual oficializou a área anteriormente denominada de “Fazendas Reunidas São Joaquim”, como Assentamento “25 de Maio” (data de aniversário da ocupação na área).

O acesso à água é diferenciado entre as comunidades do A25M. Das 13 comunidades, apenas cinco (Paus Branco, Quietos, Raiz, Vila Angelim e São Joaquim) possuem sistema de abastecimento de água por rede de distribuição. Nas demais localidades da região, as famílias retiram água diretamente dos açudes (o transporte é realizado com o auxílio de animais) ou obtêm água proveniente de poços. No tocante ao esgotamento sanitário, o diagnóstico realizado no local aponta que o destino das águas cinzas (efluente de chuveiro e pias) em 99% dos casos é o quintal. As águas negras (efluente do sanitário) em 2% dos domicílios são direcionadas para fossas sépticas, em 70% dos casos tem como destino final a fossa rudimentar e os 28% restantes lançam o esgoto do vaso sanitário no quintal, acarretando sérios problemas de saúde pública (PINHEIRO, 2011).

No tocante a BRM, fará-se-a uma descrição geral das principais características hidrológicas. A área de captação é de aproximadamente 124 Km<sup>2</sup>, e contempla todos os reservatórios existentes. De todos, apenas cinco reservatórios superficiais são os principais utilizados no abastecimento hídrico das comunidades. Na Tabela 1 são apresentadas as

características dos principais reservatórios, sendo que uma melhor descrição é realizada no tópico subsequente sobre os reservatórios Marengo e São Joaquim, os quais foram utilizados na avaliação do desempenho hidrossedimentológico do modelo.

Figura 5 - Localização da área de estudo: Bacia Representativa de Madalena



Fonte: autor

Tabela 1 – Características gerais dos principais reservatórios da Bacia Representativa de Madalena e da população circunvizinha

Reservatório	Volume (hm <sup>3</sup> )	Bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> )	Bacia hidráulica (km <sup>2</sup> )	domicílios	famílias n°	pessoas
Raiz	2,50	5,29	0,29	15	15	72
Mel	0,06	3,02	0,03	15	40	64
Marengo*	15,30	75,38	2,84	36	36	193
São Nicolau	0,89	36,10	0,53	51	74	210
São Joaquim*	5,00	31,05	0,82	47	30	208

\*utilizado na validação do modelo WASA-SED

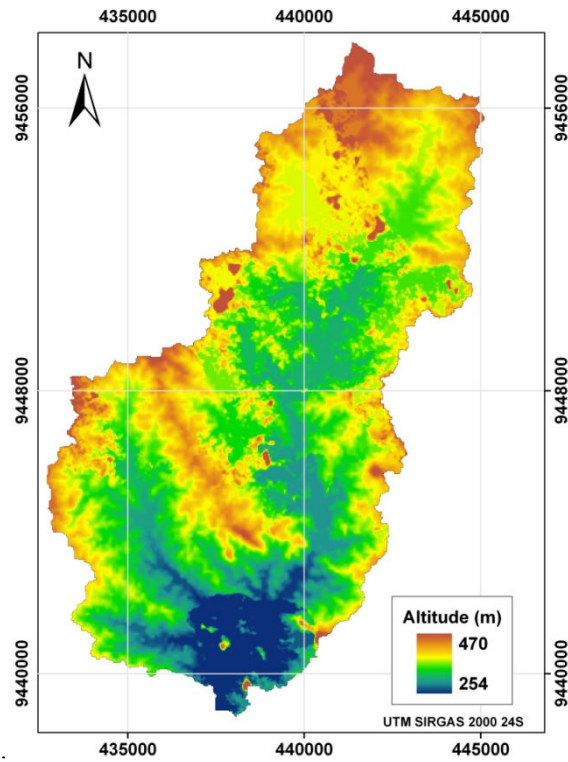
O clima é do tipo tropical semiárido, caracterizado pela variabilidade temporal das chuvas, períodos de estiagem prolongados e do regime de temperatura: a temperatura média é em torno de 26° C a 28° C e varia pouco durante o ano. Além dessas condições climáticas, a região está sujeita a ventos fortes e secos, contribuindo para a formação da paisagem seca durante o segundo semestre. Durante a estação chuvosa, geralmente de fevereiro a maio, a temperatura diminui ligeiramente, atingindo 25° C em média (LÓPEZ, 2011).

A região apresenta déficit hídrico natural, devido às altas temperaturas e altas taxas de evaporação, associado com a irregularidade pluviométrica. Por exemplo, a série histórica da precipitação do posto Madalena dos últimos 21 anos (1988-2011) apresentou média anual de 601 mm, sendo que a evaporação potencial média da zona é estimada em 2100 mm ano<sup>-1</sup>.

A BRM se encontra entre as cotas 250 e 470 m (Figura 6), sendo 53% da área com predominância de declives suaves (declividades entre 0 e 5%, classe A), nas quais o escoamento superficial tende a ser lento ou médio e a erosão hídrica não oferece maiores problemas. A outra parcela da bacia encontra-se dividida em: 31% para as declividades de 5 a 10%; 9% da área entre 10 e 15%, 5% entre 15 e 30% e 2% dividido entre as classes de 30 a 45% e maior que 45% (Figura 7).

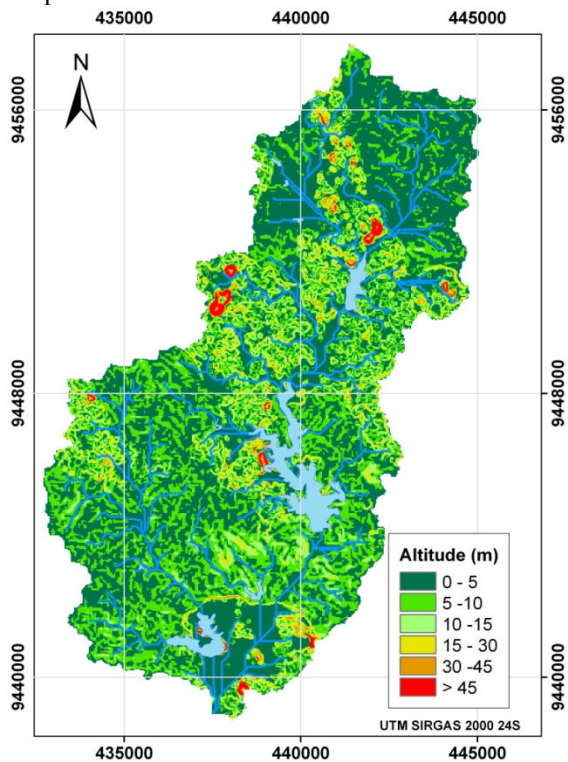
A formação geológica data do período Pré-Cambriano, sendo composta por rochas do embasamento cristalino, representadas por gnaisses, migmatitos, e plutônicas associadas com a composição metaplutônica predominantemente granítica (LÓPEZ, 2011).

Figura 6 - Representação da Bacia Representativa de Madalena pelo modelo numérico de terreno ASTER GDEM com resolução espacial de 30 metros



Fonte: autor

Figura 7 - Classes de declividades da Bacia Representativa de Madalena



Fonte: autor



### 3.1.1. Reservatórios monitorados

#### I. Marengo

A barragem do Marengo foi construída em 1934 e ampliada em 1956 por meio do projeto de açudagem cooperativa do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS (Figura 8). A barragem represa o rio efêmero denominado de Ipueiras ou Marengo, o qual constitui um dos trechos do subsistema do Rio Quixeramobim/ Rio Banabuiu, estando inserido no sistema Rio Jaguaribe. As principais características do reservatório antes e após a ampliação são apresentadas na Tabela 2.

A área superficial inundada pelo reservatório é de 285 ha. A barragem de terra homogênea possui cerca de 415 m de comprimento. O vertedouro é do tipo muro-vertedouro com 65 m de largura (Figura 9). A capacidade atual de armazenamento é de 15,3 hm<sup>3</sup>, conforme batimetria realizada em 2011 pelo Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido – HIDROSED ([www.hidroсед.ufc.br](http://www.hidroсед.ufc.br)).

Figura 8 – Vista geral do açude Marengo



Fonte: autor

Figura 9 – Vertedouro do açude Marengo (A) e tomada d'água localizada na parte central da barragem (B)



Fonte: Autor

Tabela 2\* – Características hídricas e técnicas do reservatório Marengo

	<b>Construção (1934)</b>	<b>Ampliação (1956)</b>
<b>Características hídricas</b>		
Capacidade (hm <sup>3</sup> )	7,0	16,8
Bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	12,0	120,0
Bacia hidráulica (ha)	167,1	321,0
Precipitação média anual (mm)	787,7	787,7
Descarga fluvial (m <sup>3</sup> /s)	401,0	291,0
<b>Característica técnicas</b>		
<i>Barragem</i>		
Tipo	terra homogênea	terra homogênea
Extensão do coroamento (m)	213,7	415,0
Largura do coroamento (m)	3,0	5,0
Altura do maciço (m)	16,2	-
Largura máx. da base (m)	64,0	-
Vol. terra da fundação (m <sup>3</sup> )	8.919,0	2.145,0
Prof. da fundação (m)	7,5	-
Vol. terra do maciço (m <sup>3</sup> )	50.106,0	67.795,0
Taludes: montante e jusante (m)	2:1	2:1
Enrocamento	210,0	-
Área dos taludes (m <sup>2</sup> )	9.139,0	18.745,0
Empedramento (m <sup>3</sup> )	-	4.988,0
<i>Sangradouro</i>		
Tipo	descarga laminar	muro-vertedouro
Largura (m)	120,0	65,0
Revanche (m)	2,0	2,5
Lâmina máx. de sangria (m)	1,0	1,5
Cota da soleira (m) <sup>2</sup>	114,5	296,0
Volume de corte (m <sup>3</sup> )	5.603,0	7.513,0
Alvenaria (m <sup>3</sup> )	207,0	154,0
<i>Tomada d'água</i>		
Tipo	galeria tubular	galeria tubular
Diâmetro (mm)	250,0	250,0
Extensão (m)	52,0	89,0
Cota de adução (m)	-	285,6
Vazão (l/s)	-	140,0

\*cópia dos projetos de construção e ampliação no Anexo A; <sup>1</sup>bacia hidrográfica calculado nesta pesquisa foi de 75km<sup>2</sup>; <sup>2</sup>cota arbitrária no primeiro projeto

## II. São Joaquim

A barragem do São Joaquim foi construída em 1932 e ampliada em 1950 também por meio do projeto de açudagem cooperativa do Departamento Nacional de Obras Contra as Secas – DNOCS. A barragem represa os riachos efêmeros denominados de Carnaúbas Tortas e Capa da Sela, os quais constituem trechos do subsistema do Rio Quixeramobim/ Rio Banabuiu, estando inseridos no sistema Rio Jaguaribe. As principais características do reservatório antes e após a ampliação são apresentadas na Tabela 3.

A área superficial inundada pelo reservatório é de 82 ha. A barragem é composta por três barramentos do tipo terra homogênea possuindo cerca de 384 m (principal), 363 m (auxiliar 1) e 149 m (auxiliar 2) de comprimento. O vertedouro é do tipo muro-vertedouro



com 50 m de largura. A capacidade atual de armazenamento é de 3,2 hm<sup>3</sup>, conforme batimetria realizada pelo grupo HIDROSED em 2012.

Tabela 3\* - Características hídricas e técnicas do reservatório São Joaquim

	Construção (1932)		Ampliação (1950)		
<b>Características hídricas</b>					
Capacidade (hm <sup>3</sup> )	1,8		5,1		
Bacia hidrográfica (km <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	35,6		30,8		
Bacia hidráulica (ha)	72,2		142,0		
Precipitação média anual(mm) <sup>2</sup>	662,0		852,2		
Descarga fluvial (m <sup>3</sup> /s)	259,0		98,3		
<b>Característica técnicas</b>					
<i>Barragem</i>	<b>principal</b>	<b>auxiliar</b>	<b>principal</b>	<b>aux. 1</b>	<b>aux. 2</b>
Tipo (T.H.: terra homogênea)	T.H.	T.H.	T.H.	T.H.	T.H.
Extensão do coroamento (m)	175,0	234,0	384,0	363,0	148,5
Largura do coroamento (m)	3,0	3,0	4,0	4,0	3,0
Altura do maciço (m)	9,0	8,3	12,0	11,0	5,0
Largura máx.dabase (m)	33,0	30,0	52,0	48,0	23,0
Vol. terra da fundação (m <sup>3</sup> )	3.503,0	10.425,0	2.587,0	2.660,0	149,0
Prof. da fundação (m)	3,0	4,5	1,5	1,5	1,5
Vol. terra do maciço (m <sup>3</sup> )	6.562,0	17.206,0	14.081,0	25.790,0	5.259,0
Taludes: montante e jusante (m)	2:1 e 1,5:1			2:1	
Área dos taludes (m <sup>2</sup> )	2.071,0	4.735,0	5.226,0	8.537,0	2.264,0
Empedramento (m <sup>3</sup> )	-	-	-	5.128,0	-
<i>Sangradouro</i>	descarga laminar		muro-vertedouro		
Largura (m)	80,0		50,0		
Revanche (m)	2,0		2,0		
Lâmina máx. de sangria (m)	1,0		1,0		
Cota da soleira (m)	102,0		105,0		
Volume de corte (m <sup>3</sup> )	9.827,0		345,0		
Alvenaria (m <sup>3</sup> )	-		192,0		
<i>Tomada d'água</i>	sifão		galeria tubular		
Diâmetro (mm)	150,0		150,0		
Extensão (m)	25,5		39,0		
Cota de adução (m)	-		-		
Vazão (l/s)	-		46,0		

\*cópia dos projetos de construção e ampliação no Anexo B; <sup>1</sup>Erro de cálculo pode ser a causa da redução da área da bacia hidrográfica (área calculada nesta pesquisa foi de 28,7km<sup>2</sup>); <sup>2</sup>O aumento na precipitação média anual pode ser devido a atualização dos dados

## 3.2. Monitoramento

### 3.2.1. Hidrológico

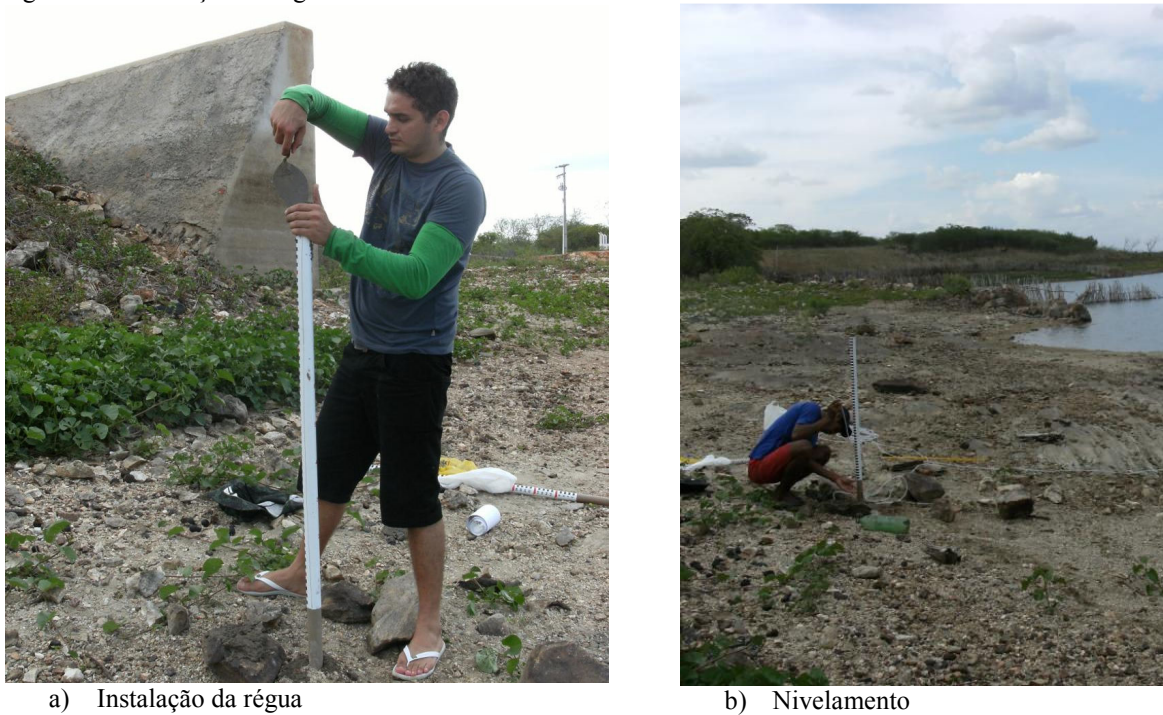
A BRM é monitorada a partir de uma estação, localizada próximo ao reservatório Marengo, na qual são registrados dados relativos a pluviometria (pluviômetro *Ville de Paris*) e evaporação potencial (método do tanque classe A) (Figura 10). O monitoramento do nível do reservatório Marengo é realizado a partir de réguas linimétricas (Figura 11). O período de monitoramento utilizado nesta pesquisa foi de 30 de outubro de 2011 a 30 de junho de 2012.

Figura 10 - Instalação de equipamentos para o monitoramento da precipitação e evaporação potencial



Fonte: autor

Figura 11 - Instalação de réguas linimétricas



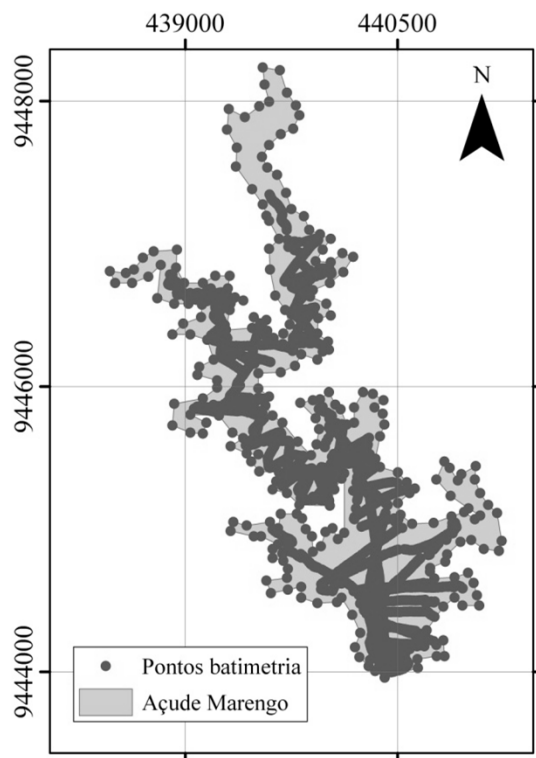
Fonte: autor

### 3.2.2. Levantamentos batimétricos

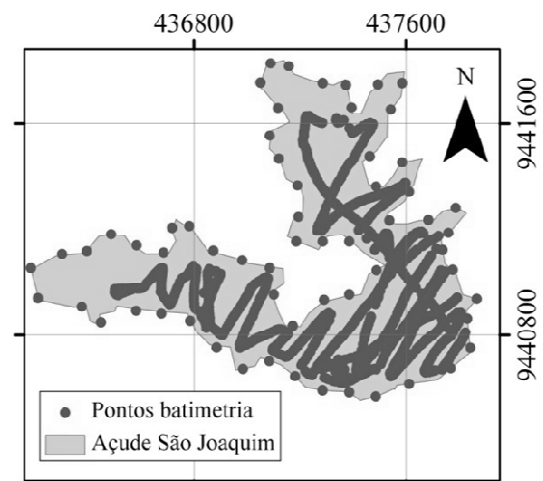
Foram realizados dois levantamentos batimétricos, um no açude Marengo em julho de 2011 e o segundo no açude São Joaquim em junho de 2012. Os levantamentos foram conduzidos com o objetivo de atualizar as curvas cota-área-volume daqueles reservatórios, possibilitando o procedimento de validação por meio das medidas do volume armazenado no Marengo e do assoreamento nos dois reservatórios.

