



UNIVERSIDADE DA INTEGRAÇÃO INTERNACIONAL  
DA LUSOFONIA AFRO-BRASILEIRA  
INSTITUTO DE ENGENHARIA E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL  
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIAS

JOSÉ NILSON OLIVEIRA DA COSTA

MODELAGEM DE FLUXOS DE ÁGUA E SEDIMENTO POR UMA DENSA REDE  
DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS: O CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
AÇUDE PENTECOSTE.

ACARAPE

2022

JOSÉ NILSON OLIVEIRA DA COSTA

MODELAGEM DE FLUXOS DE ÁGUA E SEDIMENTO POR UMA DENSA REDE  
DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS: O CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
AÇUDE PENTECOSTE.

Monografia apresentada como requisito  
para a obtenção de título de graduado em  
Engenharia de Energias, na Universidade  
da Integração Internacional da Lusofonia  
Afro-Brasileira,  
UNILAB – Campus de Palmares

Orientador: George Leite Mamede

Acarape

2022

Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira  
Sistema de Bibliotecas da UNILAB  
Catalogação de Publicação na Fonte.

---

Costa, Jose Nilson Oliveira da.

C87m

Modelagem de fluxos de água e sedimento por uma densa rede de reservatórios superficiais: o caso da Bacia Hidrográfica do Açude Pentecoste / Jose Nilson Oliveira da Costa. - Redenção, 2022.  
41f: il.

Monografia - Curso de Engenharia de Energias, Instituto de Engenharias e Desenvolvimento Sustentável, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Redenção, 2022.

Orientador: Prof. Dr. George Leite Mamede.

1. Processos hidrossedimentológicos. 2. WASA-SED. 3. Pequenos Reservatórios. I. Título

CE/UF/BSP

CDD 621.3

---

JOSÉ NILSON OLIVEIRA DA COSTA

MODELAGEM DE FLUXOS DE ÁGUA E SEDIMENTO POR UMA DENSE  
REDE DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS: O CASO DA BACIA  
HIDROGRÁFICA DO AÇUDE PENTECOSTE.

Monografia apresentado como requisito  
para a obtenção de título de graduado em  
Engenharia de Energias, na Universidade  
da Integração Internacional da Lusofonia  
Afro-Brasileira, UNILAB – Campus de  
Palmares.

Aprovado em: 02/08/2022

BANCA EXAMINADORA



---

Dr. George Leite Mamede (Orientador)

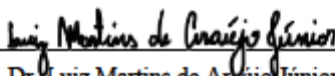
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB



---

Dr. Alexandre Cunha Costa

Universidade Da Integração Internacional Da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB



---

Dr. Luiz Martins de Araújo Júnior

Universidade Da Integração Internacional Da Lusofonia Afro-Brasileira - UNILAB

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais, José Joaquim e Maria Lêda pelos conselhos, ensinamentos, apoio, confiança e amor incondicionais.

Ao meu orientador, Dr. George Leite Mamede, pela paciência e dedicação.

A vocês a minha eterna gratidão

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida, por todo o meu trajeto na vida, por me dar saúde e possibilidade de crescimento.

Ao professor George Leite Mamede pela orientação, confiança, ensinamentos compreensão e motivação ao longo do trabalho.

À minha família e namorada, pelo apoio, incentivo, e confiança deposita nos momentos bons e nos difíceis.

À Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB) pela oportunidade de estudar e me capacitar e me tornar um engenheiro.

Aos meus amigos, pela convivência, respeito e bons momentos compartilhados ao longo dos estudos coletivos.

A todos os professores que já tive ao longo do curso, pela amizade e pela chance que tive de aprender e compartilhar conhecimentos.

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

## RESUMO

Os modelos hidrológicos são ferramentas importantes que vem sendo utilizadas no planejamento e gestão dos recursos hídricos. O assoreamento nos reservatórios de água superficiais se traduz em efeitos negativos sobre a capacidade de armazenamento e a disponibilidade hídrica. Este projeto tem como meta uma análise mais criteriosa do papel do pequeno reservatório na dinâmica de água e sedimentos em bacias hidrográficas do Semiárido Brasileiro, na perspectiva de inclusão dos pequenos sistemas no processo de gestão de recursos hídricos. O projeto proposto será realizado na Bacia Hidrográfica do reservatório Pentecoste no estado do Ceará, com área de aproximadamente 3230 km<sup>2</sup>. Neste trabalho será dada ênfase na modelagem da dinâmica de deposição de sedimentos em reservatórios da bacia do açude Pentecoste, considerando a distribuição espacial da densa rede de reservatórios superficiais. Para a modelagem foram consideradas 3 parametrizações de classes de tamanho de reservatórios, para o assoreamento foi aplicada a equação (USLE em conjunto com a MUSLE) disponíveis no módulo sedimentológico do modelo WASA-SED para 6 reservatórios de estratégicos e 725 reservatórios de pequeno porte. Na modelagem hidrológica o modelo apresentou o mesmo comportamento para as 3 parametrizações avaliadas. Na modelagem do assoreamento, enquanto todos os reservatórios retinham 48,5% de sedimentos, apenas os pequenos apresentaram uma retenção de 27,2%. Isso mostra que a pequena açudagem impacta de forma positiva em relação à deposição de sedimento nos reservatórios estratégicos uma vez que evitam que esses sedimentos diminuam a capacidade de acumulação de água nos mesmos, aumentando sua vida-útil.

Palavras chaves: Processos hidrossedimentológico, pequenos reservatórios, WASA-SED.

## ABSTRACT

The low levels of precipitation in the Brazilian semiarid, associated with other characteristics of semi-arid regions, such as the enormous spatial and temporal variability of precipitation and high levels of evapotranspiration contribute to a low water availability, reflected in intermittent rivers and reduced runoff values. The retention of the flow of the river in lakes and artificial reservoirs ends up being one of the main ways of maintaining the water supply throughout the year. For a good management and planning of these water resources, it is necessary to have an in-depth knowledge of the hydrological and sedimentological processes that occur in this region. This work proposes to study the modeling of hydrosedimentological processes in a basin with dense networks of superficial reservoirs in the Brazilian semiarid region using the WASASED model. The study area comprises the hydrographic basin of the Açude Pereira de Miranda - Pentecoste. It is a sub-basin located in the north central region of the state of Ceará and belongs to the curú river basin. For the hydrological modeling, simulations of the evolution of the volume level of six reservoirs were carried out for the period between 1980 and 2019, and the results of the model were compared with the measured volumes of the respective reservoirs. For the silting modeling, the equation (MUSLE) available in the sedimentological module of the WASA-SED model were applied for 8 large reservoirs and 725 small reservoirs. The results show that the dense network of reservoirs retains 8.3% of the generated runoff and 48.6% of the sediments produced in the hydrographic basin, including small and large reservoirs. Considering only the small reservoirs, there is a retention of 27.2% of the total sediments produced, which shows that the small dam has a positive impact in relation to the deposition of sediment in the strategic reservoirs, since they prevent these sediments from reducing the capacity of accumulation of water in them, increasing their useful life.

Key words: Hydrosedimentological processes, Semi-arid, WASA-SED.



## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	10
1.1 Objetivo .....	11
2 REVISÃO DA LITERATURA .....	12
2.1 Processos hidrossedimentológicos em regiões semiáridas .....	12
2.2 Redes de Reservatórios Superficiais em regiões semiáridas .....	14
2.3 Modelagem hidrossedimentológica em regiões semiáridas .....	15
3. METODOLOGIA .....	18
3.1 Área de estudo .....	18
3.2 Modelo wasa-sed: descrição geral .....	19
3.2.1 Estrutura do modelo para a vertente .....	20
3.2.2 Estrutura do modelo para redes de drenagens .....	22
3.2.3 Estrutura do modelo para reservatórios .....	22
3.3 Parametrização do modelo WASA-SED para a bacia do Pentecoste .....	23
3.4 Calibração do Fator de escala (SF) .....	28
3.5 Definição de diferentes configurações da rede de reservatórios superficiais .....	29
3.5.1 Alteração nos limites dos agrupamentos de classes de reservatórios .....	29
3.5.2 Alteração no quantitativo de reservatórios com eliminação de grupos de tamanhos distintos.....	30
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	30
4.1 Condutividade hidráulica do solo .....	30
4.2 Análise de diferentes configurações da rede de reservatórios superficiais.....	31
4.2.1 Alteração do limite das classes de tamanho de reservatórios .....	31
4.2.2 Alteração no quantitativo de reservatórios com eliminação de grupos de tamanhos distintos.....	34
5 CONCLUSÃO .....	37
6 REFERÊNCIAS .....	38

## 1 INTRODUÇÃO

O nordeste brasileiro é uma região que vive em constante dificuldade em relação à disponibilidade hídrica, em especial no semiárido. O abastecimento hídrico depende, principalmente, da água armazenada em reservatórios superficiais. Essa dependência impulsionou o desenvolvimento de uma densa rede com estas estruturas de diferentes tamanhos variando de milhares a bilhões de metros cúbicos (MAMEDE et al., 2018). A pequena açudagem representa a maior parcela dos reservatórios superficiais, uma vez que foram construídos por políticos, agricultores e comunidades rurais com o intuito de garantir uma maior disponibilidade hídrica para a população.

A mobilidade dos sedimentos em bacias hidrográficas é um processo complexo que depende desde características de chuva e escoamento superficial até fatores relacionados a aspectos geomorfológicos da bacia, entre eles textura de solo, litologia, topografia, drenagem, cobertura vegetal e granulometria do sedimento, este último apontado como sendo um dos ou principal fator a afetar a dinâmica de sedimentos em bacias. A interferência desses fatores na mobilidade dos sedimentos indicará se estes serão depositados ou transportados pela bacia até o exutório.

Por conta da escassez de cobertura vegetal, áreas de clima árido são mais sensíveis aos processos erosivos, em geral, os eventos de precipitação são curtos e intensos enquanto a maior parte do ano apresenta períodos sem chuva. Assim sendo, dinâmica de sedimentos induzida pelo escoamento superficial, transporte pelos canais de drenagem e deposição em reservatórios constituem importantes problemas a serem considerados no manejo de áreas desse tipo de ambiente (BRONSTERT et al., 2014).

Para os recursos hídricos, a intensificação de processos sedimentológicos causam assoreamento de mananciais, perda da qualidade da água e conseqüentemente diminuição da vida útil do reservatório. O aporte de sedimentos em reservatórios superficiais ocorre da erosão do solo na bacia hidrográfica. No nordeste brasileiro, cerca de 90% da água utilizada para consumo humano são armazenadas nessas estruturas (ARAÚJO et al., 2003).

Considerando que haja uma semelhança de processos em regiões de geomorfologia similares e que esses processos são constantes através do tempo, os modelos se tornam ferramentas utilizáveis em detectar tendências regionais de dinâmica de

sedimentos, destacando reservatórios com potenciais riscos, causados pelo assoreamento. De acordo com Araújo et al. (2003), a taxa de assoreamento nos reservatórios do estado do Ceará é de 2% por década.

Segundo o Lopes (2013) os modelos hidrológicos são divididos em dois grandes grupos: modelos estocásticos e determinísticos. Os modelos estocásticos tratam os processos de forma estatística no tempo, e os resultados são apresentados em termos de probabilidade. Os modelos determinísticos ou conceituais representam o sistema físico natural, ou seja, os processos de ciclo hidrológico. Os modelos determinísticos por sua vez podem ser de base física ou empírica. Os modelos determinísticos também podem ser classificados em modelos semidistribuídos (nesse caso a variabilidade espacial dos processos é considerada) e concentrados (os processos são considerados de forma concentrada).

O modelo WASA-SED (Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with a Sediment Dynamics Component) é um modelo hidrossedimentológico, determinístico, físico, e semi-distribuído que simula o balanço hídrico e os processos de transporte de sedimentos em uma bacia (LOPES, 2013; MAMEDE, 2018).

Nesse sentido, uma avaliação precisa da dinâmica hidrossedimentológica é imprescindível para a identificação de áreas potencialmente erosivas, tal análise possibilita ao gestor, por exemplo, a adoção de medidas de prevenção e controle de regiões mais problemáticas.

### 1.1 Objetivo

O presente trabalho propõe estudar a modelagem de processos hidrossedimentológicos da bacia hidrográfica do açude Pereira de Miranda, conhecido como Pentecoste, aplicando o modelo WASA-SED.

Como objetivos específicos propõem-se:

- Simular a dinâmica de deposição de sedimentos na densa rede de reservatórios superficiais da bacia hidrográfica do açude Pentecoste;
- Avaliar diferentes configurações espaciais da rede de reservatórios superficiais e seus impactos na dinâmica de água e sedimento na bacia.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Processos hidrossedimentológicos em regiões semiáridas

A disponibilidade hídrica e o risco associado de falta de abastecimento de água são de grande preocupação na gestão dos recursos hídricos, especialmente em regiões semiáridas sujeitas a conflitos entre usos e usuários da água. A escassez de água geralmente está associada a eventos naturais extremos, como as secas, mas os processos antropogênicos também afetam sua disponibilidade (ARAÚJO et al., 2006).

Além disso, a irregularidade e/ou escassez de chuvas é acompanhada de uma elevada taxa de evapotranspiração (SILVA, 2015). O resultado disso são secas recorrentes, às vezes consecutivamente por vários anos, que produzem graves problemas socioeconômicos para a população. A água, necessária principalmente para irrigação, humana e usos animais, é vital para os agricultores e sua disponibilidade está em risco durante os períodos secos.

De acordo com Lopes (2013), a evapotranspiração é uma das características mais peculiaridades das regiões semiáridas. É uma componente chave do ciclo hidrológico, sendo responsável pela perda de mais de 80% da precipitação e mais de 95% no longo prazo.

Ainda de acordo com Lopes (2013), a capacidade de infiltração é geralmente baixa em ambientes semiáridos, pois o solo é compactado e coberto por uma crosta. A produção de escoamento ocorre quando a capacidade de infiltração do solo é superada pela intensidade da chuva. Na análise de Sousa et al. (2020), dos eventos pluviométricos registrados em uma bacia experimental do semiárido brasileiro, no intervalo de 2012 a 2016, somente 18% dos 158 eventos pluviométricos registrados causaram escoamento superficial e 15% causaram transporte de sedimentos. Para Santos et al. (2017), a umidade proveniente das precipitações antecedentes desempenha um papel importante na taxa de

produção de sedimentos, essa taxa de produção de sedimentos é maior nos casos em que os eventos de precipitação ocorrem em solos que já apresentam uma alta umidade antecedente.

A construção de uma barragem e a formação do seu reservatório normalmente modificam as condições naturais do curso d'água. Em relação ao aspecto sedimentológico, as barragens atenuam as velocidades da corrente provocando a deposição gradual dos sedimentos carregados pelo curso d'água, ocasionando o assoreamento, diminuindo gradativamente a capacidade de armazenamento do reservatório e podendo vir a inviabilizar a operação do aproveitamento, além de ocasionar problemas ambientais de diversas naturezas (CARVALHO et.al., 2000).

Todos os reservatórios formados através do barramento de cursos d'água são suscetíveis ao processo de assoreamento. Devido a este processo, parte do material, antes em suspensão, tende a se depositar, resultando no assoreamento do reservatório (MAIA; VILLELA, 2009). O assoreamento dos reservatórios afeta o atendimento de demandas como: geração de energia elétrica, abastecimento urbano e industrial, irrigação, navegação fluvial, pesca, assimilação de esgotos, dentre outros.