Para os levantamentos batimétricos foi utilizado um GPS para o levantamento das coordenadas (x, y) dos pontos de contorno, margens dos açudes e seções batimétricas, assim como, um profundímetro para medida das profundidades ao longo de diversas seções batimétricas. Foram coletados mais de 3.000 pontos (profundidades) ao longo da bacia hidráulica do Marengo e aproximadamente 1.000 pontos no açude São Joaquim (Figura 12). A densidade de pontos coletados foram 11 pontos/ha e 12 pontos/há no Marengo e São Joaquim, respectivamente.

Figura 12 – Equipamentos e ilustração dos pontos coletados nas batimetrias



a) Levantamento batimétrico do Açude Marengo



b) Levantamento batimétrico do Açude São Joaquim



c) Equipamentos utilizados

d) Coleta de pontos *in situ*

### 3.3. Parametrização do modelo WASA-SED

A avaliação do comportamento hidrológico da Bacia Representativa de Madalena (BRM) foi realizada através de simulações utilizando-se o modelo hidrossedimentológico WASA-SED (*Water Availability in Semi-Arid Environments with a Sediment Dynamics Component*). As simulações diárias compreenderam o período de janeiro de 1950 (ano em que a ampliação da barragem do açude São Joaquim foi concluída) a dezembro de 2015, totalizando 24.106 dias. Para o período de julho de 2013 a dezembro de 2015 foi utilizada uma série sintética de chuva, permitindo a simulação de possíveis cenários. Uma melhor descrição é apresentada no tópico 3.4.

Na parametrização inicial para a BRM, a definição dos parâmetros foi a partir da primeira simulação realizada por Güntner (2002), cujo estudo contemplou os Estados do Ceará e Piauí. Devido à extensão da área simulada por Güntner (2002), os valores dos parâmetros apresentam-se em escala regional, exigindo, portanto, um melhor refinamento que permita simular de maneira precisa os processos na meso-escala. Assim, nesta pesquisa também foram incorporados parâmetros determinados em outras áreas, a partir dos estudos desenvolvidos por Costa (2012), Creutzfeldt (2006), Mamede (2008) e Medeiros (2009), mas

que apresentam similaridades com a área foco do estudo como clima semiárido e vegetação de Caatinga. Com essa prerrogativa, o estudo foi focado no maior detalhamento na parametrização a fim de obter melhores estimativas do modelo.

Os dados de precipitação diária foram obtidos junto à Fundação Cearense de Meteorologia – FUNCEME (2012) e ao Sistema de Informações Hidrológicas – Hidroweb (ANA, 2012). A Tabela 4 apresenta o período em que cada postos foi utilizado para o cálculo da média de precipitação de cada sub-bacia. O critério de escolha dos postos foi baseado na disponibilidade de dados e na distância ao centróide da sub-bacia. Devido a inexistência de estações de monitoramento, para o período de 1950 a 1989 foi utilizado a série de precipitação de apenas um posto pluviométrico em todas as sub-bacias.

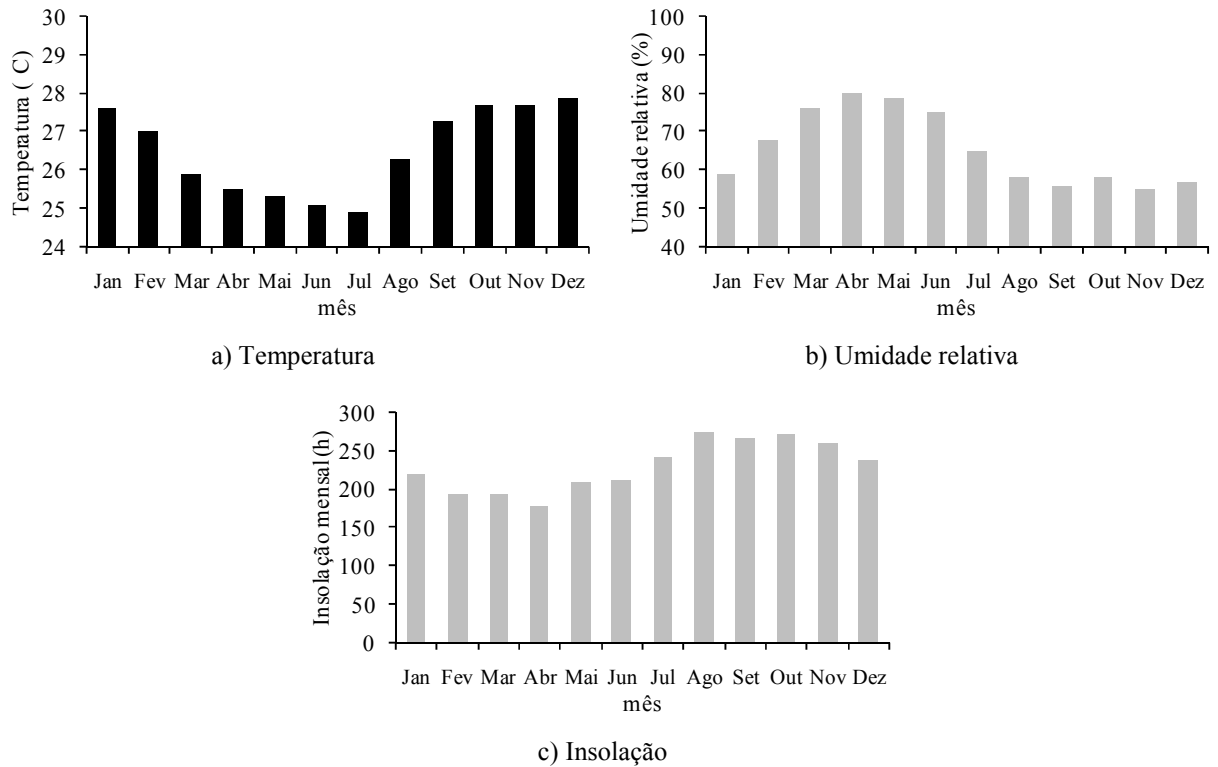
Devido à escassez e baixa consistência dos dados climatológicos diários disponíveis para a região, optou-se pela utilização de dados das Normais Climatológicas do Brasil referentes ao município de Quixeramobim - Ceará (INMET, 2009 – Figura 13).

Tabela 4 – Disposição temporal dos postos utilizados para o cálculo da média nas subbacias

Sub-bacia	Nº Sub-bacia	Posto	Mês		Ano	
			início	fim	início	fim
São Nicolau	1	Quixeramobim - SUDENE	1	12	1950	1989
		Madalena	1	12	1990	2000
		Faz. Várzea Alegre	1	6	2001	2012
Marengo	2	Quixeramobim - SUDENE	1	12	1950	1989
		Madalena	1	11	1990	2000
		Domingos da Costa	11	12	2000	2008
		Madalena	12	6	2008	2012
São Joaquim	3	Quixeramobim - SUDENE	1	12	1950	1989
		Madalena	1	11	1990	2000
		Domingos da Costa	11	12	2000	2008
		Passagem Fogareiro	12	6	2008	2012
Exutório	4	Quixeramobim - SUDENE	1	12	1950	1989
		Boa Viagem	1	11	1990	2000
		Domingos da Costa	11	12	2000	2008
		Passagem Fogareiro	12	6	2008	2012

Fonte: autor

Figura 13 – Ilustração dos dados climatológicos utilizados no modelo WASA-SED



Fonte: Normais Climatológicas do Brasil – INMET (2009)

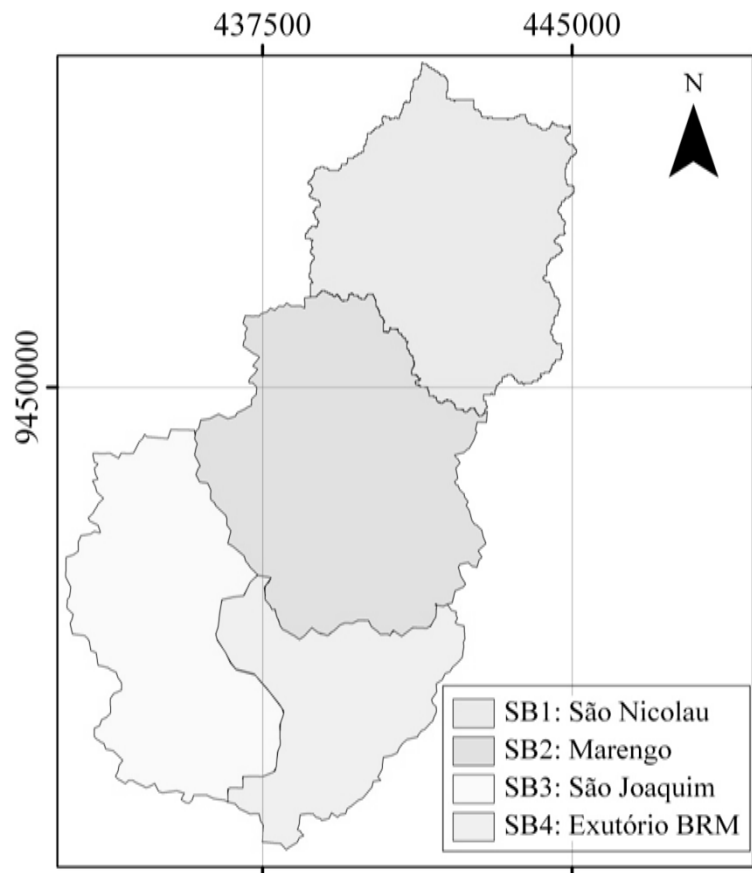
A delimitação das sub-bacias foi conforme a existência de reservatório nos exutórios e dos limites do assentamento, de modo que a BRM ficou dividida em quatro sub-bacias (Figura 14), as quais são apresentadas as principais características fisiográficas na Tabela 5.

Tabela 5 – Caracterização fisiográfica das sub-bacias da Bacia Representativa de Madalena

Sub-bacia	Nº Sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Kc	Kf	Lp (km)	L (km)	Dd (km km <sup>-2</sup> )
São Nicolau	1	34,52	39,24	1,87	0,71	6,97	57,71	1,67
Marengo	2	40,36	31,77	1,40	0,59	8,30	63,80	1,58
São Joaquim	3	29,79	29,32	1,50	0,37	8,98	45,91	1,54
Exutório	4	19,78	26,28	1,65	0,50	6,27	34,52	1,75

Fonte: autor

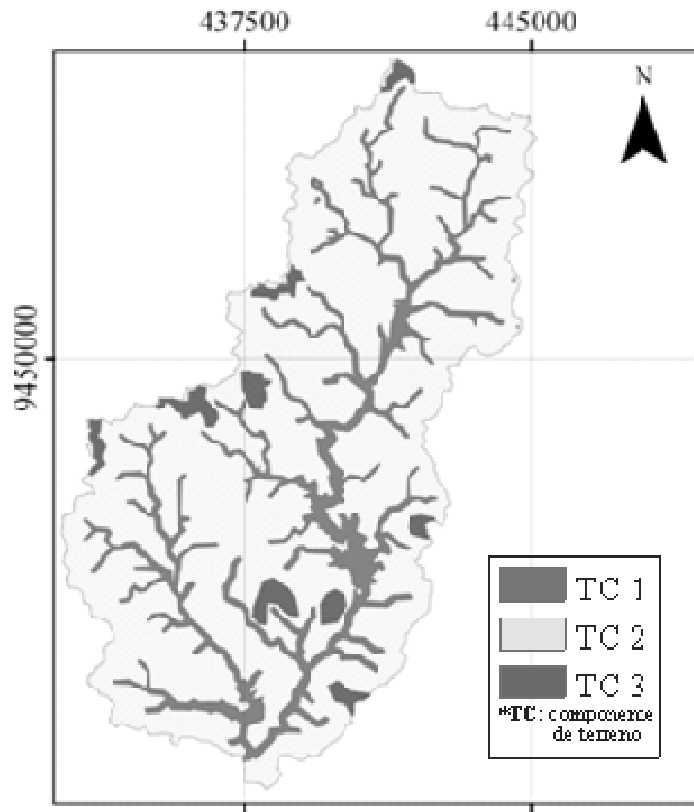
Figura 14 – Limites das sub-bacias da Bacia Representativa de Madalena (Unidades básicas do modelo WASA-SED - 1º nível hierárquico)



Fonte: autor

Para as unidades de paisagem e componentes de terreno foi utilizado o levantamento realizado por López (2011). Nesse levantamento, o elevado nível de detalhamento para a delimitação das unidades de paisagem, exigiu a utilização das características de uso e ocupação do solo, bem como da topografia da bacia. Devido a isso, e diante da necessidade na parametrização de todos os níveis hierárquicos do modelo WASA-SED (Tópico 2.2.3.), a adoção dessas unidades de paisagem como componentes de terreno se fez necessária. Vale salientar que, muito embora isso possa parecer uma medida extrema, López (2011) ressalta que o enquadramento das unidades de paisagem depende dos objetivos do estudo. Para a divisão da BRM em 3 unidades de paisagem foi necessário a utilização das curvas de nível, uma vez que a bacia encontra-se inserida totalmente em uma depressão sertaneja (unidade de paisagem adotada para a modelagem através do modelo WASA-SED) e sem mudanças abruptas no relevo.

Figura 15 – Componentes de terreno - TC (3º nível hierárquico do modelo WASA-SED)



Fonte: autor

As classes de vegetação e o uso do solo foram determinadas a partir da classificação de imagem LandSat 5, resultando em quatro classes de uso/ocupação distintas, a saber: 1) Solo exposto, 2) Caatinga rala, 3) Caatinga densa e 4) Uso agrícola.

Os parâmetros de cada classe de vegetação foram os mesmos adotados por Güntner (2002) com exceção da profundidade das raízes da Caatinga. Para esse parâmetro foram adotados os valores encontrados por Pinheiro *et al.*(2013) em estudo realizado na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA, a qual é monitorada pelo grupo HIDROSED. Visando uma melhor representação dos principais usos agrícolas na bacia e diante da dificuldade de classificação pelas imagens disponíveis, os parâmetros utilizados nessa classe foram a média composta por parâmetros referentes ao cultivo de milho, feijão e pastagem, que são as culturas predominantes na região. A Tabela 6 apresenta os parâmetros da vegetação divididos de acordo com o estágio de desenvolvimento em:

- E1: início do período de desenvolvimento da vegetação e crescimento das folhas, coincidente com o início do período chuvoso;



- E2: desenvolvimento máximo da vegetação, com densidade máxima de folhas;
- E3: início do período de queda das folhas, coincidente com o fim da estação chuvosa;
- E4: fim do período principal de queda das folhas. Considera-se que as folhas remanescentes nesse momento continuam caindo ao longo do período seco.

Tabela 6 - Parâmetros da vegetação utilizados no modelo WASA-SED

Uso/ocupação	Altura (m)				Prof. das raízes (m)			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
Solo exposto	0,01	0,05	0,05	0,01	0,01	0,05	0,05	0,01
Caatinga rala	1,30	1,30	1,30	1,30	0,40	0,50	0,40	0,40
Caatinga densa	1,80	1,80	1,80	1,80	0,70	0,80	0,70	0,70
Uso agrícola	0,10	0,43	0,73	0,10	0,23	0,37	0,93	0,23

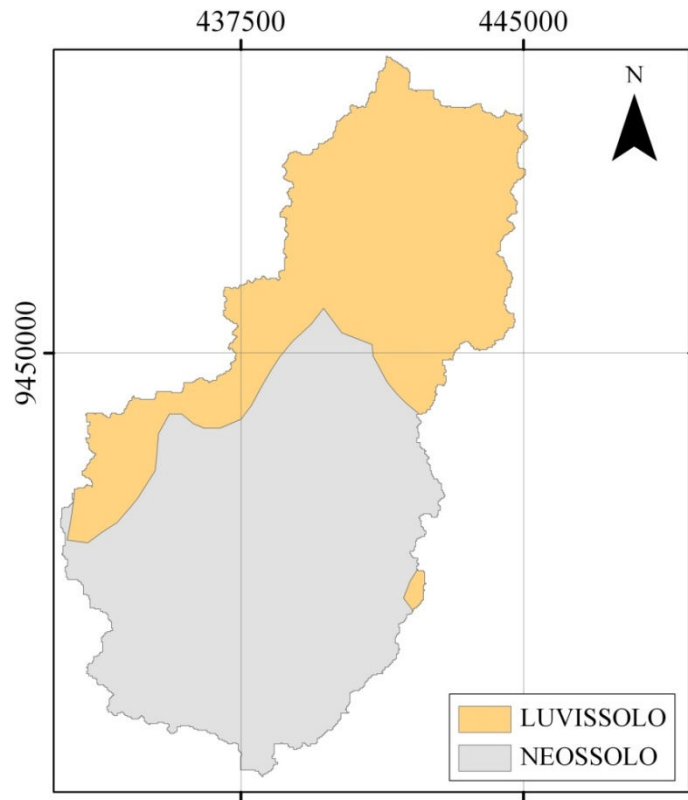
Uso/ocupação	IAF <sup>1</sup>				Albedo			
	E1	E2	E3	E4	E1	E2	E3	E4
Solo exposto	0,10	0,50	0,50	0,10	0,30	0,30	0,30	0,30
Caatinga rala	0,10	2,00	2,00	0,20	0,30	0,30	0,30	0,30
Caatinga densa	0,10	2,50	2,50	0,70	0,28	0,23	0,23	0,27
Uso agrícola	0,10	1,83	2,67	0,10	0,28	0,25	0,24	0,28

<sup>1</sup>Índice de área foliar

Como exposto por Güntner (2002) e constatado por Medeiros (2009), o modelo WASA-SED apresenta alta sensibilidade aos parâmetros relativos ao solo na geração de escoamento, de modo que o melhor refinamento desses parâmetros pode produzir melhores resultados nas diferentes escalas espaciais. Assim, foram utilizadas as informações associadas dos dois autores supracitados, bem como as de fontes secundárias de acordo com os tipos de solos presentes na bacia.

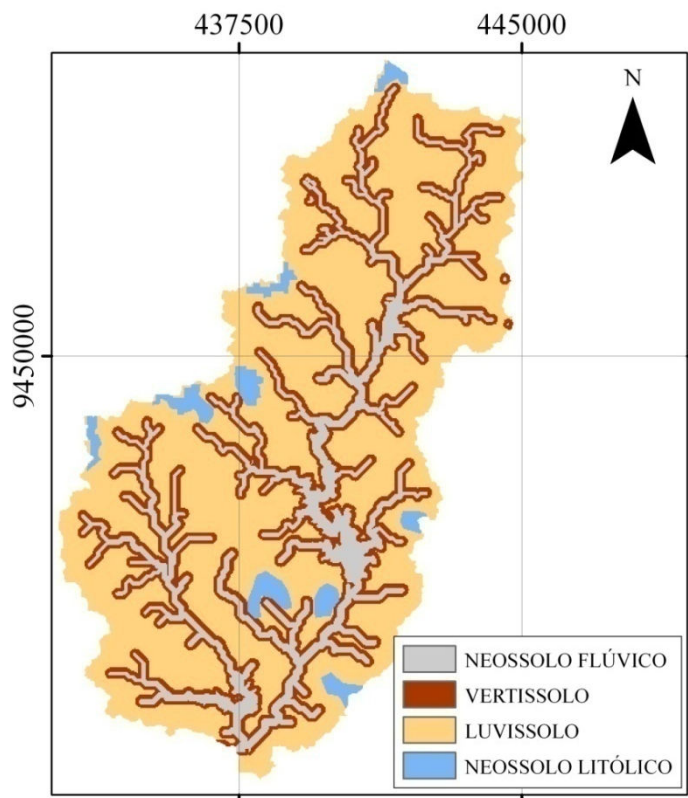
No refinamento dos parâmetros de solo da BRM os esforços foram concentrados na reclassificação das classes de solo predominantes na bacia com base no estudo de López (2011). Esta reclassificação foi realizada devido a classificação de solos do Estado de Ceará ser do tipo exploratória. Portanto, para a escala de meso-bacia, o levantamento exploratório torna-se insuficiente, pois as classes de solos podem ficar agrupadas, não fornecendo uma representação fiel para a modelagem dos processos hidrológicos na escala desejada.

Figura 16 – Classes de solo da bacia



Fonte: adaptado de Jacomine *et al.* (1973)

Figura 17 – Classes de solo atualizadas



Fonte: adaptado de López (2011)

Posteriormente, os parâmetros para cada perfil de solo foram selecionados e fornecidos ao modelo, obedecendo as características que causaram grandes alterações nas simulações para a bacia do Benguê (MEDEIROS, 2009) como: i) Número de camadas em cada perfil de solo; ii) Profundidade do solo e iii) Condutividade hidráulica saturada.

O número de camadas e a profundidade do solo não foram alterados, pois os valores estavam coerentes para as classes de solo predominantes. Para a determinação da condutividade hidráulica utilizou-se o modelo Rosetta (SCHAAP, 1999), que faz uso de dados básicos do solo para estimar suas propriedades hidráulicas. Nesse modelo, o cálculo dos parâmetros hidráulicos é feito pela análise de um banco de dados armazenado internamente utilizando-se redes neurais. Para cálculo da condutividade hidráulica saturada, são utilizadas informações dos percentuais de areia, silte e argila no solo e densidade aparente seca. Na Tabela 5 podem ser visualizados os valores de condutividade hidráulica saturada, obtidos a partir da parametrização de Güntner (2002) e pelo modelo Rosetta.

Os dados de entrada referentes a solo podem ser visualizados na Tabela 7. São apresentados, também, os valores de condutividade hidráulica saturada utilizados por Güntner *et al.* (2002) e os atualizados através do modelo Rosetta (Tabela 8).

Tabela 7 – Dados de solo utilizados na parametrização do modelo WASA-SED para a Bacia Representativa de Madalena

Classe	camada	RWC	PWP	FC1	FC2	UsagFC	SWC	FCF	Espes.	SucWF	PSI	BP	areia	silte	argila	DAS
		(vol. %)						(mm)		(-)	(cm)	(%)			kg dm <sup>-3</sup>	
Neossolo	1	0,052	0,070	0,137	0,217	0,147	0,547	0,275	200	31,1	0,405	4,3	88	5	7	1,2
Litólico	2	0,052	0,070	0,137	0,217	0,147	0,547	0,900	550	31,1	0,405	4,3	88	5	7	1,2
Luvissolo	1	0,052	0,076	0,156	0,247	0,171	0,500	0,077	300	69,5	0,410	9,5	87	7	6	1,5
	2	0,084	0,132	0,219	0,299	0,167	0,495	0,077	400	92,7	0,321	11,9	78	9	13	1,4
	3	0,099	0,167	0,264	0,342	0,176	0,504	0,056	400	105,6	0,269	13,2	80	10	10	1,4
	4	0,107	0,210	0,301	0,361	0,151	0,453	0,068	400	207,3	0,213	24,6	75	11	14	1,5
	5	0,105	0,206	0,303	0,370	0,163	0,509	0,068	500	190,4	0,213	22,5	45	9	46	1,6
Vertissolo	1	0,106	0,178	0,303	0,397	0,219	0,509	0,000	100	172,0	0,263	22,1	37	32	31	1,3
	2	0,112	0,237	0,334	0,387	0,150	0,434	0,010	400	260,4	0,154	30,9	44	13	43	1,5
	3	0,100	0,250	0,341	0,378	0,127	0,396	0,010	450	691,4	0,130	80,4	33	23	44	1,6
	4	0,079	0,118	0,219	0,308	0,190	0,396	0,010	400	228,1	0,339	30,5	45	37	18	1,6
	5	0,073	0,088	0,143	0,209	0,121	0,396	0,000	250	55,6	0,406	7,7	78	11	11	1,6
Neossolo Flúvico	1	0,070	0,094	0,164	0,240	0,146	0,452	0,001	250	67,2	0,382	9,1	83	8	9	1,4
	2	0,075	0,102	0,176	0,253	0,151	0,453	0,001	250	71,4	0,366	9,6	86	7	7	1,4
	3	0,076	0,106	0,184	0,262	0,156	0,458	0,000	500	82,4	0,356	11,0	87	5	8	1,4
	4	0,066	0,087	0,155	0,232	0,145	0,462	0,225	500	56,4	0,390	7,7	54	29	17	1,5

RWC (vol %): umidade residual; PWP (vol. %) : umidade no ponto de murcha permanente; FC1 (vol. %): capacidade de campo 1; FC2 (vol. %): capacidade de campo 2; UsagFC (vol. %): capacidade de campo usual; SWC (vol. %): umidade de saturação; FCF (vol. %): fração de fragmentos grosseiros; Espes.: espessura; SucWF (mm) : sucção da frente de molhamento; PSI (-): índice de tamanho dos poros; BP (cm): pressão borbulhante; DAS: densidade aparente seca

Tabela 8 - Condutividade hidráulica saturada (mm dia<sup>-1</sup>) dos solos da Bacia Representativa de Madalena (BRM)

Solo	camada	Güntner <i>et al.</i> (2002)	Rosetta (Shaap, 1999)	Diferença (%)
Neossolo Litólico	1	23836	3863	517
	2	23836	3863	517
Luvissole	1	13387	2375	464
	2	8240	1012	714
	3	5703	1317	333
	4	653	575	14
	5	4133	86	4652
Vertissolo	1	1062	170	524
	2	38	119	-67
	3	2	48	-95
	4	522	83	526
	5	2649	552	380
Neossolo Flúvico	1	6229	1746	257
	2	5250	2556	105
	3	5368	2677	101
	4	8344	187	4346

Para a avaliação/ validação do modelo através da comparação das séries temporais de volumes medidos e simulados armazenados no Marengo, foi utilizado o coeficiente de eficiência proposto por Nash e Sutcliffe (1970) (Eq.1)

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

em que:  $Y_{med}$  é o valor medido da variável no tempo  $j$ ,  $Y_{sim}$  é o valor simulado da variável no tempo  $j$  e  $\bar{Y}_{med}$  é a média dos valores medidos. O coeficiente NSE varia de  $-\infty$  a 1, sendo que, quanto maior for o coeficiente, melhor o desempenho do modelo. Se NSE for menor que 0 (zero), a capacidade de previsão do modelo é inferior ao valor médio medido (De ARAÚJO, 2007).

A avaliação do aporte de sedimentos simulado pelo modelo WASA-SED foi realizada de forma indireta, comparando-se as curvas cota-área-volume simuladas pelo modelo com as medidas por batimetria nos reservatórios Marengo e São Joaquim.

### 3.4. Simulação de cenários

A problemática recorrente da seca que acomete as regiões semiáridas, em especial no semiárido cearense, norteou o desenvolvimento de uma abordagem a qual visa tratar, por meio da modelagem hidrológica, o comportamento do reservatório Marengo (reservatório estratégico da região, responsável pelo abastecimento humano) quanto à disponibilidade hídrica em anos secos consecutivos.

Foram propostos três cenários representando situações distintas de pluviometria nos próximos anos:

- i) 2014 e 2015 terão a mesma distribuição da chuva como 2012 e 2013, ou seja, baixa precipitação;
- ii) 2014 como um ano chuvoso e 2015 seco, e;
- iii) 2014 como ano seco e 2015 chuvoso.

Para tanto foi admitida uma série sintética de precipitação baseada nos últimos anos mais secos, portanto 2012 e 2013. Assim, a distribuição da precipitação no primeiro cenário foi que a série de 2012 e 2013 se repetiria em 2014 e 2015. Para o segundo cenário, a série chuvosa de 2014 foi alterada, admitindo que para esse ano a precipitação seria semelhante ao ano mais chuvoso da década, portanto 2004. A terceira simulação foi semelhante à segunda, sendo que nessa o ano chuvoso foi o de 2015.

### 3.5. Avaliação da disponibilidade hídrica

A avaliação da disponibilidade hídrica do açude Marengo foi realizada por meio da curva vazão *vs.* garantia, gerada pelo modelo VYELAS (DE ARAÚJO *et al.*, 2006).

Na concepção do modelo, de Araújo *et al.* (2006), utilizaram o conceito de elasticidade da vazão de retirada ( $Q_r$ ) para interpretar os resultados de uma forma mais sistemática. No modelo VYELAS a elasticidade ( $\varepsilon_G$ ) representa o impacto relativo da redução na capacidade de armazenamento do reservatório ( $V$ ), devido ao assoreamento, sobre a redução da  $Q_r$  para um determinado nível de garantia ( $G$ ), Eq. 2. Assim, quanto maior o valor da  $\varepsilon$ , maior é o impacto na redução do volume de água retirada.

$$\varepsilon_G = \frac{\ln\left(\frac{V}{V_0}\right)}{\ln\left(\frac{Q_G}{Q_{G,0}}\right)} \quad (2)$$

O índice (0) refere-se ao início do período para o qual  $\varepsilon_G$  foi estimada. Se a taxa da diminuição da capacidade de armazenamento com o tempo é uma constante, de modo que  $dV/dt = -k$ , então a diminuição da disponibilidade de água no tempo para um determinado nível de garantia, em função de  $k$  ( $m^3/ano$ ) e  $\varepsilon_G$  negativo é descrita pela Eq. 3.

$$Q_G(t + \Delta t) = Q_G(t) * \left(1 - \frac{k\Delta t}{V(t)}\right)^{1/\varepsilon_g} \quad (3)$$

Para este estudo, foram realizadas três simulações distintas:

- i) a primeira para anos médios, considerando a média de todos os valores de escoamento estimada para 56 anos (1956 – 2012);
- ii) a segunda para anos secos, considerando a média dos valores de escoamento apenas nos anos com precipitação baixa, e;
- iii) a terceira que considera o assoreamento decorridos 50 anos após a última batimetria (2062).

Desta forma, as simulações do balanço hídrico ocorreram a partir de uma série sintética de vazão de entrada de longo prazo (50.000 anos), com base nas vazões afluentes para anos médios e secos e o correspondente coeficiente de variação (CV).

Em todas as simulações, a modelagem do balanço hídrico consistiu em simular 100 valores de vazão de retirada ( $Q_r$ ) num intervalo de 0,053 a 14,30  $hm^3$ . Três cenários de volume de alerta diferentes (1,0; 2,0 e 3,0  $hm^3$ ) foram utilizados na primeira, sendo que para a segunda e terceira simulação o volume de alerta foi de 0,5 e 1,0  $hm^3$ , respectivamente. Essas análises foram realizadas com o objetivo de subsidiar a maximização do uso da água para períodos críticos.

Para estimar a nova curva cota-área-volume em 2062 e o corresponde fator de forma ( $\alpha$ ) do reservatório, aplicou-se o método de redistribuição de sedimentos por redução de área (MORRIS; FAN, 1998).

Os dados de entrada no modelo VYELAS são: vazão média afluente ( $Q_a$ ),  $hm^3/ano$ ; coeficiente de variação anual da  $Q_a$ ; coeficiente de forma do reservatório ( $\alpha$ ); evaporação no período seco,  $m/a$ ; capacidade de armazenagem máxima ( $hm^3$ ); volume de alerta ( $hm^3$ ); volume inicial no primeiro ano ( $hm^3$ ).

Os dados de vazão média anual afluente e coeficiente de variação em todos os cenários foram obtidos por simulação hidrológica a partir do modelo WASA-SED.

## 4.RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados a seguir os resultados referentes ao levantamento de dados e ao monitoramento hidrológico da Bacia Representativa de Madalena, bem como das simulações hidrossedimentológicas realizadas com o modelo WASA-SED, para as diferentes parametrizações avaliadas. Apresentam-se gráficos de volumes medidos e modelados acumulados no reservatório Marengo e gráficos que relacionam as curvas cota-área-volume medida e modelada dos reservatórios Marengo e São Joaquim. São apresentados também os resultados das simulações de possíveis cenários de seca e da disponibilidade hídrica do açude Marengo.

### 4.1. Monitoramento

#### 4.1.1. Hidrológico

No período de monitoramento foram registrados pequenos eventos chuvosos distribuídos ao longo do tempo. O total precipitado no ano hidrológico de 2012 foi de 180 mm, cerca de 70% abaixo da média, sendo 78% desse total concentrado nos meses de fevereiro e março (Figura 18). Com isso, o ano de 2012 foi classificado como ano muito seco, ou seja, o total precipitado no primeiro semestre foi inferior a 440,7mm (sertão central e inhamus – Tabela 9). Pode-se constatar que o escoamento nas sub-bacias foi baixo, de tal modo que o nível d'água no reservatório apresentou-se em decréscimo e com picos de elevação desprezíveis (Figura 18).

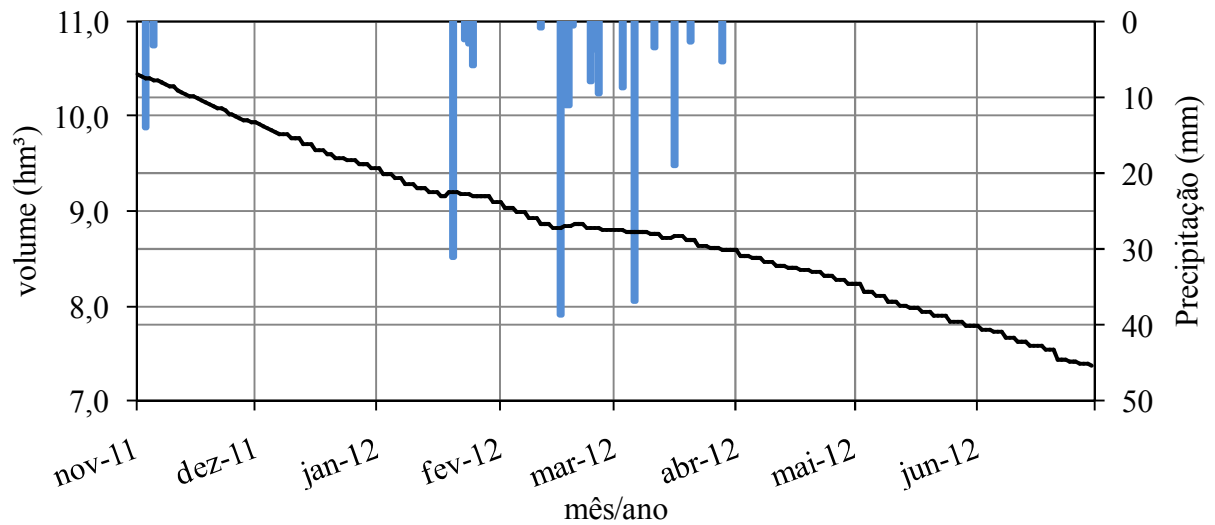
Tabela 9 – Quantis do 1º semestre (janeiro a junho) para as regiões pluviométricas do Ceará

Região	muito seco $P_i \leq 0,15$	seco $0,15 < P_i \leq 0,35$	normal $0,35 < P_i < 0,65$	chuvoso $0,65 \leq P_i < 0,85$	muito chuvoso $P_i \geq 0,85$
	(mm)				
Litoral	650,1	839,9	1085,1	1182,1	1493,7
Lit. norte	603,8	891,9	1019,3	1251,3	1548,2
Lit. Trairi-Pecém	599,3	717,5	951,6	1052,3	1405,1
Lit. de Fortaleza	757,3	917,5	1166,9	1406,2	1720,2
Mac. Baturité	687,8	852,4	1058,1	1152,7	1455,6
Ibiapaba	681,1	857,0	1085,9	1270,0	1528,2
Jaguaribana	465,8	677,0	760,3	872,6	1135,6
Cariri	623,1	726,8	834,1	916,0	1035,2
Sert. Central/ Inhamuns	440,7	535,0	670,0	713,1	849,1