Os sedimentos que se depositam pela influência do reservatório se estendem de montante a jusante, não se distribuindo uniformemente mesmo dentro do lago. A deposição de montante se denomina depósito de remanso, em referência ao fenômeno hidráulico. As deposições dentro do reservatório são chamadas de delta, depósito de margem e depósito de leito. O delta se forma com sedimentos grossos, enquanto que os depósitos do interior, com sedimentos mais finos. As enchentes produzem outro tipo de deposição, ocorrendo ao longo do curso d'água e do reservatório, formada por sedimentos mais finos e grossos e que é denominado depósito de várzea ou depósito de planície de inundação (CARVALHO et al., 2000).

De acordo com Araújo (2003), a taxa de assoreamento médio determinada para alguns reservatórios cearenses foi de 1,8% por década. Lopes et al. (2015) realizaram a quantificação do assoreamento em um reservatório de águas superficiais no estado do Ceará. Foi encontrada uma produção média anual de sedimentos da ordem de  $5,22 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . De acordo com os autores houve uma redução na capacidade de acumulação do reservatório de  $1,03 \text{ hm}^3$  em um período de 60 anos.

## 2.2 Redes de Reservatórios Superficiais em regiões semiáridas

Para superar o problema da baixa disponibilidade de água natural e da alta demanda de água devido à densidade populacional, autoridades, proprietários de terras e comunidades construíram vários reservatórios de água, de uma ampla variedade de tamanhos, que permitem que a água armazenada durante o período chuvoso para ser utilizada durante a estação seca. A maioria dos reservatórios foram construídos de acordo com as necessidades locais da população, principalmente agricultores, sem um plano integrado. Este resultou em uma complexa rede de reservatórios densa, que é extremamente difícil de gerir (PETER et al., 2014). Mamede et al. (2009) consideram importante essa densa rede de reservatórios devido à espacialização dos recursos hídricos ao longo da bacia, como também pela retenção hídrica. Esta retenção hídrica, por um lado, permite uma melhor distribuição espacial dos recursos hídricos, favorecendo seu uso pelas comunidades próximas.

Araújo et al. (2010) avaliaram o impacto de uma densa rede de reservatórios na disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica (Bacia do Alto Jaguaribe) localizada no semiárido nordestino e verificaram que as densas redes de reservatórios são uma realidade no semiárido nordestino, foram destacados alguns impactos positivos e negativos na disponibilidade de água.

Ainda de acordo com Araújo et al. (2010), os principais impactos negativos dessa rede de reservatórios superficiais de alta densidade são a alta evaporação, uma vez que havendo uma área maior de superfície livre, mais moléculas conseguirão escapar para a atmosfera na forma de vapor. O que leva à redução da disponibilidade hídrica e a crescente complexidade do sistema de gestão. A rede de reservatórios de alta densidade também apresentou impactos positivos, entre eles a melhor distribuição dos recursos hídricos, permitindo que a população fosse beneficiada; outro ponto positivo destacado foi a retenção de sedimento, que resulta em uma menor taxa de assoreamento das barragens estratégicas.

Sousa et al. (2011) também destacam a contribuição positiva da densa rede de reservatórios, estes garantem uma redução significativa na quantidade de sedimentos que são responsáveis pela diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios estratégicos.

Segundo Mamede et al. (2018), um tamanho adequado do reservatório é crucial para um bom funcionamento da rede de reservatórios. Os reservatórios menores são tipicamente incapazes de fornecer água suficiente durante toda a estação seca, devido a baixa capacidade de armazenamento e altas perdas por evaporação e infiltração. Já os muito grandes apresentam problemas de sustentabilidade no longo prazo, pois a sua água pode não ser suficientemente renovada. Para além das propriedades dos reservatórios, é bastante importante a forma como estão interligados. Os reservatórios a montante podem reter uma parcela significativa da água coletada, possibilitando uma distribuição espacial eficiente, garantindo uma conexão contínua com outros reservatórios mesmo durante as estações secas.

Para uma boa gestão dos recursos hídricos é essencial minimizar os impactos negativos e ampliar os efeitos benéficos, pois a dependência desses reservatórios é elevada.

### 2.3 Modelagem hidrossedimentológica.

Conhecer e entender os processos hidrológicos e sedimentológicos que ocorrem, são as estratégias mais indicadas para um eficiente planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. Desta forma, faz-se necessário o uso de modelos hidrosedimentológicos. Segundo Aragão et al., (2012), a necessidade de prever os processos de escoamento superficial e da carga de sedimento devido a um evento ou eventos de chuva em uma dada bacia levou ao desenvolvimento de diversos modelos hidrológicos e hidrossedimentológicos.

De acordo com Santos et al. (2014), os modelos possibilitam a análise de cenários, sejam realistas ou hipotéticos, sem alto custo, tornando possível o estudo das diferentes respostas dos processos hidrológicos diante de cada condição. Com a evolução dos modelos, impulsionada pela intensificação de pesquisas e o aumento da sua aplicação nos últimos anos (LOPES, 2013), surgiram vários tipos de abordagens e a classificação deles depende do critério estabelecido.

Considerando os tipos de variáveis utilizados na modelagem, os modelos podem ser classificados como determinísticos ou estocásticos. Os modelos determinísticos são aqueles que produzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas, mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório, ou seja, os conceitos de probabilidade não são considerados durante a sua elaboração. No caso dos modelos

estocásticos o conceito de probabilidade é introduzido na sua formulação, de modo que as variáveis envolvidas na modelagem apresentam um comportamento aleatório, ou seja, em eventos de modelagem diferentes, uma mesma entrada pode produzir saídas diferentes segundo uma determinada distribuição de probabilidade.

De acordo com a relação entre as variáveis, os modelos podem ser conceituais ou empíricos. Nos modelos conceituais é considerado os conceitos físicos relacionados aos processos hidrológicos. Possuem uma maior complexidade em relação aos modelos empíricos, e geralmente requerem uma parametrização cuidadosa antes de serem executados. Já os modelos empíricos não contam com a representação explícita dos processos físicos da bacia, em outras palavras, utilizam funções que não apresentam relações com os processos físicos envolvidos e são baseados em análises estatísticas, como métodos de correlação e análise de regressão. São em geral, simples e normalmente são de uso específico para a região e condições para as quais as relações foram estimadas.

Segundo Santos (2009), os modelos conceituais podem ser divididos em dois subgrupos: físicos e semiconceituais. Os modelos físicos utilizam equações diferenciais do sistema físico para representar os processos e os seus parâmetros, ou seja, se aproximam muito da física do sistema. Uma característica importante desses modelos é que podem ser aplicados em bacias hidrográficas que não possuem dados observados. Já os modelos semiconceituais, apesar de estarem relacionados às características dos processos, mantêm um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas.

Considerando a existência ou não de relações espaciais, os modelos podem ser concentrados ou distribuídos. Nos modelos concentrados não considera a variabilidade espacial da bacia. A área da bacia é representada de forma homogênea, sem a possibilidade da distribuição das características físicas relacionados ao solo, à vegetação e à chuva. Já nos modelos distribuídos a área é dividida em unidades menores segundo um certo grau de homogeneidade, desse modo as variáveis e parâmetros variam no espaço. A escolha do intervalo de discretização depende basicamente do fenômeno a ser estudado, da disponibilidade dos dados e da precisão desejada.

Quanto à existência de dependência temporal, os modelos são divididos em estáticos e dinâmicos. Os modelos são estáticos quando, em um único passo, um conjunto de dados de entrada origina um resultado proveniente da solução das equações do modelo. Em um modelo dinâmico é necessário que ocorra uma sequência de iterações, onde o resultado uma iteração serve de entrada para a próxima iteração.



Com essa variedade de modelos, a escolha de um determinado tipo depende da aplicação desejada, disponibilidade de dados básicos, da variabilidade temporal e espacial das características físicas e climáticas da bacia em estudo, etc., ou seja, não existe um modelo único ou melhor, mas sim, modelos mais adequados para o problema que se deseja resolver.

Vários modelos orientados a processos (modelos de base física) foram desenvolvidos nas últimas décadas com complexidade crescente em termos de detalhes de representação dos processos. No entanto, poucos modelos hidrológicos e de erosão acoplados, seguindo uma abordagem orientada a processo, são aplicáveis à mesoescala (BRONSTERT et al., 2014).

Segundo Medeiros (2009) o principal dilema para a modelagem hidrossedimentológica de bacias hidrográficas consiste na escolha entre duas abordagens bastante distintas, com resultados também diferenciados: I. Modelos simples (empíricos, concentrados) capazes de indicar a produção de sedimentos total na escala de bacia, porém inadequados para a determinação de sua distribuição espacial; II. Modelos complexos (bases físicas, distribuídos) que permitem a previsão do padrão espacial da produção de sedimentos, simulando explicitamente as condições de transporte, mas que requerem uma grande quantidade de dados e apresentam incertezas quanto à simulação conjunta de diferentes processos e suas interações.

De acordo com Bronstert (2014) um sistema de modelagem para avaliação de mesoescala da dinâmica da água e dos sedimentos precisa ser de base física, incluir os principais fenômenos de conectividade e, por outro lado, apresentar um conceito de multi-escala para se aproximar das necessidades de aplicação de um sistema de modelagem de mesoescala e permitir uma integração e quantificação dos diferentes processos. O autor chama o tal sistema de "modelo de captação de mesoescala integrado". O modelo WASA-SED é um caso de um modelo concebido para atender tais características.

Existem, atualmente, vários modelos utilizados na representação dos processos hidrológicos e hidrossedimentológicos em ambientes semiáridos.

Modelo USLE - (Universal Soil Loss Equation) é um modelo empírico desenvolvido em 1954 por W. H. Wischmeier, D. D. Smith (1978) e outros com o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), Serviço de Pesquisa Agrícola (ARS), Serviço de Conservação do Solo (SCS) e Universidade de Purdue no final dos anos 1950. Foi projetado para prever perdas de solo em médio e longo prazo, com base em séries

históricas de precipitação, tipologia do solo, topografia, sistemas de cultivo e práticas de conservação do solo (SILVA, 2015).

O modelo USLE trabalha apenas com os fatores que regem os processos erosivos, de modo que não considera, de forma individualizada, os processos físicos envolvidos na erosão do solo, como o desprendimento e transporte de sedimentos (SIMÕES, 2019).

O modelo sofreu algumas alterações com o tempo, dando origem a derivados como o MUSLE (WILLIAMS, 1975), a USLE-M (KINELL & RISSEL, 1998), Dusle (FLACKE et al, 1990) e RUSLE (RENARD et al., 1991).

O modelo MUSLE (modified universal Soil Lose equation -Equação Universal de Perda de Solo Modificada) resultou da modificação feita por Williams (1975). Consegue prever a produção de sedimentos para aplicação em bacias hidrográficas, incluindo uma taxa de entrega. Além disso, o fator de energia da chuva foi substituída por um fator de energia de escoamento.

Modelo WASA-SED - o modelo hidrológico WASA (Water Availability in SemiArid environments) foi desenvolvido por Güntner (2002). Posteriormente foi adicionado o módulo de sedimentação. A versão atual WASA-SED é um modelo determinístico, espacialmente semi-distribuído, que simula os processos de escoamento pluviométrico e os processos de transporte de sedimentos na encosta, rio e reservatórios (MAMEDE. 2009).

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 Área de estudo

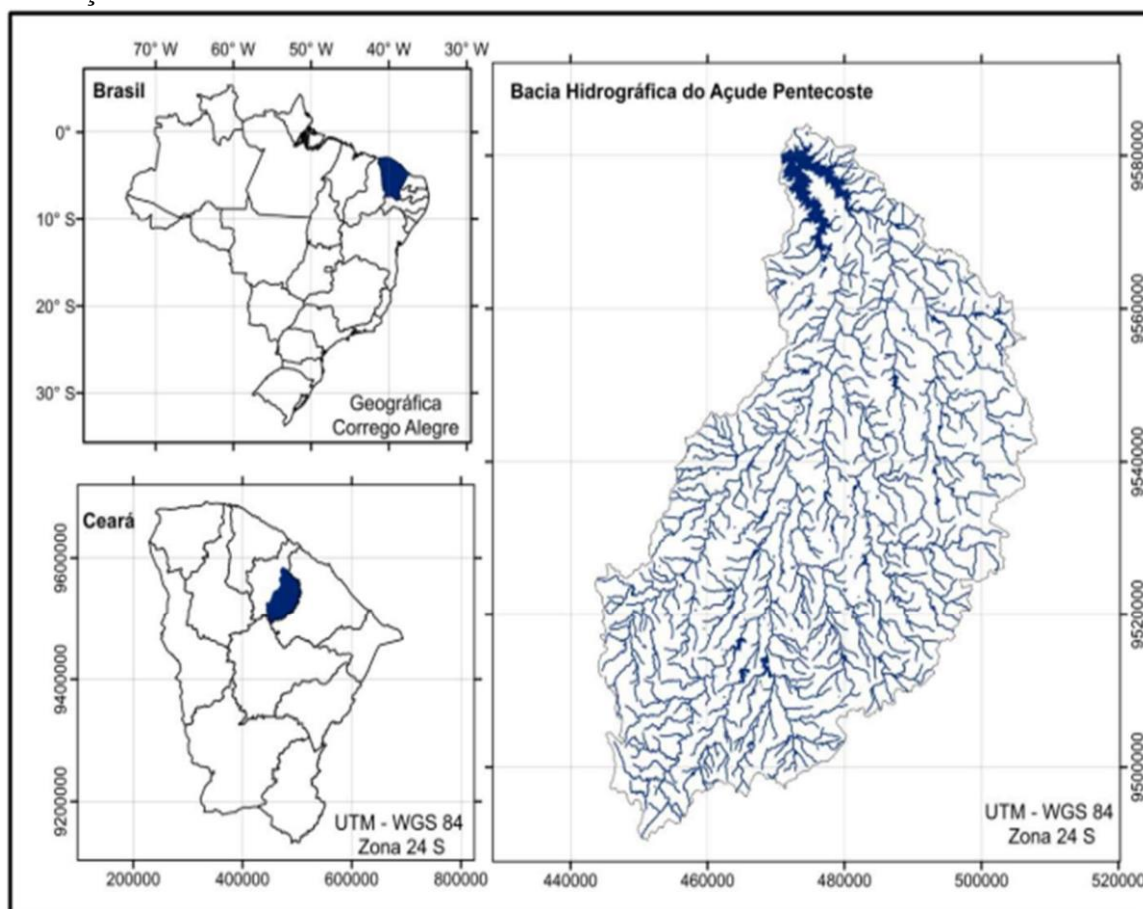
Com uma área aproximada de 3.230 km<sup>2</sup> (COGERH, 2021) (Figura 1), a bacia hidrográfica do Açude Pereira de Miranda - Pentecoste é uma sub-bacia localizada na bacia de Curu, na região centro norte do estado do Ceará. A sua rede de drenagem é composta pelos rios: Canindé, Capitão Mor, Juriti e Batoque; e os riachos: Aroeira, Bom Sucesso, Cachoeira, Cedro, Meio, Mel, Serrote, Macacos, Salgado, Seriema (IPIRANGA, 2016).