Lit.: litoral; Mac.: maciço. Adaptado de Xavier e Xavier (1999)



Figura 18 – Precipitação diária na estação de monitoramento da Bacia Representativa de Madalena e volume acumulado no reservatório Marengo no período de novembro de 2011 a junho de 2012



Fonte: autor

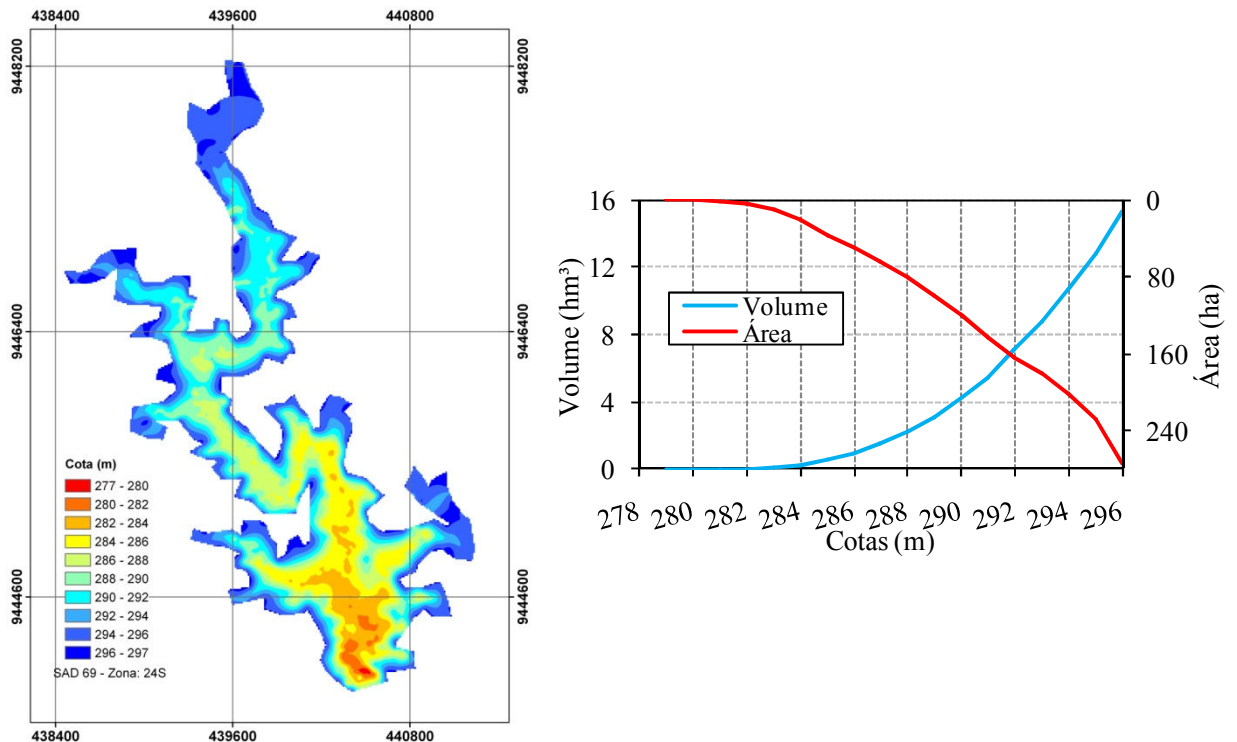
#### 4.1.2. Levantamentos batimétricos

##### I. Açude Marengo

A partir do levantamento foram construídas as isolinhas topográficas do fundo do reservatório e a nova curva cota - área - volume (Figura 19).

O volume atual do reservatório é de aproximadamente 15,3 hm<sup>3</sup>, cerca de 1,5 hm<sup>3</sup> inferior ao volume inicial medido em 1956 (16,8 hm<sup>3</sup>). Isso representa um volume 9% inferior ao volume inicial, o que resulta em uma redução da capacidade de armazenamento de 1,6% por década. A partir desses dados, estima-se que a produção específica de sedimento na bacia do Marengo corresponde a 487 t km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>.

Figura 19 - Mapa topográfico e curva cota-área-volume do reservatório Marengo atualizada por batimetria em 2011

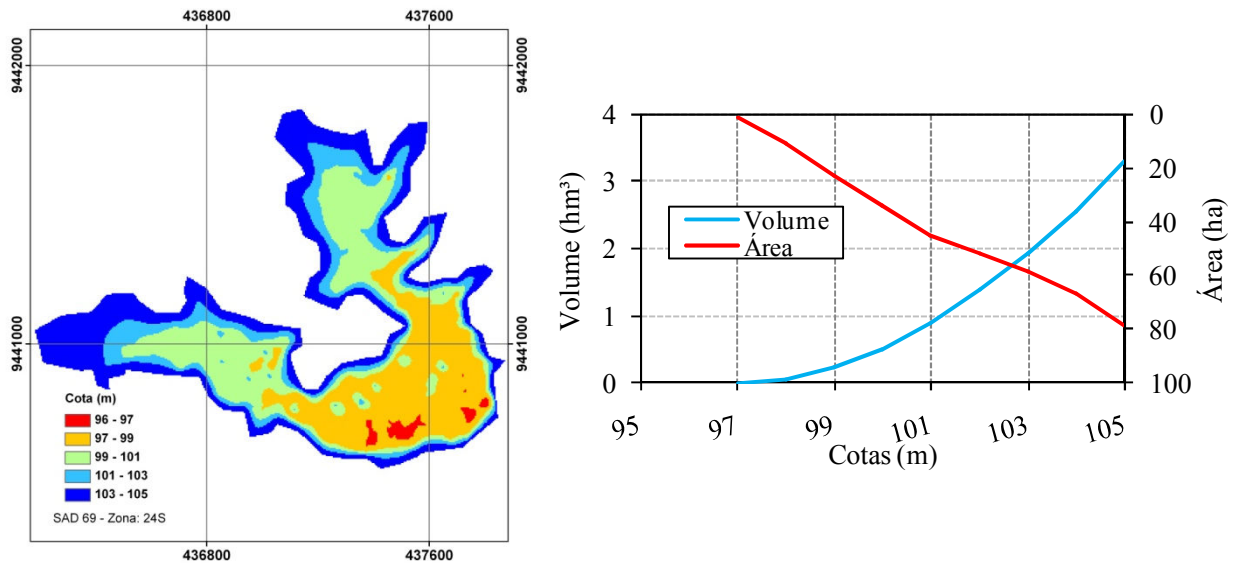


Fonte: autor

## II. Açude São Joaquim

O assoreamento no açude São Joaquim, estimado pela comparação das curvas cota-área-volume original e em 2011, causou a perda de 1,9 hm<sup>3</sup> no armazenamento no período de 62 anos, resultando na redução do volume de 5,1 hm<sup>3</sup> para 3,2 hm<sup>3</sup>. Essa sub-bacia apresenta maior produção específica de sedimento do que a sub-bacia do açude Marengo, sendo essa variável calculada em 1.340 t km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>. Ao final, constata-se que isso representa um volume 37% inferior ao volume inicial, o que resulta em uma redução de 6,0% por década, e assim três vezes superior ao padrão médio estimado para a região que é de 2% por década (De ARAÚJO, 2003). A Figura 20 ilustra a topografia do fundo do reservatório e a curva cota-área-volume atual.

Figura 20 - Mapa topográfico e curva cota-área-volume do reservatório São Joaquim atualizada por batimetria em 2012



#### 4.2. Parametrizações do Modelo WASA-SED

Diante das inúmeras parametrizações e simulações realizadas no âmbito desta pesquisa, apenas as três mais relevantes são abordadas neste documento a fim de demonstrar a evolução/desempenho do modelo com uma melhor determinação dos parâmetros.

##### 4.2.1. Parametrização 1 (inicial)

A parametrização inicial foi obtida a partir da parametrização de Güntner (2002), complementada por parâmetros obtidos por Creutzfeldt (2006), Mamede (2008), Medeiros (2009) e Costa (2012). Dessa forma pode-se caracterizar a parametrização inicial da seguinte maneira:

- i. Parâmetros de vegetação obtidos por Creutzfeldt (2006) e correção da profundidade das raízes da Caatinga;
- ii. Substituição dos valores de condutividade hidráulica saturada, anteriormente calculados pela função de pedo-transferência proposta por Tomasella e Hodnett (1997), pelos calculados através do modelo Rosetta (Schaap, 1999), conforme sugerido por Medeiros (2009);
- iii. Aparecimento de rocha após o perfil de solo: não foi admitido a ocorrência;

iv. Parâmetro de escala ( $k_{\text{fkor}_{\text{inf}}}$ ): admitido igual a 0,2, o que equivale a admitir capacidade de infiltração igual a cinco vezes aquela calculada pelo modelo.

As características supracitadas consistiram na parametrização 1, para simular os processos hidrossedimentológicos na BRM no período de janeiro de 1950 a junho de 2012.

Os resultados dessa simulação são apresentados na Figura 21 e 22. É possível observar que a Parametrização 1 não apresenta equivalência com os volumes medidos no açude Marengo (Figuras 22a e 22b) com o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (NSE) igual a -4,5. As Figuras 22c e 22d ilustram as curvas cota-volume medidas e modeladas para os açudes Marengo e São Joaquim respectivamente. No Marengo a diferença entre medido e modelado para o volume máximo de armazenamento é de  $1,0 \text{ hm}^3$ , o que representa um erro de 6%. Para o São Joaquim a diferença foi de  $1,6 \text{ hm}^3$  apresentando um erro de 33%.

Figura 21 – Série histórica da simulação e dados medidos na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 1 (inicial)

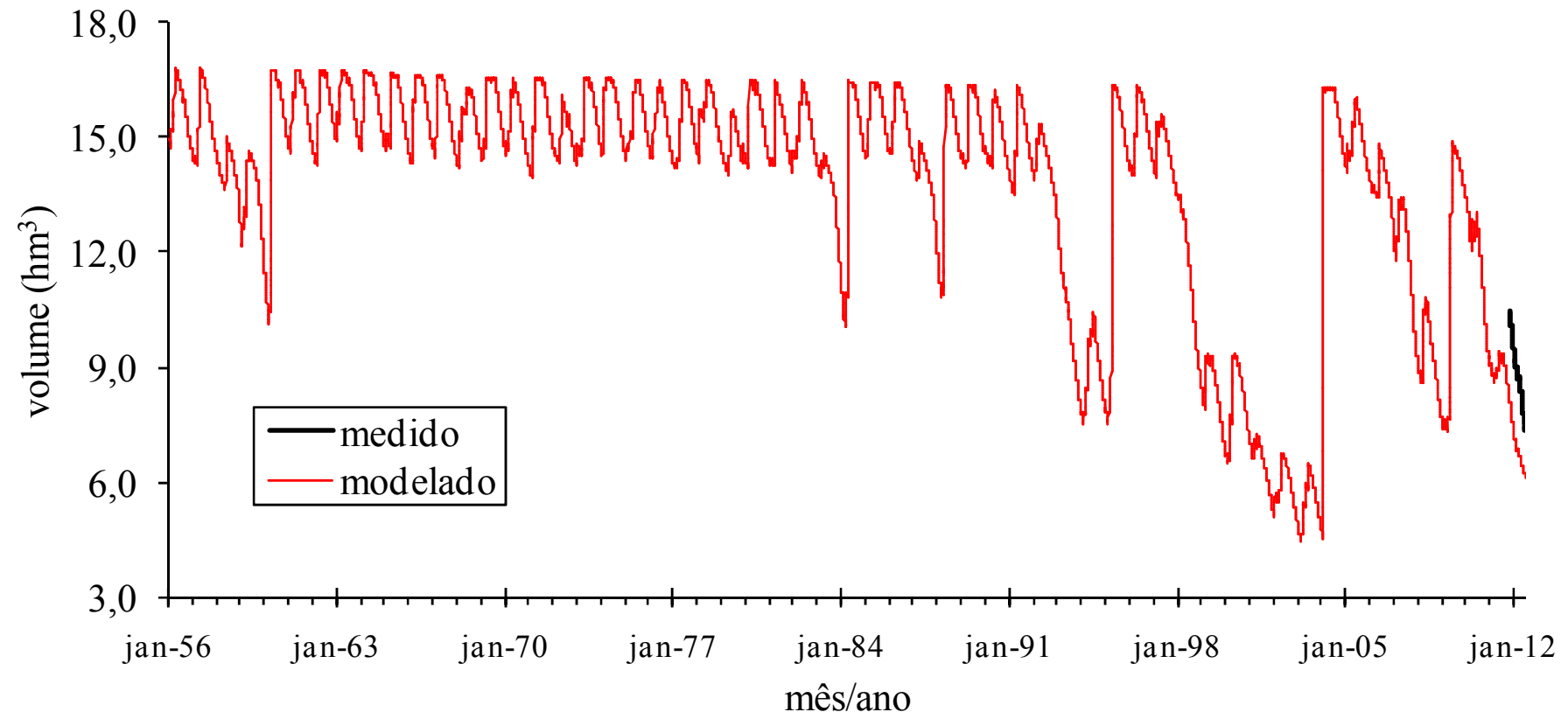
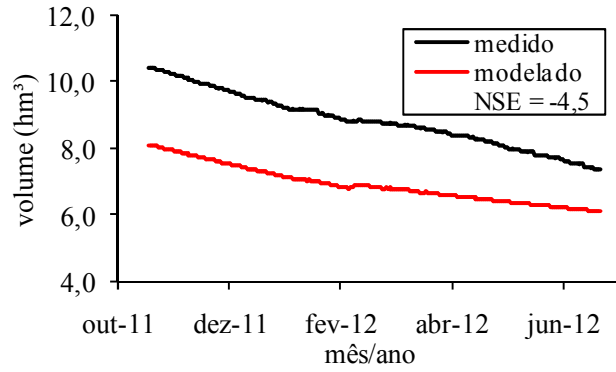
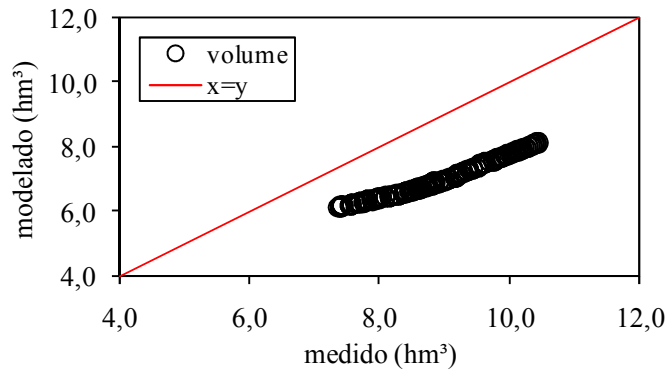


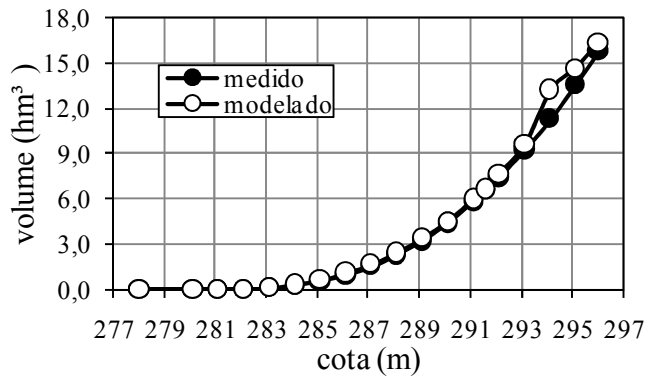
Figura 22 – Dados medidos e modelados na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 1 (inicial)



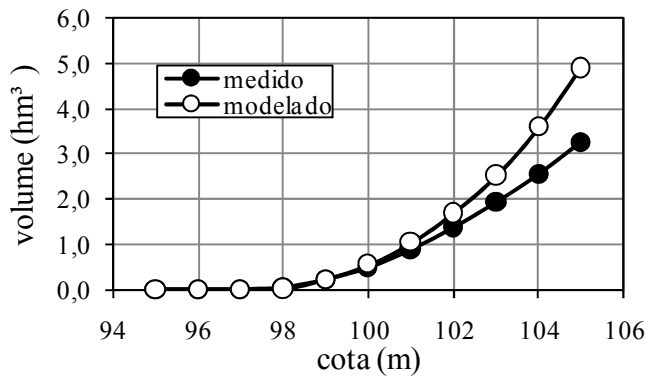
a) volume armazenado no Marengo



b) comparação volumes armazenados no Marengo, medidos e modelados



c) curvas cota volume medida e modelada - reservatório Marengo



d) curvas cota volume medida e modelada – reservatório São Joaquim

#### 4.2.2. Parametrização 2 (ocorrência de rocha após o perfil de solo)

A parametrização 2 é similar à parametrização 1, no entanto é considerada a ocorrência de rocha após o perfil de solo, a depender da classe de agrupamento. Também nessa simulação, os processos hidrossedimentológicos na BRM foram simulados no período de janeiro de 1950 a junho de 2012.

Os resultados dessa simulação são apresentados na Figura 23 e 24. É possível observar que a Parametrização 2 apresenta boa equivalência com os volumes medidos no açude Marengo (Figuras 24a e 24b) com o coeficiente de eficiência  $NSE=0,80$ . As Figuras 24c e 24d ilustram as curvas cota-volume medidas e modeladas para os açudes Marengo e São Joaquim respectivamente. No Marengo a diferença entre medido e modelado para o volume máximo de armazenamento é de  $0,49 \text{ hm}^3$ , o que representa um erro de 3,1%. Para o São Joaquim a diferença foi de  $1,4 \text{ hm}^3$  apresentando um erro de 30%.