O açude Pereira Miranda foi construído em 1957 pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), a partir do barramento dos rios Canindé e Capitão Mor, com o objetivo de controlar as cheias, regularizar a vazão hídrica, promover irrigações a jusante, gerar energia elétrica, favorecer a piscicultura e reter a água para outros fins

(IPIRANGA, 2016). É o quinto maior reservatório artificial do estado do Ceará, sendo fundamental para o desenvolvimento e a manutenção da qualidade de vida regional.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948), é BSw'h', ou seja, semiárido com chuvas irregulares e com duas estações climáticas bem definidas (GOMES, 2016). A região apresenta índices pluviométricos médios anuais em torno de 800 mm, concentrado nos meses de janeiro a abril. Apresenta uma altitude média de 60 m, evaporação de 1436 mm por ano e a sua temperatura varia de 26 a 28 °C (FRANÇA et al. 2013).

Figura 1 – Hidrografia e localização da bacia hidrográfica do açude Pentecoste em relação ao Ceará e ao Brasil



Fonte: Lira (2012).

### 3.2 Modelo WASA-SED

O modelo WASA-SED (*Model of Water Availability in Semi-Arid Environments with Sediment Dynamics Component*) (GÜNTNER, 2002) é um modelo hidrossedimentológico desenvolvido para simular a geração de fluxo de água e sedimentos,

e a disponibilidade de água em grandes bacias hidrográficas em condições ambientais semiáridas.

No que se refere à resolução espacial, é categorizado como distribuído, ou seja, a região de estudo pode ser segmentada em áreas de menor extensão possibilitando que a variabilidade dos processos hidrológicos seja captada produzindo resultados de maior compatibilidade com a realidade observada. Entretanto, a variabilidade de áreas inseridas em uma escala espacial ainda mais reduzida não é retratada. Logo, o WASA é semi-distribuído e em determinadas escalas será um modelo agrupado. De acordo com Mueller et al. (2010) essas características dão ao modelo uma possibilidade de representar de forma detalhada as variáveis presentes na área de estudo e, ao mesmo tempo, ser aplicável para uma grande extensão espacial e temporal sem perder a eficiência computacional.

A resolução temporal do modelo é usualmente de um dia, entretanto, para estudos de menor escala, como eventos de tempestade, podem ser usadas escalas de tempo mais curtas (um mínimo de uma hora) (MAMEDE, 2008; GUNTNER, 2002).

De acordo com Mamede (2008), a estrutura espacial do modelo conta com três níveis conceituais: vertente, rede de drenagens e reservatórios superficiais.

### 3.2.1 Estrutura do modelo para a vertente

A vertente segue uma estrutura hierárquica que parte de uma unidade superior para a inferior (top-down) com cinco níveis espaciais. Objetivando a reprodução de carácter variável das propriedades da bacia como topografia, tipo de solo e cobertura vegetal ao longo da bacia e a influência dessa variabilidade na geração do escoamento (MEDEIROS, 2009).

No topo da hierarquia, a Sub-bacia, é definida como a unidade básica. Sua demarcação leva em conta localização dos grandes reservatórios (com a capacidade de armazenamento superior a  $50.10^6 \text{ m}^3$ ) e de convergência de grandes rios. Municípios com uma área definida poderão ser utilizados para substituir as sub-bacias na falta de maiores informações destas. A ordem de magnitude de tamanho das sub-bacias é de  $10^3 \text{ km}^2$ .

A estrutura seguinte no modelo é a Unidade hidrológica (*landscape unit* – LU): são delineadas dentro das sub-bacias baseadas na aplicação do conceito de SOTER( *soil and terrain digital data base*- FAO, 1993). Segundo esse conceito, características

geológicas, topográficas e pedológicas são os elementos básicos na estruturação da bacia. O volume gerado nas sub-bacias representa o somatório dos volumes produzidos nas unidades hidrológicas inseridas na sub-bacia.

No terceiro nível da hierarquia tem-se o Componente de Terreno (*Terrain componente* – TC) que é subdivisão de uma LU. Cada LU é composta por, no máximo, três TC's, podendo ser menor em caso de não haver uma diferença significativa em zonas topograficamente distintas dentro do LU. Os três TC's representam áreas elevadas (planaltos), regiões de declive (encostas) e vales ou depressões.

No quarto nível da hierarquia tem-se o Componente de solo e vegetação (*Soil-Vegetation component* – SVC) uma subdivisão dos componentes TC. Possuem uma combinação específica entre o tipo de solo e a classe de cobertura vegetal, a fim de representar a heterogeneidade da umidade do solo por essa associação solo-vegetação. Nesta escala se considera a redistribuição lateral do escoamento superficial e sub-superficial entre SVCs.

O último nível hierárquico é o Perfil de solo, é o menor componente espacial do modelo. Perfis representativos de solo em cada componente de solo e vegetação serão apresentados. O balanço hídrico considera fluxos verticais e horizontais para os distintos horizontes de solo. O número de horizontes de solo pode ser livremente escolhido e pode variar entre diferentes SVCs.

Resumidamente, as simulações do balanço hídrico são iniciadas no perfil do solo com as transferências de fluxo do escoamento contabilizadas até a maior escala da hierarquia, sub-bacia. Determinado o escoamento gerado na sub-bacia, este é inserido na rede de drenagem, sendo direcionado aos reservatórios superficiais.

Para o cálculo da geração de sedimentos, o modelo oferece quatro opções de equações derivadas da Equação Universal da Perda de Solos – USLE (Wischmeier e Smith, 1978), as quais apresentam a seguinte estrutura:

$$E = \chi.K.LS.C.P.ROKF.A \quad (1)$$

onde E é a erosão (t), K o fator de erodibilidade do solo ( $t.h.MJ^{-1}.mm^{-1}$ ), LS o fator de declive de comprimento, C o fator de manejo de vegetação e cultivo, P o fator de prática de controle de erosão, ROKF o fator de fragmentos de rocha e A é área do escopo (ha).  $\chi$  é o termo de energia.

Utilizou-se para este trabalho:

$$\text{MUSLE } \chi = 1,586(Q_{\text{surf}}q_p)^{0,56}A^{0,12} \quad (2)$$

Em que:  $Q_{\text{surf}}$  é o volume de escoamento superficial (mm) e  $q_p$  é a taxa de escoamento de pico ( $\text{mmh}^{-1}$ ).

Em comparação com a USLE original, essa abordagem incorpora o escoamento superficial  $Q_{\text{surf}}$  (calculado pelas rotinas hidrológicas) no cálculo do componente de energia. Constitui numa melhora de desempenho da modelagem de sedimentos pois elimina a necessidade de uma taxa de distribuição de sedimentos e já considera a umidade antecedente do solo (Neitsch et al., 2002).

### 3.2.2 Estrutura do modelo para redes de drenagens

A rede fluvial é a componente espacial que serve de ligação entre a encosta e o reservatório (MAMEDE, 2008). Consiste em trechos individuais de rios com seções transversais pré-definidas. Cada trecho está associado a uma sub-bacia, desse modo, cada trecho recebe os fluxos de água e sedimentos provenientes de uma sub-bacia e de outros trechos dos rios situados a montante. A seção transversal dos trechos é do formato aproximado de um trapézio (MUELLER et al., 2010). O seu módulo conta com uma abordagem espacialmente distribuída, que possibilita a simulação do transporte de água e sedimentos.

Para a simulação dos processos sedimentológicos, o WASA-SED possui módulos para o transporte da carga suspensa e para o transporte da carga do leito. O transporte de carga suspenso é modelado usando o conceito de capacidade de transporte, calculado como uma função da velocidade de pico do fluxo.

### 3.2.3 Estrutura do modelo para reservatórios

Para a descrição dos processos que ocorrem nos reservatórios, o modelo possui duas abordagens diferentes: uma abordagem simplificada desenvolvida por Güntner (2002) e uma abordagem detalhada desenvolvida por Mamede et al. (2006).

A abordagem simplificada separa os reservatórios em estratégicos e pequenos. São considerados reservatórios estratégicos, aqueles com porte grande e médio, que se encontram localizados nos principais rios na saída da sub-bacia. Para esses reservatórios, os saldos da água e sedimentos são calculados explicitamente no modelo. No caso dos reservatórios menores, eles são agrupados em classes de tamanho de acordo com a sua capacidade de armazenamento. A abordagem aplica um sistema de roteamento em cascata para descrever a posição das classes de reservatórios e a redistribuição do fluxo de água e sedimento entre as diferentes classes de reservatórios.