Figura 23 – Série histórica da simulação e dados medidos na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 2 (ocorrência de rocha)

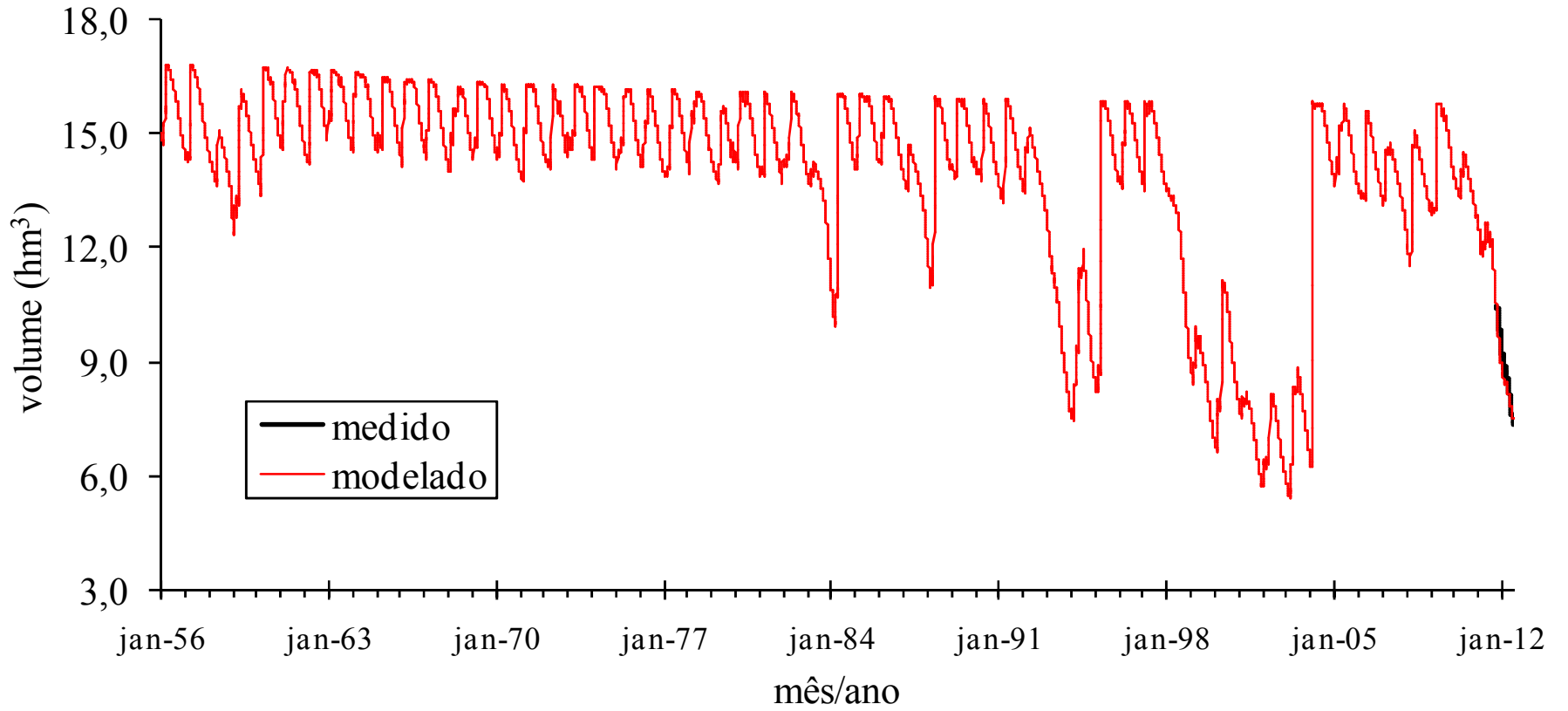
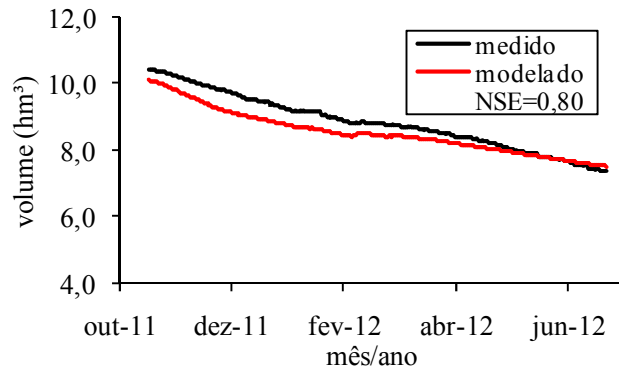
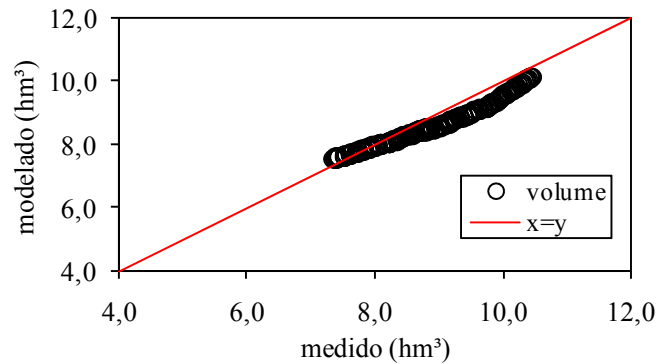




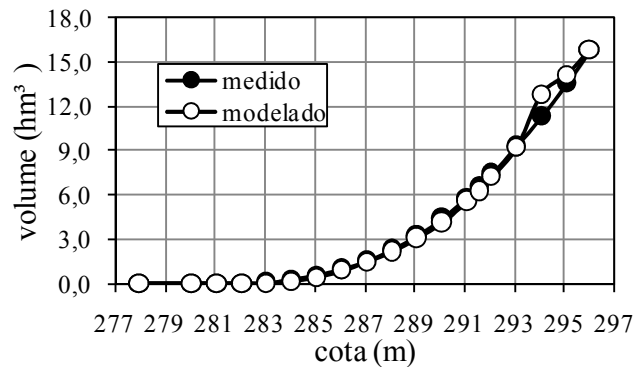
Figura 24 – Dados medidos e modelados na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 2 (ocorrência de rocha)



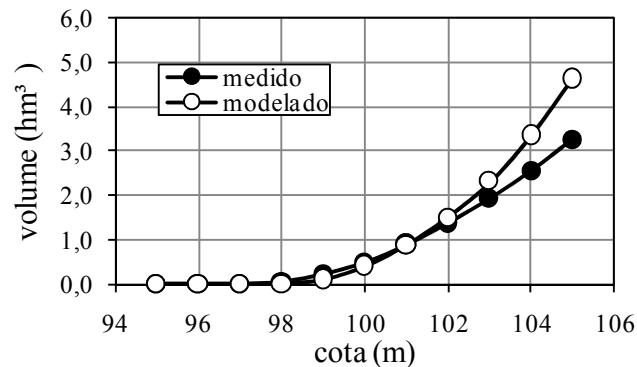
a) volume armazenado no Marengo



b) comparação volumes armazenados no Marengo, medidos e modelados



c) curvas cota volume medida e modelada – reservatório Marengo



d) curvas cota volume medida e modelada – reservatório São Joaquim

#### 4.2.3. Parametrização 3 (parâmetro de escala - $kf_{korrr_{inf}}$ )

A parametrização 3 contempla as outras duas e admite o termo do parâmetro de escala ( $kf_{korrr_{inf}}$ ) igual a um, o que corresponde a uma infiltração igual à calculada pelas rotinas do modelo, sem correção. Dessa forma, é possível avaliar as rotinas de infiltração do modelo bem como a parametrização dos solos.

Os resultados dessa simulação são apresentados na Figura 25 e 26. É possível observar que a Parametrização 3 apresenta um melhor ajuste entre os volumes medidos e modelados no açude Marengo (Figuras 26a e 26b) com o coeficiente de eficiência  $NSE=0,89$ . A Figura 26c e 26d ilustram as curvas cota-volume medidas e modeladas para os açudes Marengo e São Joaquim respectivamente. No Marengo a diferença entre medido e modelado para o volume máximo de armazenamento é de  $0,13 \text{ hm}^3$ , o que representa um erro de apenas 1%. Para o São Joaquim a diferença foi de  $1,2 \text{ hm}^3$  apresentando, assim, um erro de 27%.

Figura 25 – Série histórica da simulação e dados medidos na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 2 (ocorrência de rocha)

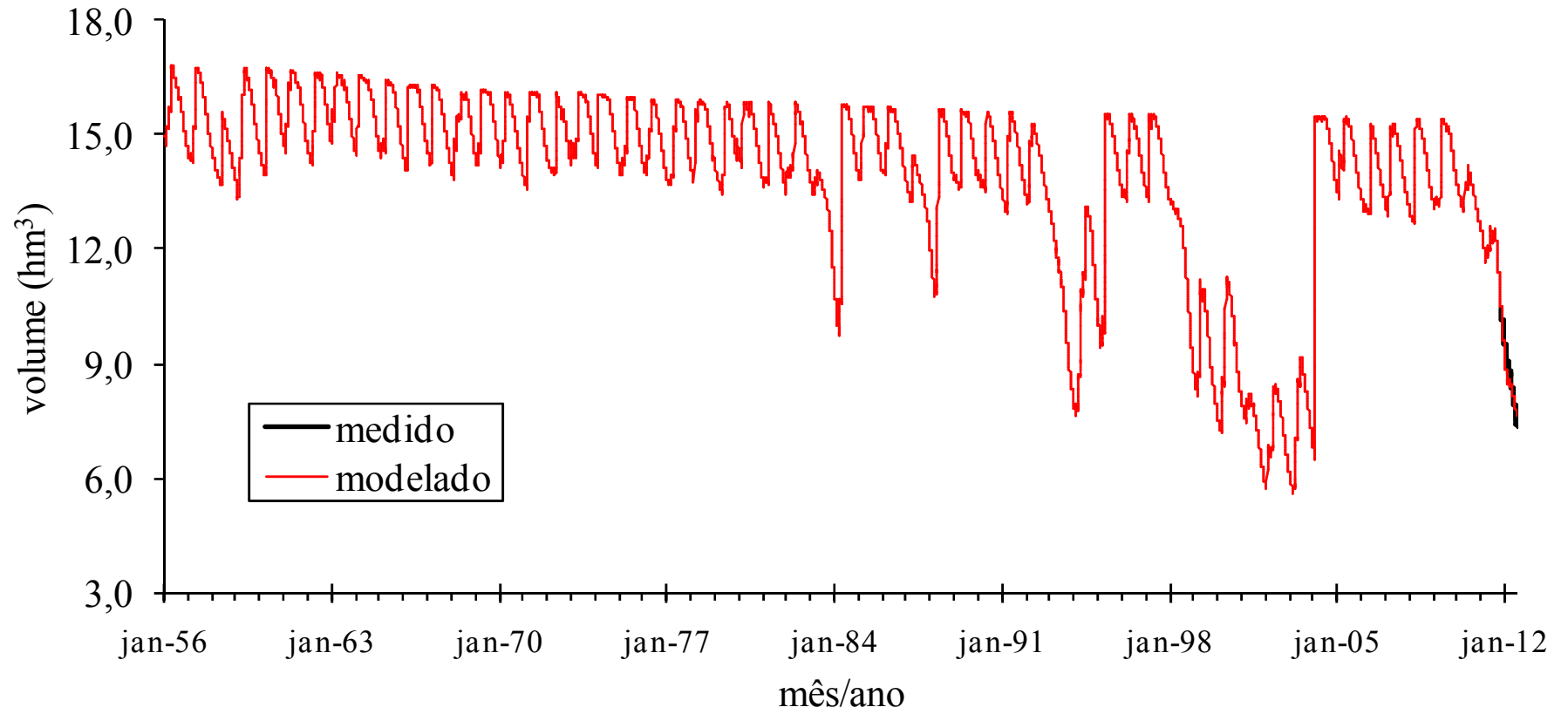
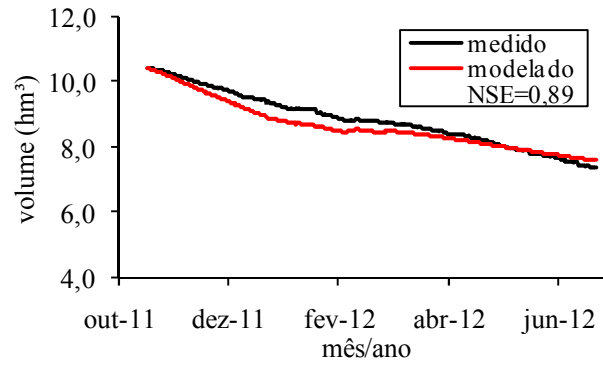
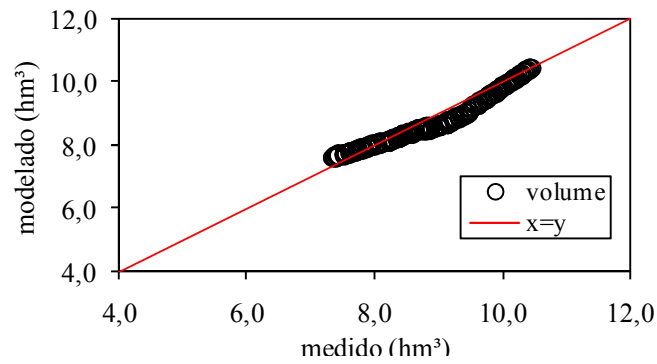


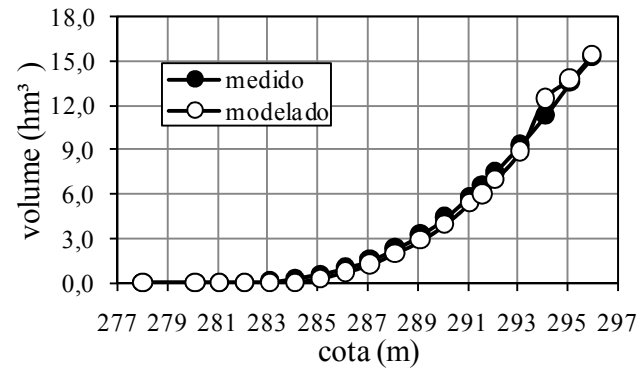
Figura 26 – Dados medidos e modelados na Bacia Representativa de Madalena – Parametrização 3 (parâmetro de escala)



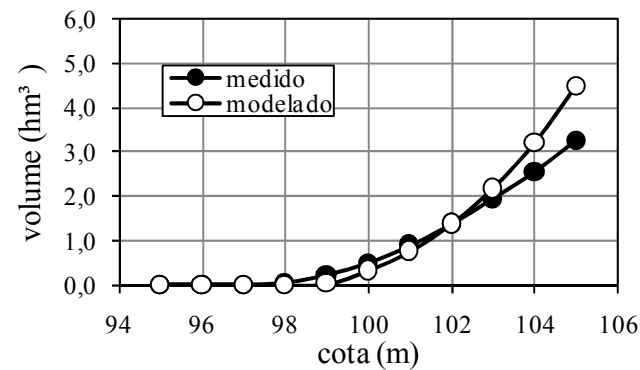
a) volume armazenado no Marengo



b) comparação volumes armazenados no Marengo, medidos e modelados



c) curvas cota volume medida e modelada – reservatório Marengo



d) curvas cota volume medida e modelada – reservatório São Joaquim

#### 4.2.4. Análise comparativa das simulações realizadas

Na Tabela 11 são apresentados os resultados das simulações hidrossedimentológicas realizadas, destacando as sub-bacias do Marengo e São Joaquim. Os coeficientes de escoamento entre as sub-bacias são similares, e apresentaram maiores diferenças em relação à parametrização 1. Observa-se que, ao considerar a ocorrência de rocha após o perfil de solo na parametrização 2, houve uma elevação abrupta do coeficiente de escoamento, podendo-se inferir que esse parâmetro tem grande importância na geração de escoamento quando se trata de menor escala e solos típicos do semiárido, em que na maioria desses é comum este fato. No entanto, melhores resultados são constatados quando o parâmetro  $k_{fkor_{inf}}$  é admitido igual a um, o que corresponde a uma infiltração igual à calculada pelas rotinas do modelo sem qualquer ajuste. Assim foi possível constatar que as rotinas de infiltração do modelo funcionam melhor sem correção, desde que os parâmetros de solos estejam adequadamente parametrizados para a área. Os bons resultados encontrados na sub-bacia do Marengo em ambas as linhas de avaliação (hidrológica e sedimentológica), não foram observados na sub-bacia do São Joaquim. Para aquela sub-bacia a validação só pode ser realizada para as rotinas sedimentológicas, haja visto que não há monitoramento no reservatório. O baixo índice de assoreamento do reservatório, estimado a partir da atualização da curva-cota-volume, pode ser devido a fatores isolados e/ou específicos daquela sub-bacia, e que não foram devidamente considerados na parametrização ou a erros no próprio projeto (e.g. a bacia hidrográfica do reservatório São Joaquim passou de 35,6 km<sup>2</sup> para 30,8 km<sup>2</sup> com a ampliação). A relação escoamento hortoniano e total (H:EscT) entre as sub-bacias e em ambas as simulações são similares e pode não ser um fator preponderante para a inequivalência no assoreamento medido e modelado na sub-bacia do São Joaquim. A taxa de sedimentação média anual do São Joaquim em relação à do Marengo foi inferior em todas as simulações apresentadas em cerca de 3%. É provável que a simulação da retenção de sedimentos ou a quantidade de sedimentos que chega ao reservatório tenha sofrido alterações devido ao baixo refinamento na parametrização naquela sub-bacia.

Os resultados ora apresentados destacam a importância da parametrização na modelagem dos processos hidrossedimentológicos, e mais ainda o efeito de escala causado quando a parametrização é focada em uma escala maior sem adequação de parâmetros para a menor. Observa-se que os resultados encontrados para a sub-bacia do Marengo são coerentes para as medidas disponíveis na validação, fato não constatado para a sub-bacia do São

Joaquim onde a diferença no volume perdido por assoreamento no reservatório é bem distinta do simulado pelo modelo (tópico 4.2).

Tabela 11 - Resultados de variáveis hidrossedimentológicas simuladas

Simulação	Sub-bacia do Marengo			Sub-bacia do São Joaquim		
	C (%)	H:EscT	S (%)	C (%)	H:EscT	S (%)
1	7,5	66,8	21	7,8	66,1	18
2	13,8	61,1	20	14,1	61,4	17
3	13,6	53,5	18	13,9	52,8	15

*C – coeficiente de escoamento; H:EscT – relação escoamento hortoniano e total; S – taxa de sedimentação média anual.*

Outro fato a ser levado em consideração é a subestimação dos volumes para cotas menores tanto no Marengo como no São Joaquim. Isso leva a crer que o modelo pode estar errando em relação à distribuição dos sedimentos depositados dentro do lago devido, provavelmente, ao efeito do depósito (e formação) em deltas, o qual não é contemplado no modelo WASA-SED.

Reforçando a discussão sobre o papel da parametrização na modelagem, pode-se destacar alguns estudos, como o desenvolvido por Medeiros (2009) em duas bacias semiáridas de diferentes escalas espaciais (bacia hidrográfica do Benguê - 1000 km<sup>2</sup>; bacia experimental de Aiuaba – 12 km<sup>2</sup> e sub-bacia do Benguê). Naquele estudo, quando os parâmetros do modelo WASA-SED foram fornecidos almejando apenas a bacia do Benguê, o coeficiente NSE para aquela escala foi de 0,99. No entanto observou-se o baixo desempenho do modelo para a sub-bacia de Aiuaba, em que o NSE foi de 0,42. Com o refinamento dos parâmetros, os coeficientes NSE foram de 0,95 e 0,71 e as diferenças entre as produções de sedimentos medidas e modeladas foram de -27% e -4% para a bacia do Benguê e sub-bacia de Aiuaba respectivamente.

Resultados semelhantes foram constatados por Malveira (2009) ao modelar a bacia do Alto Jaguaribe utilizando o modelo WASA-SED. Em seu estudo, foi possível constatar que houve uma melhoria da eficiência do modelo com o aumento da área da bacia. Para o reservatório Orós (bacia hidrográfica de 24.167 km<sup>2</sup>), o coeficiente NSE para volumes armazenados medidos e modelados foi de 0,99, já na escala de sub-bacia, o coeficiente sofreu redução conforme a área da bacia hidrográfica, chegando a um valor negativo (-0,34) em uma sub-bacia com 308 km<sup>2</sup>.

Também é possível constatar a variação da eficiência do modelo com a escala em outros modelos hidrológicos. Por exemplo, Santos *et al.* (2012) ao avaliarem o efeito de

escala sobre os parâmetros do modelo WEPP, observaram que os parâmetros do solo, destacando-se a condutividade hidráulica saturada, são menores para a escala de micro-bacias e maiores para sub-bacias, trazendo alterações significativas na qualidade dos resultados.

Assim sendo, a parametrização utilizada neste estudo permitiu uma estimativa dos aportes de água e sedimentos na escala da sub-bacia do Marengo, sendo que para a sub-bacia do São Joaquim os resultados das simulações devem ser admitidos considerando a menor equivalência que o modelo apresentou quanto aos resultados sedimentológicos medidos e modelados.

Apresentam-se a seguir os resultados do balanço hídrico das simulações realizadas para a sub-bacia do açude Marengo no período de 1950 a 2012 (Tabela 12). Observa-se que a evapotranspiração causou as maiores perdas de água no sistema, atingindo 72% do volume total. O refinamento dos parâmetros nas simulações realizadas causou a redução da infiltração e aumento do escoamento superficial e sub-superficial. Apesar dos bons resultados encontrados na validação do modelo para o volume armazenado no Marengo, observa-se que o escoamento sub-superficial é elevado e representa cerca de 9% do balanço hídrico. Esse fato expõe e fundamenta a discussão sobre um possível efeito compensatório que ocorrera na modelagem hidrológica, ou seja, apesar dos resultados coerentes no exutório da bacia, é possível que esteja havendo uma compensação entre os processos simulados.

Tabela 12\* – Balanço hídrico das simulações realizadas para a sub-bacia hidrográfica do açude Marengo

Descrição	Evapotranspiração	Infiltração	Escoamento	
			Superficial	Sub-superficial
Simulação 1	69,5	15,3	7,6	7,6
Simulação 2	71,9	5,3	13,8	9,0
Simulação 3	72,2	5,2	13,6	9,0

\*valores em porcentagem

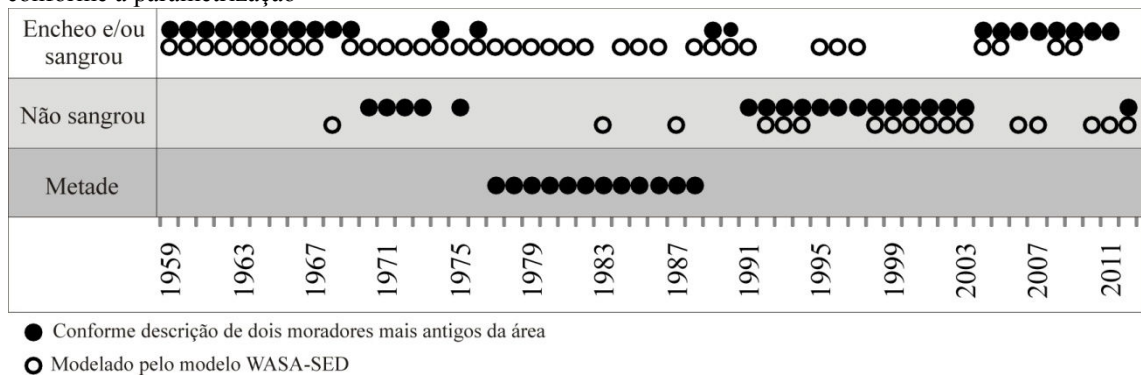
Esse possível efeito compensatório na modelagem dos processos poderia ter sido evitado através da validação em mais de uma seção de controle e em diferentes escalas como realizado por Medeiros (2009). Considerando esse aspecto, a validação dos resultados foi comprometida pela escassez de dados medidos na região e, também, devido ao período de monitoramento que contemplou apenas um ano caracterizado como muito seco (2012), dificultando a análise das rotinas de geração de escoamento do modelo.

Diante disso, realizou-se uma análise do histórico de cheias e secas do açude Marengo por meio da comparação entre a simulação da parametrização 3 e o conhecimento dos moradores da área. Foram entrevistados dois moradores mais antigos do assentamento

(mãe e filho) que residem no local há mais de 50 anos. Os resultados podem ser visualizados na Figura 27 e algumas inferências devem ser destacadas como: i) considerando todas as situações (Encheo e/ou sangrou; Não sangrou e Metade) os resultados entre as duas fontes (moradores e modelo) são iguais em 64% dos anos; ii) quando são comparadas apenas os anos em que o reservatório Marengo Encheo e/ou sangrou a porcentagem é de 94% de acerto.

Apesar de tratar-se de uma análise simples, os resultados ora obtidos e a comparação das curvas cota-volume medida e modelada no Marengo dão uma forte indicação de que o escoamento esteja sendo bem simulado para aquela bacia.

Figura 27 – Histórico do reservatório Marengo segundo os habitantes da área e o obtido por simulação conforme a parametrização

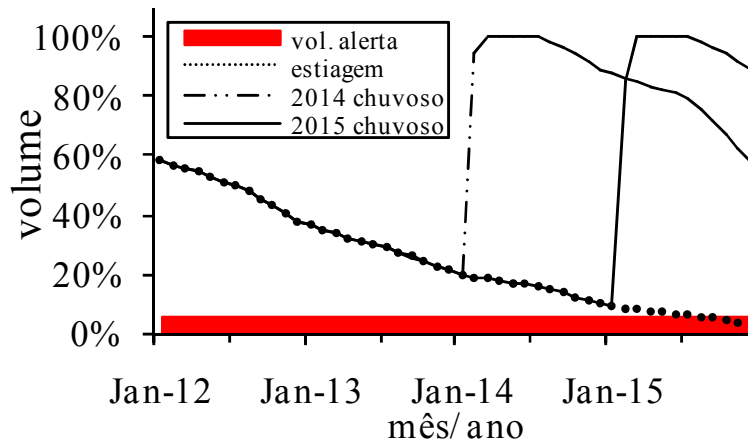


#### 4.3. Simulação de cenários

Os resultados das simulações de cenários são ilustrados na Figura 28. Das simulações realizadas foi possível observar que o prolongamento da seca para os anos de 2014 e 2015 acarretariam em um volume acumulado no reservatório Marengo de apenas 3% de sua capacidade ao final de 2015, sendo que a partir de junho de 2015 o açude já se encontraria com um volume inferior ao mínimo operacional, ou seja, com menos de 1,0 hm<sup>3</sup> (7% da capacidade). Caso o ano de 2014 seja muito chuvoso como o de 2004, o aporte de água no primeiro mês já seria suficiente para elevar o volume em aproximadamente 95% da capacidade, ocorrendo sangria nos meses posteriores. Ao final de 2015 (ano seco) o volume hídrico no açude seria em torno de 58%. Para a última simulação, admitindo o ano de 2014 seco e 2015 chuvoso, o volume no final em 2014 seria de 9,8% da capacidade, com aumento abrupto no primeiro mês do ano 2015 para 85% da capacidade e sangria nos 5 meses seguintes. Ao final de 2015 o volume armazenado seria de aproximadamente 89% da capacidade.



Figura 28 – Armazenamento acumulado no açude Marengo sob cenários de anos secos e chuvosos nos próximos anos



#### 4.4. Avaliação da disponibilidade hídrica

São apresentados na Tabela 13 os dados requeridos para a modelagem da disponibilidade hídrica pelo modelo VYELAS para anos médios, secos e a projeção para 50 anos. O fator de forma do reservatório ( $\alpha$ ) foi o mesmo para os cenários avaliados em anos médios e secos com o valor de 3119, sendo que para a projeção em 2062 o fator de forma foi calculado em 3705. A vazão média afluente ( $Q_a$ ) foi de 11,9 e 1,2 hm<sup>3</sup>/ano para anos médios e secos respectivamente. Portanto, para anos secos a vazão representa cerca de 10% do valor médio.

Tabela 13 - Dados de entrada utilizados no modelo VYELAS para a sub-bacia do Marengo

Dados	Unidade	Ano médio	Ano seco	2062
Vazão média afluente ( $Q_a$ )	hm <sup>3</sup> /ano	11,9	1,2	11,9
Coefficiente de variação anual do $Q_a$	-	1,02	0,87	1,02
Coefficiente de forma ( $\alpha$ )	-	3119	3119	3705
Evaporação no período seco	m/ano	1,350	1,415	1,350
Capacidade máxima de armazenamento	hm <sup>3</sup>	15,3	15,3	14,1
Volume de alerta	hm <sup>3</sup>	3 níveis	0,5	1,0
Volume inicial para o primeiro ano	hm <sup>3</sup>	7,6	7,6	7,6
Número de vazões de retirada simuladas	-	100	100	100
Mínima vazão de retirada	hm <sup>3</sup> /ano	0,053	0,053	0,053
Máxima vazão de retirada	hm <sup>3</sup> /ano	14,3	14,3	14,3
Número de simulações estocásticas	-	50.000	50.000	50.000

Das simulações realizadas quanto ao nível mínimo operacional, optou-se pelo volume de alerta ( $V_0$ ) igual a 1,0 hm<sup>3</sup> como padrão para o reservatório em anos médios, pois

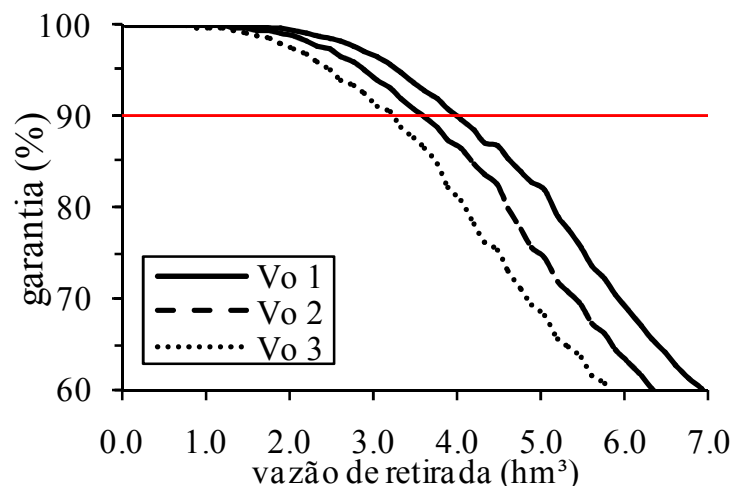
permite, para uma garantia de 90%, que 34% do  $Q_{90}$  adotado fiquem no reservatório, sendo 47% e 20% da vazão afluyente perdidos por sangria e evaporação. A disponibilidade hídrica para uma garantia de 90% ( $Q_{90}$ ) é avaliada em 4,010  $\text{hm}^3/\text{ano}$ , representando assim uma eficiência hidrológica de 34%. Para as demais simulações, as perdas por sangria e evaporação somariam mais de 71% da vazão afluyente, ou seja, todos os anos seriam perdidos pelo menos 8,5  $\text{hm}^3$  (Tabela 14 e Figura 29).

Para anos secos, em que a vazão afluyente foi da ordem de 1,2  $\text{hm}^3/\text{ano}$  ( $CV=0,87$ ) e a evaporação do lago de 1.415  $\text{mm}/\text{ano}$ , o valor de  $Q_{90}$  foi de 0,157  $\text{hm}^3/\text{ano}$  e  $Q_{99}$  inexistente. Assim, em anos secos a  $Q_{90}$  foi 96% inferior à encontrada para anos médios, ressaltando com isso a importância que deve existir na operacionalização de reservatórios no semiárido. Foi possível constatar que não ocorreu sangria para esse cenário, haja visto que a vazão afluyente foi baixa e a evaporação elevada.

Tabela 14 – Disponibilidade hídrica para diferentes níveis de operação e garantia do açude Marengo

Vazão de retirada ( $Q_R$ ) em função da garantia ( $Q_G$ )	$Q_R$ anos médios			$Q_R$ anos secos
	volume de alerta ( $\text{hm}^3$ )			
	1,0	2,0	3,0	0,5
$Q_{99}$ ( $\text{hm}^3$ )	2,262	1,905	1,573	-
$Q_{90}$ ( $\text{hm}^3$ )	4,010	3,599	3,223	0,157
$Q_{85}$ ( $\text{hm}^3$ )	4,641	4,176	3,749	0,225
$Q_{80}$ ( $\text{hm}^3$ )	5,131	4,601	4,084	0,282
Sangria ( $Q_{90}$ , $\text{hm}^3$ )	5,585	5,854	6,139	-
Evaporação ( $Q_{90}$ , $\text{hm}^3$ )	2,340	2,594	2,693	0,981

Figura 29 - Nível de garantia para as vazões de retirada do açude Marengo com diferentes volumes de alerta



Na Tabela 15 e Figura 30 são expostos os resultados da disponibilidade de água no açude Marengo em função do assoreamento. Pode-se constatar que o reservatório

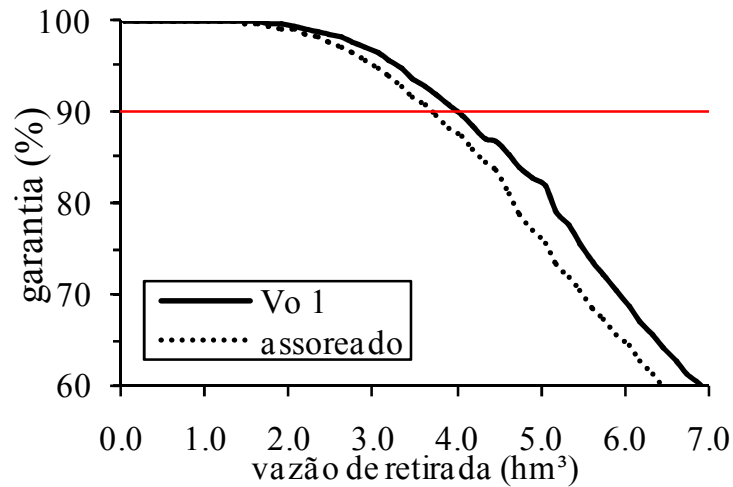
apresenta características relevantes quanto à relação assoreamento/vazão de garantia, em que para o mesmo volume de alerta  $V_0 = 1,0 \text{ hm}^3/\text{ano}$  e decorridos 50 anos (8% de volume perdido por assoreamento), a  $Q_{90}$  decaiu em 6% quando comparação com a situação atual. As efluências por sangria ( $Q_S$ ) aumentam 5% e a evaporação ( $Q_E$ ) manteve-se estável. Ambas as perdas somaram 68% da vazão média anual de entrada.

Tabela 15 – Disponibilidade hídrica do açude Marengo sob cenário de assoreamento (50 anos)

$Q_G$ ( $\text{hm}^3$ )	2012			2062		
	$Q_R$	$Q_S$	$Q_E$	$Q_R$	$Q_S$	$Q_E$
	$\text{hm}^3$					
$Q_{99}$	2,262	6,707	2,860	2,048	6,991	2,860
$Q_{90}$	4,010	5,585	2,480	3,787	5,886	2,488
$Q_{85}$	4,641	5,228	2,338	4,283	5,525	2,350
$Q_{80}$	5,131	4,980	2,239	4,678	5,371	2,284

$Q_G$  é a vazão de retirada em função da garantia;  $Q_R$  a vazão de retirada;  $Q_S$  a vazão de sangria;  $Q_E$  a vazão de evaporação e  $V_0$  é o volume de alerta

Figura 30 - Nível de garantia para as vazões de retirada do açude Marengo sob cenário de assoreamento (50 anos)



## 5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos nesse estudo é possível inferir as seguintes conclusões:

i) Há a necessidade de monitoramento contínuo das variáveis hidrológicas em bacias hidrográficas do semiárido, pois a escassez de dados dificulta a análise de desempenho de modelos hidrológicos. O ano de monitoramento utilizado nessa pesquisa é classificado como muito seco e importante na validação do modelo pois caracteriza uma limitação na modelagem hidrológica.

ii) As medidas de assoreamento nos reservatórios são essenciais na validação do modelo para longos períodos de avaliação, principalmente para as rotinas sedimentológicas. Os parâmetros do solo são determinantes na qualidade dos resultados da modelagem hidrossedimentológica pelo modelo WASA-SED e o detalhamento da parametrização melhora sensivelmente o desempenho do modelo;

iii) Caso o cenário de estiagem predomine em 2014, o reservatório estratégico (Marengo) apresentaria apenas 10% da capacidade de armazenamento ao final daquele ano. Caso predomine em 2014 e 2015 o reservatório atingiria o volume de alerta em meados de 2015;

iv) A disponibilidade hídrica do reservatório estratégico da bacia para uma garantia de 90% é avaliada em 4,010 hm<sup>3</sup>/ano. Para os cenários extremos de baixa pluviometria a vazão com 90% de garantia é 96% inferior para os anos médios. O assoreamento em 50 anos causa uma redução de 6% na vazão com 90% de garantia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the european hydrological system – Système Hydrologique Européen, SHE 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p. 61-77, 1986b.

ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; GRIGGS, A. D.; SAMMONS, N. B. **SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management**. Texas A&M Univ. Press, College Station, USA. (1990)

BARTLEY, R.; ROTH, C. H.; LUDWIG, J.; MACJANNET, D.; LIEDLOFF, A.; CORFIELD, J.; HAWDON, A.; ABBOTT, B. Runoff and erosion from Australian's tropical semi-arid rangelands: influence of ground cover for differing space and time scale. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 3317–3333, 2006.

BATHURST, J. C.; WICKS, J. M.; O'CONNELL, P. E. **The SHE/SHESED Basin Scale Water Flow and Sediment Transport Modelling System**. In: V. P. Singh (editor). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, United States. (1995).