Na abordagem detalhada, o reservatório é dividido em dois componentes espaciais: o componente sub-alcance do rio e o componente sub-alcance do reservatório. Os limites entre os dois componentes espaciais são definidos tendo em conta a profundidade normal de cada seção transversal, sem considerar o preenchimento do reservatório. É considerada como profundidade normal a profundidade máxima da água para um fluxo uniforme, calculado pela fórmula de Manning. Se o valor da profundidade da seção do reservatório for menor que a profundidade normal, a seção é considerada pertencente a sub-alcance do rio, caso contrário a seção é considerada pertencente a sub-alcance do reservatório.

Para simular o transporte de sedimentos nos reservatórios, o modelo considera quatro aspectos: equilíbrio hídrico do reservatório, transferência hidráulica pelo reservatório, transporte de sedimentos no reservatório e mudanças de elevação do leito do reservatório (MAMEDE, 2008; MUELLER, 2010).

O modelo de sedimentação de reservatórios permite o cálculo de eficiência de aprisionamento do reservatório, o cálculo dos padrões de deposição de sedimentos, a simulação de várias opções de gestão de sedimentos do reservatório e o cálculo da expectativa de vida do reservatório.

### 3.3 Parametrização do modelo WASA-SED

Para o presente estudo, o modelo WASA-SED aplicado é a versão da parametrização proposta por Medeiros (2009) e modificada por Lima (2020). Medeiros (2009) usou o modelo para avaliar os efeitos da conectividade sobre a produção de sedimentos na bacia hidrográfica de meso-escala de açude Benguê. Lima (2020) aplicou essa versão para avaliar o comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica do Jaguaribe

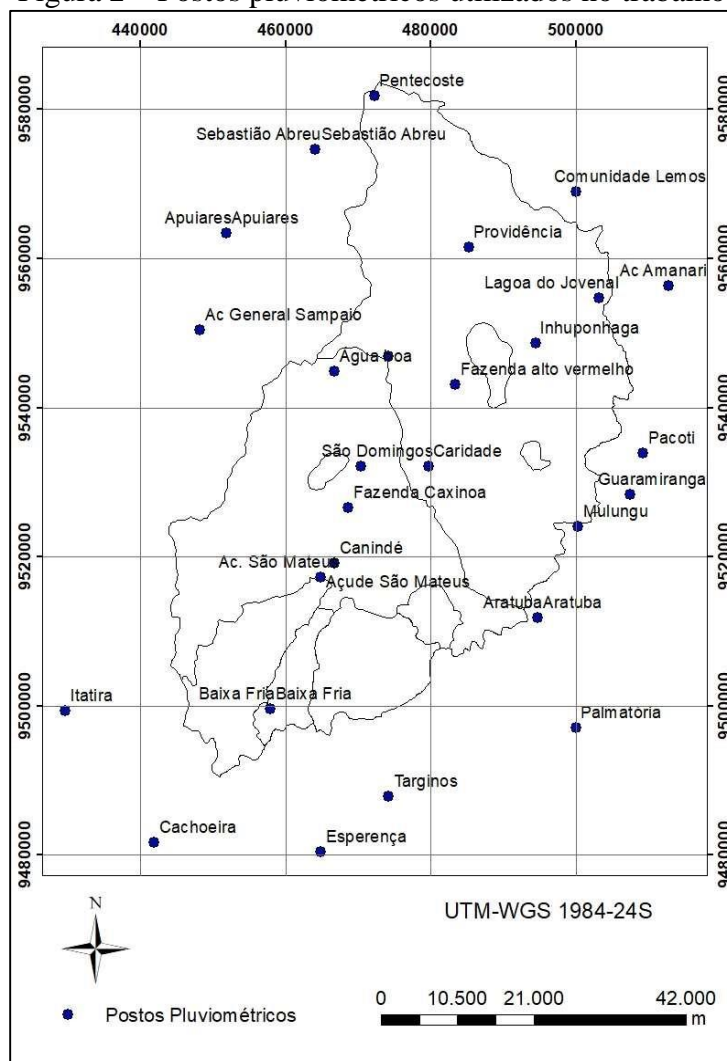
(BHJ) diante de diferentes cenários de utilização de sistemas hídricos. Pelo fato de o estudo realizado por Medeiros (2009) ser em macro escala, foi necessário ajustar alguns dados na parametrização inicial, possibilitando uma maior compatibilização entre os processos hidrológicos simulados e a área estudada. No presente trabalho a versão do modelo ajustado por Lima (2020) foi aplicado para a bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda, trocando os dados de entrada - séries temporais de precipitação, radiação, umidade e temperatura (em intervalo de tempo diário) e dados de solo e vegetação.

As séries históricas de precipitação foram obtidas a partir de dados de postos pluviométricos disponíveis no portal da FUNCEME. A figura 2 mostra os postos pluviométricos utilizados.

As séries históricas de radiação, temperatura e umidade estão disponíveis no portal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Os dados usados no trabalho são do posto de Quixeromobim. Nas datas em que faltaram dados monitorados, foram usados os dos postos mais próximos com dados disponíveis.



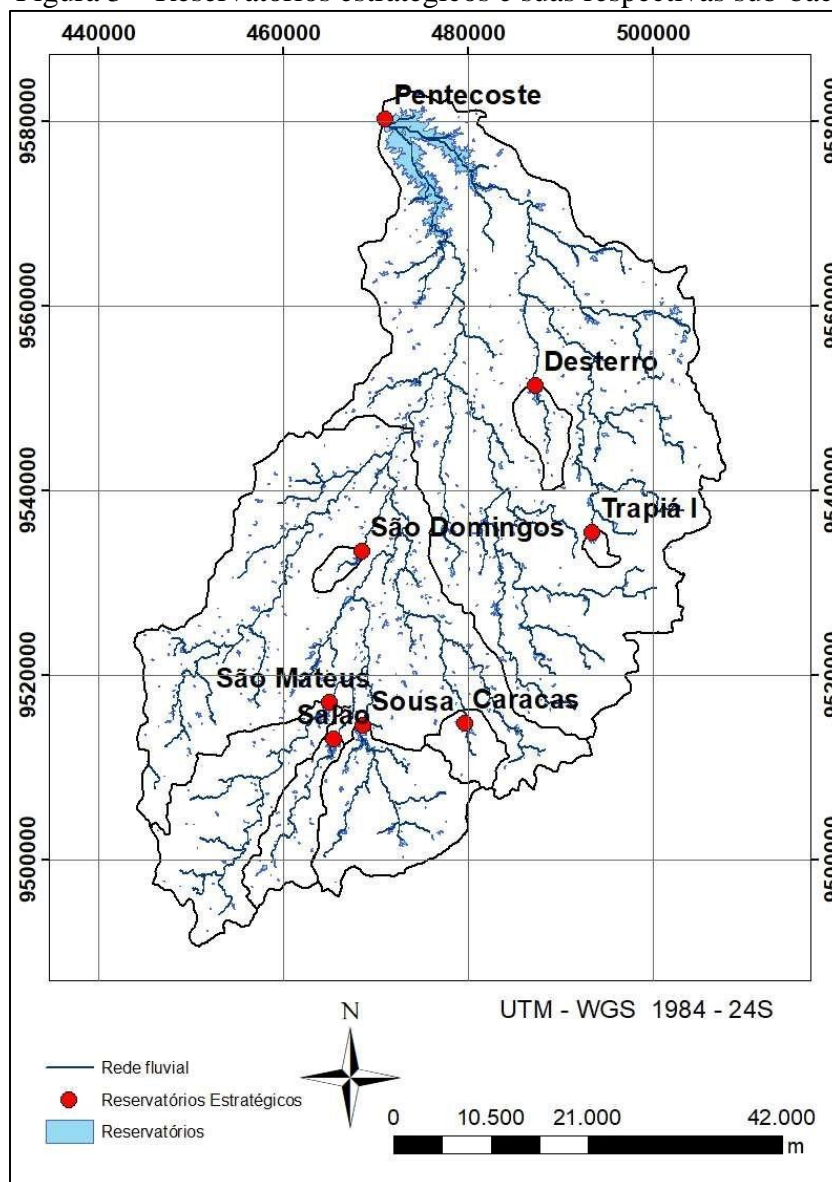
Figura 2 – Postos pluviométricos utilizados no trabalho.