BATHURST, J.C. Physically-Based Distributed Modelling of an Upland Catchment Using the Système Hydrologique Européen. **Journal of Hydrology**, v. 87: p. 79-102, 1986.

BENNETT, J. P. Concepts of mathematical modeling of sediment yield. **Water Resources Research**, v. 10, n. 3, p. 485-492, 1974.

BEVEN, K. Changing ideas in Hydrology - the case of physically-based models. **Journal of Hydrology**, v. 105, p. 157-172, 1989.

BEVEN, K. *et al.* **Topmodel**. In: *COMPUTER MODELS OF WATERSHED HYDROLOGY*, 2002. Highlands Ranch: Water Resources of Publication, 2002, pp. 625-668.

BEVEN, K.; O'CONNELL, P. E. **On the role of physically-based models in hydrology**. Inst. Hydrol. Rep. N° 81, Wallingford. 1982

BOIX-FAYOS, C.; MARTÍNEZ-MENA, M.; ARNAU-ROSALÉN, E.; CALVO-CASES, A.; CASTILLO, V.; ALBALADEJO, J. Measuring soil erosion by field plots: understanding the sources of variation. **Earth-Sciences Reviews**, v. 78, p. 267-285, 2006.

BRACKEN, L. J.; CROKE, J. The concept of hydrological connectivity and its contribution to understanding runoff-dominated geomorphic systems. **Hydrological Processes**, v. 21, n. 13, p. 1749-1763, 2007.

BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA – *Sistema de informações hidrológicas (Hidroweb)*. Brasília, 2012.

BRONSTERT, A.; BATALLA, R. J.; ARAÚJO, J. C.; FRANCKE, T.; GÜNTNER, A.; MAMEDE, G.; MÜLLER, E. N. **Investigating erosion and sediment transport from headwaters to catchments to reduce reservoir siltation in drylands**. In: Reducing the vulnerability of societies to water related risks at the basin scale (ed. A. Schumann e M. Pahlow), 119-122. IAHS-Publ. 317, IAHS Press, Wallingford, UK. 2007.

CAMMERAAT, L. H. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in southeast Spain. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 2, p. 317-332, 2004.

CANTÓN, Y.; DOMINGO, F.; SOLÉ-BENET, A.; PUIGDEFÁBREGAS, J. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. **Journal of Hydrology**, v. 252, p. 65 – 84, 2001.

CEARÁ, FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA - *FUNCEME – Séries históricas de precipitação*. Fortaleza, 2012.

CEARÁ, SECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS - *PERH – Plano Estadual de Recursos Hídricos*. Fortaleza, 1996.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw Hill 572p. 1988.

CHU, S. T. Infiltration during an unsteady rain. **Water Resources Research**, v. 14, n.3, p. 461-466,1978.

PINHEIRO, L. S. **Impactos socioambientais e desempenho do sistema fossa verde no Assentamento 25 de Maio, Madalena (CE)**. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma bacia experimental em caatinga conservada no semi-árido brasileiro**. 2007. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de caatinga preservada**. 2012. 151 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

CRAWFORD, N.H.; LINSLEY, R. K. Digital simulation in hydrology, Stanford Watershed Model IV, Department of Civil Engineering, Stanford University, Technical Report 39, 1966.

CREUTZFELDT, B. **Remote sensing based characterization of land cover and terrain properties for hydrological modeling in the semi-arid Northeast of Brazil**. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, Alemanha, 2006.

D'AGOSTINO, D. R.; TRISORIO, L. G.; LAMADDALENA, N.; RAGAB, R. Assessing the results of scenarios of climate and land use changes on the hydrology of an Italian catchment: modelling study. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2693-2704. 2010.

DAWDY, D. R.; O'DONNELL, T., Mathematical models of catchment behavior. **Journal of Hydraulics Division American Society of Civil Engineering**, v. 91, p. 123-137, 1965.

DE ARAÚJO, J. C.; GONZÁLEZ PIEDRA, J. I. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169-1178, 2009.

DE ARAÚJO, J.C. DE, GÜNTNER, A., BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, v. 51, n. 1, p. 157-170, 2006.

DE ARAÚJO, J.C. Entropy-based equation to assess hillslope sediment production. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, n. 13, p. 2005-2018, 2007.

DONIGIAN. History and Evolution of Watershed Modeling Derived from the Stanford Watershed Model. Disponível em: <<http://www.aquaterra.com/resources/pubs/pdf/donigian-2006.pdf>> Acesso em 05.12.2012.

DUQUE, J. G. **Solo e água no polígono das secas**. Mossoró: Fundação Guimarães Duque - RGN. 1980.

FIGUEIREDO, J. V. **Início da geração do escoamento superficial em uma bacia Semiárida em Caatinga preservada**. 2011. 84 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2011.

FLANAGAN, D. C.; NEARING, M.A. USDA-Water Erosion Prediction Project: Hillslope Profile and Watershed Model Documentation. NSERL Report No. 10. USDA-ARS National Soil **Erosion Research Laboratory**. West Lafayette, Indiana(1995).

FRANCKE, T., GÜNTNER, A., BRONSTERT, A., MAMEDE, G.L., MÜLLER, E. N. Automated catena-based discretization of landscapes for the derivation of hydrological modeling units. **International Journal of Geographic Information Science**, v. 22, n. 2, p. 111-132, 2008.

GARFUR, A.; JENSEN, J. R.; BORGGAARD, O. K.; PETERSEN, L. Runoff and losses of soil and nutrients from small watersheds under shifting cultivation (Jhum) in the Chittagong Hill Tracts of Bangladesh. **Journal of Hydrology**, v. 274, p. 30-46, 2003.



GOODRICH, D. C. *et al.* Long-term precipitation database, WGEW. **Water Resources Research**. v.44, W05S04, doi: 10.1029/2006WR005782, 2008.

GREEN, W. H.; AMPT, G.A Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. **Journal Agricultural Science**, v. 4, n. 1, p. 1-24, 1911.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil**. PIK-Report No. 77. Potsdam: Institute for Climate Research, 2002.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, v. 297, n. 2-3, p.136-161, 2004.z

GÜNTNER, A.; KROL, M. S.; ARAÚJO, J. C.; BRONSTERT, A. Simple water balance modeling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region. **Hydrological Science Journal**, v.5, n. 5, p. 901-917, 2004.

HAAN, C. T.; BARFIELD, B. J.; HAYES, J. C. **Design hydrology and sedimentology for small catchments**. San Diego: Academic Press Inc. 1993. 581p.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. **Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990** (Org. Ramos, A. M.; Santos, L. A. R.; Fortes, L. T. G.. Brasília, DF : INMET, 2009. 465 p.

KIMOTO, A.; UCHIDA, T.; MIZUYAMA, T.; CHANGHUA, L. Influence of human activities on sediment discharge from devastated weathered granite hills of southern China: effects of 4-years elimination human activities. **CATENA**, v. 48, p. 217-233, 2002.

KROL, M. K.; JAEGER, A.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. Integrated modeling of climate, water, soil, agricultural and socio-economic processes: a general introduction of the methodology and some exemplary results from the semi-arid north-east of Brazil. **Journal of Hydrology**, v.328, n.3, p.417-431, 2006.

LANNA, A.E; SCHWARZBACH, M. *MODHAC – Modelo Hidrológico Auto-Calibrável*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Recursos Hídricos, Publicação 21, 1989.

LOPES, V. L. **A numerical model of watershed erosion and sediment yield**.1987. 148 p. Tese de Doutorado. Universidade do Arizona, 1987.

LÓPEZ, O. C. **Estudio comparativo del manejo de los recursos hídricos en dos cuencas tropicales latinoamericanas en diferentes condiciones ambientales: la cuenca de Madalena, Ceará, Brasil y la cuenca del Río San Diego, Pinar Del Río, Cuba**. 2011. 66 p. Relatório –Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MALVEIRA, V. T. C.; DE ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A. Hydrological impact of a high-density reservoir network in the semiarid north-eastern Brazil. **Journal of Hydrologic Engineering**.Doi:10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000404. 2011.

MALVEIRA, V. T. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do açude Orós**. 2009. 121 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modeling and management**. 2008. 120 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) –Instituto de Geocologia, Universidade de Potsdam, 2008.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia semiárida: modelagem distribuída e validação em diferentes escalas**. 2009. 139 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MEDEIROS, P. H. A.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T., MAMEDE, G. L., DE ARAÚJO, J. C. Modelling spatio-temporal patterns of sediment yield and connectivity in a semi-arid catchment with the WASA-SED model. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 4, p. 636-648, doi:10.1080/02626661003780409. 2010.

MEYER L. D.; WISCHMEYER.(1969). Mathematical simulation of the process of soil erosion by water. *TRANSACTIONS of the ASAE* 12(6):754-758, 762. Apud Foster (1982).

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. *Symposium Soc. Exp. Biology*, 19, 205-234. 1965.

MONTENEGRO, A. A. A.; RAGAB, R. Hydrological response of a Brazilian semi-arid catchment to different land use and climate change scenarios: a modelling study. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2705-2723. 2010.

MONTENEGRO, S. M. G.; RAGAB, R. Impact of possible climate and land use changes in the semi arid regions: A case study from North Eastern Brazil. **Journal of Hydrology**. v. 434-435, p. 55-68, 2012.

MORRIS, G. L.; FAN, J. **Reservoir Sedimentation Handbook**, McGraw-Hill Book Co., New York. 1998.

MUELLER, E. N.; GÜNTNER, A.; FRANCKE, T.; MAMEDE, G. L. Modelling water availability, sediment export and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model. **Geoscientific Model Development**, v. 3, p. 275-291, doi:10.5194/gmd-3-275-2010. 2010.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models – Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NOBREGA, R. S.. Modelagem de Impactos do Desmatamento nos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Jamari (RO) Utilizando Dados de Superfície e do Trmm. 2008. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas). Universidade Federal de Campina Grande. 2008.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings Royal Society London*, A 193, pp. 120-145. 1948

PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Science Journal**, v.33, n.4, p. 379-400, 1988.

PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C. A. G.; ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatingabiome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013.

PINHEIRO, L. S. **Proposta de índice de priorização de áreas para saneamento rural: estudo de caso do Assentamento 25 de Maio, CE**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado em em Desenvolvimento e Meio Ambiente) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

RAGAB, R.; BROMLEY, J. IHMS—Integrated Hydrological Modelling System. Part 1. Hydrological processes and general structure. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2663-2680. 2010.

RAGAB, R.; BROMLEY, J; DÖRFLINGER, G.; KATSIKIDES, S. IHMS—Integrated Hydrological Modelling System. Part 2. Application of linked unsaturated, DiCaSM and saturated zone, MODFLOW models on Kouris and Akrotiri catchments in Cyprus. **Hydrological Processes**, v. 24, p. 2681-2692. 2010.

ROVEY, E. W.; WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. (1977). A distributed kinematic model of upland watersheds. Fort Collins, Colorado State University, 52p. **Hydrologic Papers 93**.

SANTOS, L. L.; SRINIVASAN, V. S.; ARAGÃO, R. Modelagem hidrossedimentológica no semi-árido paraibano utilizando o modelo WEPP e o efeito de escala sobre os seus parâmetros. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n.1, p. 53-63, 2012.

SCHAAP, M. G. (1999). Rosetta Model.

<http://www.ars.usda.gov/Services/docs.htm?docid=8953>. Acesso em janeiro de 2013.

SHERMAN, L. K. Stream flow from rainfall by the unit-graph method. **Engineering News-Record**, v.108, p. 501-505, 1932.

SHUTTLEWORTH, W. J.; WALLACE, J. S. Evaporation from sparse crops - an energy combination theory. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 111, 839-855. 1985.

SILANS, A. M. B. P.; PAIVA, A. E. D. B.; ALMEIDA, C. D.; ALBUQUERQUE, D. J. S. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do rio do Peixe – estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.3, p. 26-29, 2000.

SMITH, R. E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. Modeling Infiltration for Multistorm Runoff Events. **Water Resources Research**, v. 29, n. 1, p. 133-144, 1993.

SOUZA FILHO, F. A. **Clima e recursos hídricos no Brasil – variabilidade e mudança climática nos semi-áridos brasileiros**. Porto Alegre: ABRH. 2003

THOMAZ, E. L. The influence of traditional steep land agricultural practices on runoff an soil loss. **Agricultural, Ecosystem and environment**, v. 130, p. 23-30, 2009.

TOMASELLA, J., HODNETT, M.G. Estimating unsaturated hydraulic conductivity of Brazilian soils using soil-water retention data. **Soil Science**, v. 162, n. 10, p. 703-712, 1997.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ed. Porto Alegre: ABRH. 2005.

VAN OEL, P. R.; KROL, M. S.; HOEKKSTRA, A. Y. ARAUJO, J. A. **The impact of upstream water abstractions on reservoir yield: the case of the Orós Reservoir in Brazil**. London: IAHS Press, 2008.

WERNER, P. C.; GERTENGARBE, FRIEDRICH-WILHELM. **Global change and regional impacts - the climate of PiauÍ and Ceará**. Berlin: Springer-Verlag. 2003. pp. 81-86.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. e GOODRICH, D. C. (1990). KINEROS: A Kinematic Runoff and Erosion Model: Documentation and User Manual. U. S. Department of Agriculture, **Agricultural Research Service**, ARS-77, 130 pp.

XAVIER, L. N. R. **Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo TOPMODEL**. 2002. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2002.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S. Caracterização de períodos secos ou excessivamente chuvosos no estado do Ceará através da técnica dos quantis:1964-1998.

**Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 14, n. 2, P. 63-78,1999.

YEVJEVICH, V. Determinism and stochasticity in Hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 22, p. 225-238,1974.

# ANEXO A - CÓPIA DOS PROJETOS DE CONSTRUÇÃO E AMPLIAÇÃO DO AÇUDE MARENGO

AÇUDAGEM PARTICULAR EM COOPERAÇÃO NO CEARÁ

371

## AÇUDE MARENGO

Município: **Madalena**  
Localidade: fazenda Marengo  
Proprietário: Wícar Parente de Paula Pessoa

### Características gerais

Coordenadas geográficas: 05° 01' 47" S  
Latitude: 39° 32' 06" W. Gr.  
Longitude:  
Construção: 23 meses  
Prazo previsto: 23.01.1933  
Início: 18.03.1934  
Conclusão: Rs 428:405\$314  
Orçamento: Rs 200:000\$000  
Prêmio: 46,68%  
Cooperação do DNOCS:

### Características hídricas

Capacidade: 7.001.900m<sup>3</sup>  
Sistema: rio Jaguaribe  
Subsistema: riacho das Ipueiras/  
rio Quixeramobim/  
rio Banabuiú  
riacho Marengo  
Riacho barrado: 11,99km<sup>2</sup>  
Bacia hidrográfica: 167,05ha  
Bacia hidráulica: 787,70mm  
Precipitação média anual: 401,03m<sup>3</sup>/s  
Descarga fluvial de projeto:

### Características técnicas:

#### 1 - Barragem

Tipo: terra homogênea  
Extensão do coroamento: 213,70m  
Largura do coroamento: 3,00m  
Altura do maciço: 16,20m  
Largura máxima da base: 64,00m  
Volume de terra da fundação: 8.919,00m<sup>3</sup>  
Profundidade da fundação: 7,50m  
Volume de terra do maciço: 50.106,00m<sup>3</sup>  
Taludes: montante e jusante: 2 : 1m  
Enrocamento: 210,00  
Área dos taludes: 9.139,00m<sup>2</sup>

#### 2 - Sangradouro

Tipo: descarga laminar  
Largura: 120,00m  
Revanche: 2,00m  
Lâmina máxima de sangria: 1,00m  
Cota da soleira: 114,50m  
Volume de corte: 5.603,00m<sup>3</sup>  
Alvenaria: 207,00m<sup>3</sup>

### 3 - Tomada d'água

Tipo: galeria tubular  
Diâmetro: 250,00mm  
Extensão: 52,00m

### Histórico

Requerimento do estudo: 27.03.1922  
Autor: Wícar Parente de Paula Pessoa

Realização do estudo: 15.02 a 31.03.1923  
Autor: Eng.º José Anastácio de Sousa Aguiar – Condutor

Projeto e orçamento: 31.12.1929  
Autor: Eng.º Abelardo Andréia dos Santos

Revisão de projeto: 19.11.1932  
Autor: Eng.º José Alípio de Castro – Condutor

Aprovação do projeto e orçamento:  
Aviso Ministerial 2.808, de 31.12.1932.

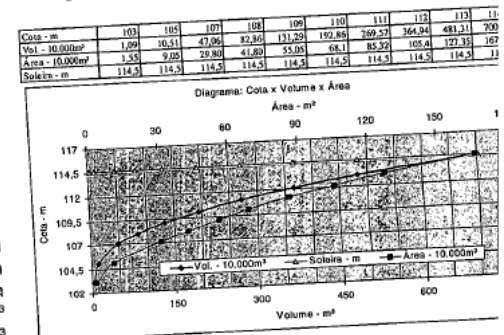
Fiscalização: Oséias Ponte – Aux.-Técnico.

Termo de recebimento: 22.03.1934  
Autores: Antônio Garcia de Oliveira – Mestre; e José Júlio da Ponte – Topógrafo

### Observações:

O riacho Marengo chamou-se Ipueiras; e Quieto. E fazenda, também, Quieto.  
Em 1947, o proprietário, por iniciativa própria, elevou a cota do sangradouro de 114,50 para 115,50m, e deixou a largura do coroamento em 0,50m.