Fonte: Lira (2012)

Como apresentado anteriormente, o modelo WASA-SED simula os processos hidrossedimentológicos que ocorrem nos reservatórios dividindo-os em duas classes: estratégicos e pequenos. A bacia hidrográfica do açude Pereira Miranda apresenta oito reservatórios estratégicos monitorados pela Companhia de Gestão e Recursos Hídricos (COGERH). São eles: Caracas, Desterro, Pentecoste, São Domingos, São Mateus, Salão, Sousa e Trapiá I. A figura 3 mostra a disposição desses reservatórios e suas respectivas sub-bacias.

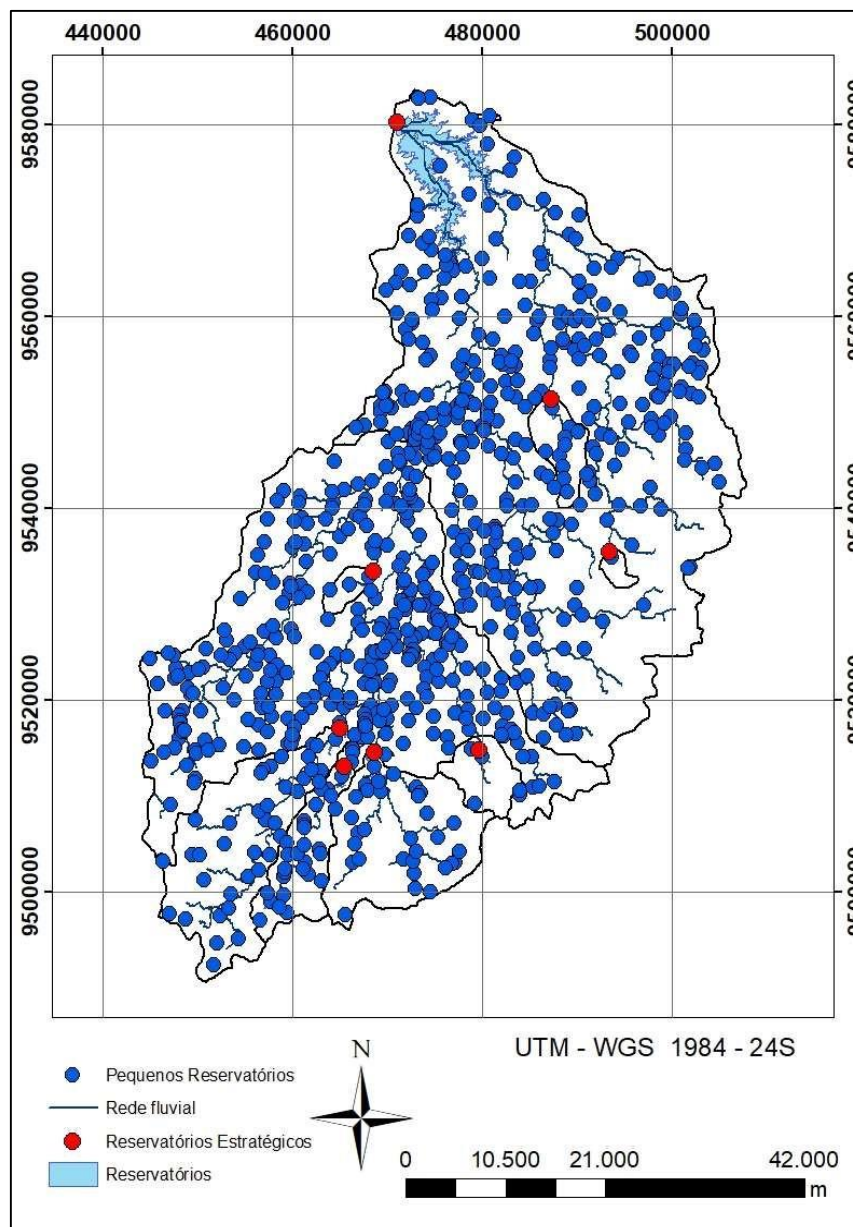
Figura 3 – Reservatórios estratégicos e suas respectivas sub-bacias.



Fonte: Lira (2012)

Os reservatórios de pequeno porte não são modelados a partir de suas características individuais. São incluídos em classes estabelecidas conforme o tamanho do reservatório. Os dados dos reservatórios de pequeno porte foram baseados no trabalho de Lira (2012), que fez levantamento de 733 reservatórios para o ano de 2004. A figura a seguir mostra a disposição dos reservatórios na bacia.

Figura 4 – Rede de reservatórios superficiais



Fonte: Lira (2012)

Para avaliar a capacidade do modelo na estimativa do volume dos reservatórios estratégicos, as simulações foram realizadas para o período entre 1980 e 2019. Dentre os oito reservatórios estratégicos foram selecionados seis (Desterro, Pentecoste, Salão, São Domingos, São Mateus e Sousa) para o balanço hídrico dos reservatórios. Os outros dois reservatórios não possuem dados de volume medido disponíveis.

O resultado da simulação foi comparado com dados históricos dos volumes de

armazenamento nos reservatórios obtidos junto ao Portal Hidrológico do Ceará mantido pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) (COGERH, 2021).

Para avaliar a eficiência do modelo, foi empregado o coeficiente Nash e Sutcliffe (NSE) (Eq. 3).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_j (Y_{med}^j - Y_{sim}^j)^2}{\sum_j (Y_{med}^j - \bar{Y}_{med})^2} \quad (3)$$

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 (LOPES, 2013).

#### 3.4 Calibração do Fator de escala (SF), no modelo.

O SF é um valor numérico que determina a condutividade hidráulica do solo, que por sua vez é uma das propriedades de maior relevância para estudos de movimento de água e solutos no solo. Sua determinação em laboratório e campo produz resultados com elevada dispersão, o que indica que esta propriedade é altamente variável. Depende dos demais atributos do solo, principalmente da densidade do solo, densidade de partículas, porosidade total, macro e microporosidade.

Por padrão do modelo, o valor do SF é 1,0. Foram feitas sucessivas simulações alterando os valores de SF na ordem de 0,1 unidades. Ele foi calibrado de forma que o NSE fosse maximizado para os resultados de volume de cada reservatório estratégico. A calibração foi feita inicialmente para as sub-bacias mais a montante. Quanto maior o valor de SF mais rápida será a condutividade hidráulica do solo, valores menores indicam uma condutividade mais lenta.

### 3.5 Definição de diferentes configurações da rede de reservatórios superficiais.

#### 3.5.1 Alteração nos limites dos agrupamentos de classes de reservatórios

Foram feitas 3 parametrizações com base nas capacidades dos açudes, conforme sumarizado nas Tabelas 1 a 3. Para cada parametrização foi proposta a divisão dos reservatórios em classes de acordo com sua capacidade de armazenamento hídrico, com o intuito de quantificar a disponibilidade hídrica de cada classe. A parametrização 1 segue a configuração de limites de classes estabelecidos com base em intervalos geométricos com razão 5, resultando em 5 classes que abrangem toda a faixa de capacidades da rede de pequenos reservatórios da bacia. A 2 consiste em admitir as classes propostas por Güntner (2002). A parametrização 3, por sua vez, considera os limites de classes estabelecidos na parametrização do modelo WASA-SED para o Estado do Ceará (Souza et al., 2013; Lima, 2020).