### Cubagem da bacia hidráulica e diagrama:



# AÇUDE MARENGO

Município: **Madalena**  
Localidade: fazenda Marengo  
Proprietário: Wícar Parente de Paula Pessoa

## Características gerais

Coordenadas geográficas:  
Latitude: 05° 01' 47" S  
Longitude: 39° 32' 06" W. Gr.  
Construção: 23 meses  
Prazo previsto: 23.01.1933  
Início: 18.03.1934  
Conclusão: Rs 428:405\$314  
Orçamento: Rs 200:000\$000  
Prêmio: 46,68%  
Cooperação do DNOCS:

## Características hídricas

Capacidade: 7.001.900m<sup>3</sup>  
Sistema: rio Jaguaribe  
Subsistema: riacho das Ipueiras/  
rio Quixeramobim/  
rio Banabuiú  
riacho Marengo  
Riacho barrado: 11,99km<sup>2</sup>  
Bacia hidrográfica: 167,05ha  
Bacia hidráulica: 787,70mm  
Precipitação média anual: 401,03m<sup>3</sup>/s  
Descarga fluvial de projeto:

## Características técnicas:

### 1 - Barragem

Tipo: terra homogênea  
Extensão do coroamento: 213,70m  
Largura do coroamento: 3,00m  
Altura do maciço: 16,20m  
Largura máxima da base: 64,00m  
Volume de terra da fundação: 8.919,00m<sup>3</sup>  
Profundidade da fundação: 7,50m  
Volume de terra do maciço: 50.106,00m<sup>3</sup>  
Taludes: montante e jusante: 2 : 1m  
Enrocamento: 210,00  
Área dos taludes: 9.139,00m<sup>2</sup>

### 2 - Sangradouro

Tipo: descarga laminar  
Largura: 120,00m  
Revanche: 2,00m  
Lâmina máxima de sangria: 1,00m  
Cota da soleira: 114,50m  
Volume de corte: 5.603,00m<sup>3</sup>  
Alvenaria: 207,00m<sup>3</sup>

### 3 - Tomada d'água

Tipo: galeria tubular  
Diâmetro: 250,00mm  
Extensão: 52,00m

## Histórico

**Requerimento do estudo:** 27.03.1922  
Autor: Wícar Parente de Paula Pessoa

**Realização do estudo:** 15.02 a 31.03.1923  
Autor: Eng.º José Anastácio de Sousa Aguiar – Conductor

**Projeto e orçamento:** 31.12.1929  
Autor: Eng.º Abelardo Andréia dos Santos

**Revisão de projeto:** 19.11.1932  
Autor: Eng.º José Alípio de Castro – Conductor

**Aprovação do projeto e orçamento:**  
Aviso Ministerial 2.808, de 31.12.1932.

**Fiscalização:** Oséias Ponte – Aux.-Técnico.

**Termo de recebimento:** 22.03.1934  
Autores: Antônio Garcia de Oliveira – Mestre; e José Júlio da Ponte – Topógrafo

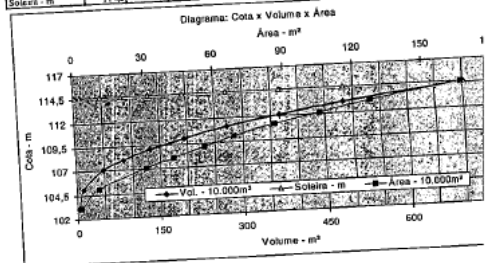
## Observações:

O riacho Marengo chamou-se Ipueiras; e Quieto. E a fazenda, também, Quieto.

Em 1947, o proprietário, por iniciativa própria, elevou cota do sangradouro de 114,50 para 115,50m, e deixou largura do coroamento em 0,50m.

## Cubagem da bacia hidráulica e diagrama:

Cota - m	103	105	107	109	100	110	111	112	113	114
Vol. - 10.000m <sup>3</sup>	1,09	10,81	47,06	82,86	131,29	192,86	269,57	364,94	481,31	700
Área - 10.000m <sup>2</sup>	1,55	9,05	29,80	41,80	55,05	68,1	85,32	105,4	127,35	167
Soleira - m	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5	114,5	11





## AÇUDE MARENGO (AMPLIAÇÃO)

Município: **Madalena**  
Localidade: fazenda Marengo  
Proprietário: Wicar Parente de Paula Pessoa

### Características gerais

Coordenadas geográficas:  
Latitude: 05° 01' 47" S  
Longitude: 39° 32' 06" W. Gr.  
Construção da ampliação:  
Prazo previsto: 28 meses  
Início: 15.09.1955  
Conclusão: 09.06.1958  
Orçamento: Cr\$ 5.400.921,00  
Prêmio: Cr\$ 2.300.000,00  
Cooperação do DNOCS: 42,58%  
Construção da barragem inicial:  
Orçamento: Rs 428:405\$314  
Prêmio: Rs 200:000\$000  
Cooperação do DNOCS: 46,68%  
Custo total do açude: Cr\$ 5.829.326,30  
Cooperação final DNOCS: 42,88%

### Características hídricas

Capacidade: 16.800.000 m<sup>3</sup>  
Sistema: rio Jaguaribe  
Subsistema: riacho das Ipueiras/  
rio Quixeramobim  
Riacho barrado: riacho Marengo  
Bacia hidrográfica: 120,00km<sup>2</sup>  
Bacia hidráulica: 321,00ha  
Volume intangível: 1.050.000,00m<sup>3</sup>  
Precipitação média anual: 787,70mm  
Descarga fluvial de projeto: 291,00m<sup>3</sup>/s  
Volume anual afluente: 7.475.000,00m<sup>3</sup>

### Características técnicas:

#### 1 - Barragem

Tipo: terra homogênea  
Extensão do coroamento: 415,00m  
Largura do coroamento: 5,00m  
Volume de terra da fundação: 2.145,00m<sup>3</sup>  
Volume de terra do maciço: 67.795,00m<sup>3</sup>  
Taludes: montante e jusante: 2 : 1m  
Empedramento: 4.988,00m<sup>3</sup>  
Área dos taludes: 18.745,00m<sup>2</sup>

#### 2 - Sangradouro

Tipo: muro-vertedouro  
Largura: 65,00m  
Revanche: 2,50m  
Lâmina máxima de sangria: 1,50m  
Cota da soleira: 296,00m  
Volume de corte: 7.513,00m<sup>3</sup>  
Alvenaria: 154,00m<sup>3</sup>

#### 3 - Tomada d'água

Tipo: galeria tubular  
Diâmetro: 250,00mm  
Extensão: 89,00m  
Cota de adução: 285,60m  
Vazão: 140,00 l/s

### Histórico

**Requerimento do estudo:** 24.06.1951  
Autor: Wicar Parente de Paula Pessoa

**Realização do estudo:** 24.11.1952 a 21.02.1953  
Autor: José Garcia de Araújo – Topógrafo

**Projeto e orçamento:** 21.08.1954  
Autor: Crebam Lima de Miranda

**Aprovação do projeto e orçamento:**  
Portaria Ministerial 814, de 02.03.1954, Diário Oficial de  
11.09.1954, pág. 15.304

**Termo de ajuste:** 19.07.1955

**Termos aditivos de ajuste:** 10.12.1957; e 11.02.1958

**Fiscalização:** José Júlio da Ponte – Topógrafo; Manuel Farias  
Marques – Fiscal

**Termo de recebimento:** 25.06.1958  
Autores: Arquiteto Grijalva Ferreira da Costa Filho; Eng.º  
Afrânio Costa Lima Vieira; Amadeu Avelino de Sousa –  
Topógrafo; e o Proprietário

### Observações:

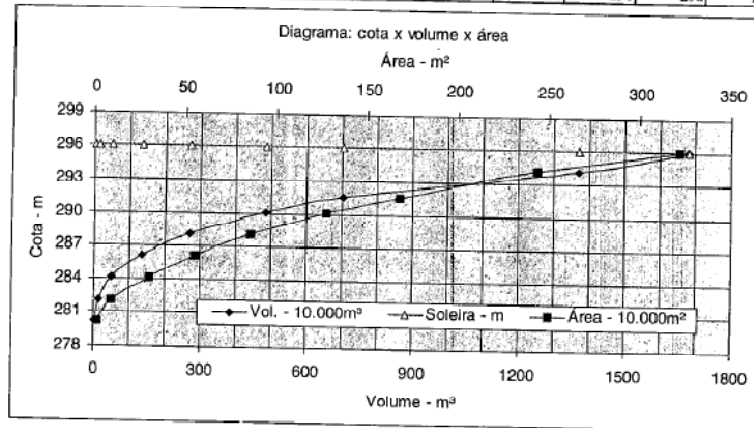
O riacho barrado ficou registrado na memória descritiva do estudo com a denominação Mulungu, mas iniciada a construção do açude passou a ser chamado Marengo, Ipueira ou Quietto.

E a fazenda era também conhecida por Quietto.

No reestudo da bacia hidráulica para ampliação do açude, admitiu-se nova cota topográfica.

Cubagem da bacia hidráulica e diagrama:

Cota - m	280,1	282,1	284,1	286,1	288,1	290,1	291,6	294,1	296
Vol. - 10.000m <sup>3</sup>	1,09	10,51	47,06	131,29	269,57	481,31	700,19	1368,24	1680
Área - 10.000m <sup>2</sup>	1,55	9,05	29,8	55,05	85,32	127,35	167,05	242,76	321,8
Soleira - m	296	296	296	296	296	296	296	296	296



## ANEXO B - CÓPIA DOS PROJETOS DE CONSTRUÇÃO E AMPLIAÇÃO DO AÇUDE SÃO JOAQUIM

572

FRANCISCO DANTAS PINHEIRO

### AÇUDE SÃO JOAQUIM

Município: **Quixeramobim**  
Localidade: fazenda Ipueiras  
Proprietário: Wicar Parente de Paula Pessoa

#### Características gerais

Coordenadas geográficas:  
Latitude: 05° 03' 34" S  
Longitude: 39° 33' 34" W. Gr.  
Construção:  
Início: 16.05.1932  
Conclusão: 17.12.1932  
Orçamento: Rs 291:100\$645  
Prêmio: Rs 145:550\$322  
Cooperação do DNOCS: 50 %

#### Características hídricas

Capacidade: 1.024.900m<sup>3</sup>  
Sistema: rio Jaguaribe  
Subsistema: riacho das Ipueiras/  
rio Quixeramobim/ rio Banabuiú  
Riachos barrados: riacho Carnaúba Torta  
e riacho Capa da Sela  
Bacia hidrográfica: 35,56km<sup>2</sup>  
Bacia hidráulica: 72,18ha  
Extensão da bacia hidráulica: 2,24km  
Curso do riacho: 16,26 e 6,12km  
Precipitação média anual: 662,00mm  
Descarga fluvial de projeto: 259,00m<sup>3</sup>/s  
Volume anual afluente: 2.354.336,00m<sup>3</sup>

#### Características técnicas:

1 - Barragem	Unid.	Principal	Auxiliar
Tipo: terra homogênea (T. H.)	-	T. H.	T. H.
Extensão do coroamento	m	175,00	234,00
Largura do coroamento	m	3,00	3,00
Altura do maciço	m	9,00	8,30
Largura máxima da base	m	33,00	30,00
Volume de terra da fundação	m <sup>3</sup>	3.503,00	10.425,00
Profundidade da fundação	m	3,00	4,50
Volume de terra do maciço	m <sup>3</sup>	6.562,00	17.206,00
Taludes: montante e jusante	m	2 : 1 e 1,5 : 1	2 : 1 e 1,5 : 1
Área dos taludes	m	2.071,00	4.735,00

#### 2 - Sangradouro

Tipo: descarga laminar  
Largura: 80,00m  
Revanche: 2,00m  
Lâmina máxima de sangria: 1,00m  
Cota da soleira: 102,00m  
Volume de corte: 9.827,00m<sup>3</sup>

#### 3 - Tomada d'água

Tipo: sifão  
Diâmetro: 150,00mm  
Extensão: 25,50m  
Alvenaria: 22,22m<sup>3</sup>  
Concreto: 9,19m<sup>3</sup>

#### Histórico

Requerimento do estudo: 16.06.1930

Autor: Wicar Parente de Paula Pessoa

Realização do estudo: 20 a 31.07 e 21 a 31.08.1930

Projeto e orçamento: 30.09.1930

Autor: Eng.º Abelardo Andréia dos Santos

Aprovação do projeto e orçamento:

Aviso Ministerial 945, de 05.05.1932

Fiscalização: Oséias Ponte - Aux.-Técnico

Termo de recebimento: 23.12.1932

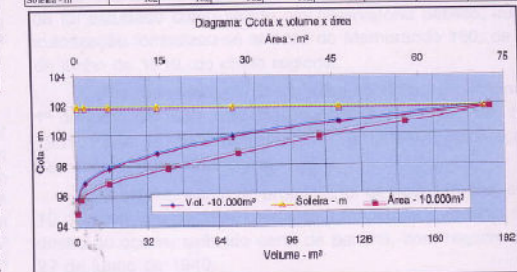
Autor: Alberto Eduardo Freire - Aux.-Técnico

#### Observações:

Dista 48km, aproximado, da cidade de Quixeramobim.  
A barragem auxiliar intercepta o riacho Capa da Sela.  
O projeto inicial previa uma galeria tubular de 300mm de diâmetro que foi substituída por outra de 150mm.

#### Cubagem da bacia hidráulica e diagrama

Cota - m	95	96	97	98	99	100	101	102
Vol - 10.000m <sup>3</sup>		0,49	3,66	14,42	36,57	69,30	117,74	182,45
Área - 10.000m <sup>2</sup>	0,19	0,76	5,57	19,56	38,34	62,51	97,53	142,16
Soleira - m	102	102	102	102	102	102	102	102





## AÇUDE SÃO JOAQUIM (AMPLIAÇÃO)

Município: **Quixeramobim**  
Localidade: fazenda Ipueiras  
Proprietário: Wícar Parente de Paula Pessoa

### Características gerais

Coordenadas geográficas:  
Latitude: 05° 03' 34" S  
Longitude: 39° 33' 34" W. Gr.

Construção da ampliação do açude:  
Prazo previsto: 21 meses  
Início: 10.09.1948  
Conclusão: 02.09.1950  
Orçamento: Cr\$ 628.497,98  
Prêmio: Cr\$ 249.262,30  
Cooperação do DNOCS: 39,66%

Empedramento da auxiliar 1:  
Orçamento: Cr\$ 181.676,00  
Prêmio: Cr\$ 90.838,00

Construção da Barragem inicial:  
Orçamento: Rs 291:100\$645  
Prêmio: Rs 145:550\$322  
Custo total açude: Cr\$ 1.101.274,62  
Cooperação total DNOCS: 44,10%

### Características hídricas

Capacidade: 5.148.100m<sup>3</sup>  
Sistema: rio Jaguaribe  
Subsistema: riacho das Ipueiras/  
rio Quixeramobim/  
rio Banabuiú

Riachos barrados: riacho Carnaúba Torta  
e riacho Capa da Sela

Bacia hidrográfica: 30,80km<sup>2</sup>  
Bacia hidráulica: 141,97ha  
Extensão da bacia hidráulica: 3,00km  
Curso do riacho: 16,26 e 6,12km  
Precipitação média anual: 852,20mm  
Descarga fluvial de projeto: 98,25m<sup>3</sup>/s  
Volume anual afluente: 2.624.776,00m<sup>3</sup>

### Características técnicas:

1 - Barragem	Unid.	Principal	Auxiliar 1	Auxiliar 2
Tipo: terra homogênea (T.H.)	-	T.H.	T.H.	T.H.
Extensão do coroamento	m	384,00	363,00	148,50
Largura do coroamento	m	4,00	4,00	3,00
Altura do maciço	m	12,00	11,00	5,00
Largura máxima da base	m	52,00	48,00	23,00
Volume de terra da fundação	m <sup>3</sup>	2.587,00	2.660,00	149,00
Profundidade da fundação	m	1,50	1,50	1,50
Volume de terra do maciço	m <sup>3</sup>	14.081,00	25.760,00	5.259,00
Taludes: montante e jusante	m	2 : 1	2 : 1	2 : 1
Área de empedramento	m <sup>2</sup>	-	5.128,00	-
Área dos taludes	m <sup>2</sup>	5.226,00	8.537,00	2.264,00

### 2 - Sangradouro

Tipo: muro-vertedouro  
Largura: 50,00m  
Revanche: 2,00m  
Lâmina máxima de sangria: 1,00m  
Cota da soleira: 105,00m  
Volume de corte: 345,00m<sup>3</sup>  
Alvenaria: 192,00m<sup>3</sup>

### 3 - Tomada d'água

Tipo: galeria tubular  
Diâmetro: 150,00mm  
Extensão: 39,00m  
Vazão: 46,00 l/s  
Alvenaria: 16,00m<sup>3</sup>  
Concreto: 2,00m<sup>3</sup>

### Histórico

**Requerimento do estudo:** 08.06.1937  
Autor: Wícar Parente de Paula Pessoa

**Realização do estudo:** 22.01 a 29.02.1944  
Autor: Francisco de Assis Cabral – Topógrafo.

**Projeto e orçamento:** 11.04 a 26.05.1945  
**Autor:** Eng.º Antônio Ipirajá

**Aprovação do projeto e orçamento:**  
 Portaria Ministerial 376, de 11.04.1946, Diário Oficial de 17.04.1946, pág. 5.594.

**Termo de ajuste:** 15.01.1948  
 Autores: Eng.º Francisco de Paula Pereira de Miranda; e, pelo proprietário, José Edmar de Sousa Melo

**Termo aditivo de ajuste:** 03.11.1950  
 Autores: Eng.º Francisco de Paula Pereira de Miranda; e o Proprietário.

**Fiscalização:** José Gonçalves Pinheiro – Fiscal

**Termo de recebimento:** 26.09.1950  
 Autores: Eng.º Geraldo Marques Holanda; Antônio Garcia de Oliveira – Mestre; José Júlio da Ponte – Topógrafo; e, o proprietário, Wícar Parente de Paula Pessoa.

**Observações:**

Dista, aproximado, 48km da cidade de Quixeramobim.

Na ampliação, a barragem auxiliar 2 fechou o sangradouro da principal, quando esta represava menor volume. Houve ainda revisão hidrológica do projeto, surgindo informação diferente para a bacia hidrográfica e descarga fluvial.

Relato das várias portarias de aprovação do projeto e orçamento: Port. 528, de 23 de maio de 1944, confirmou o prêmio de Cr\$ 154.449,70; a 376, de 11 de abril de 1946, aprovou o prêmio já fixado e o projeto; a 330, de 2 de maio de 1947, elevou a participação para Cr\$ 204.499,70; a 682, de 25 de julho de 1950, acertou o auxílio em Cr\$ 249.262,30 e foi acordado pelo termo aditivo de ajuste de 3 de novembro de 1950.

Empedramento da barragem auxiliar 1: requerimento – 18 de outubro de 1949; estudo – 27 de janeiro de 1950; projeto – 10 de novembro de 1950; aprovação – Port. Ministerial 1.097, de 4 de dezembro de 1950, publicada em 13 de março de 1951.

**Cubagem da bacia hidráulica e diagrama**

Cota - m	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
Vol. -10.000m³	0,15	2,01	11,7	34,27	70,06	120,66	187,81	273,22	382,36	514,81
Área - 10.000m²	0,3	6,42	15,95	29,20	42,37	58,82	75,47	95,35	118,92	141,97
Soleira - m	105	105	105	105	105	105	105	105	105	105