Tabela 1 – Classes de reservatórios para o Parametrização 1

Classe	Volume máximo (m <sup>3</sup> )	Número de reservatórios	Frequência (%)
1	5,000	319	44.0%
2	25,000	222	30.6%
3	125,000	123	17.0%
4	625,000	45	6.2%
5	3,125,000	16	2.2%
<b>Total</b>		<b>725</b>	<b>100.0%</b>

Tabela 2 – Classes de reservatórios para o Parametrização 2

Classe	Volume máximo (m <sup>3</sup> )	Número de reservatórios	Frequência (%)
1	100,000	653	90.1%
2	1,000,000	63	8.7%
3	3,000,000	9	1.2%
4	10,000,000	0	0.0%
5	50,000,000	0	0.0%
<b>Total</b>		<b>725</b>	<b>100.0%</b>

Tabela 3 – Classes de reservatórios para a Parametrização 3

Classe	Volume máximo (m <sup>3</sup> )	Número de reservatórios	Frequência (%)
1	102,179	655	90.3%
2	151,360	18	2.5%
3	265,735	16	2.2%
4	758,010	25	3.4%
5	87,579,753	11	1.5%
<b>Total</b>		<b>725</b>	<b>100.0%</b>

3.5.2 Alteração no quantitativo de reservatórios com eliminação de grupos de tamanhos distintos.

Além da delimitação de classes de volume de reservatórios, também foram feitas simulações excluindo classes com o intuito de perceber o impacto causado nos processos hidrossedimentológicos pela presença de reservatórios pequenos e estratégicos desconectando o transporte de sedimentos pela bacia.

Primeiro excluiu-se os reservatórios de classe 1, depois de classes 1 e 2, e assim sucessivamente até a simulação do modelo considerando apenas os reservatórios estratégicos. Também foi feita a simulação hipotética de não haver nenhum reservatório na bacia para verificação dos valores naturalizados de escoamento médio e carga de sedimentos na bacia.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Condutividade hidráulica do solo.

A tabela 4 indica os valores de condutividade hidráulica do solo encontrados. Os valores encontrados classificam a região com uma condutividade hidráulica de moderada a lenta.

Tabela 4 – Valores de SF

<b>Reservatório</b>	<b>SF</b>
São Domingos	2.9
Desterro	3.0
São Mateus	2.3
Salão	2.3
Sousa	0.1
Pentecoste	3.0

## 4.2 Análise de diferentes configurações da rede de reservatórios superficiais.

### 4.2.1 Alteração do limite das classes de tamanho de reservatórios

Para a análise do desempenho do modelo foram feitas comparações entre os valores encontrados na simulação e os medidos fornecidos pela COGERH para o período de 1980 a 2019. A análise da consistência dos resultados foi feita calculando os valores NSE para as três parametrizações consideradas.

A tabela 5 indica os valores de NSE encontrados a partir da modelagem e configuração de parametrização avaliadas. Os resultados indicam que independentemente da parametrização adotada o modelo se comporta de forma similar. Ou seja, os diferentes limites de classes adotadas na classificação dos pequenos reservatórios não indicaram alteração nos volumes dos reservatórios estratégicos.

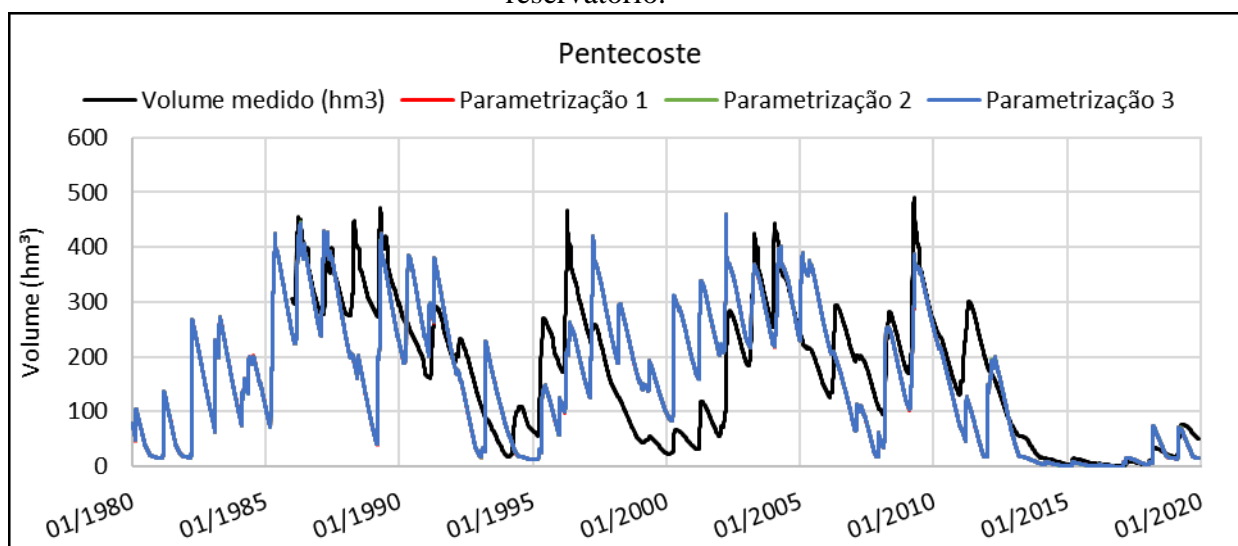
O fraco desempenho para os reservatórios Sousa e Salão pode estar relacionado aos dados de precipitação. Para o reservatório Sousa, o modelo superestima os valores de volume, não haviam dados disponíveis de algum posto situado dentro da sua bacia e os postos mais próximos não apresentam séries históricas de precipitação com um período superior a dez anos. Por isso, a área acabou recebendo dados de postos distantes. Para o reservatório Salão o modelo subestima o valor de volume modelado em relação aos dados medidos.

Tabela 5 – Valores de NSE para o volume de cada reservatório

<b>Reservatório</b>	<b>Parametrização 1</b>	<b>Parametrização 2</b>	<b>Parametrização 3</b>
Pentecoste	0.408	0.409	0.408
Sousa	-0.502	-0.510	-0.509
Salão	-0.225	-0.225	-0.206
São Mateus	0.211	0.211	0.211
Desterro	0.663	0.663	0.663
São Domingos	0.605	0.605	0.605

Os resultados de evolução de volume para as três parametrizações estão apresentados na Figura 5. Como se pode observar não há diferenças claras entre as configurações consideradas, destacando que o critério de definição dos limites das classes de reservatório não representa um aspecto interveniente dos processos hidrológicos na parametrização da bacia, conforme ilustrado para esta aplicação para a bacia hidrográfica do açude Pentecoste.

Figura 5 – Evolução de volumes no açude Pentecoste considerando as parametrizações da rede de reservatórios 1 a 3, quanto aos critérios de definição dos limites das classes de reservatório.



Fonte: Próprio autor

A tabela 6 apresenta valores de vazão afluente média e de volume armazenado na bacia para cada configuração considerada. Nota-se aqui também que a escolha de qualquer uma das parametrizações produziria os mesmos resultados.

Tabela 6 – Vazão afluente média e volume armazenado médio na bacia

Item	Parametrização 1	Parametrização 2	Parametrização 3
Vazão afluente média (m <sup>3</sup> /s)	5.752	5.754	5.757
Volume armazenado médio (hm <sup>3</sup> )	162.53	162.57	162.64

No que diz respeito à dinâmica de sedimentos, os resultados mostram a elevada eficiência da densa rede de reservatórios superficiais em reter sedimentos produzidos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste, com total de quase 50% considerando a rede



completa com os pequenos reservatórios e os estratégicos. Outro resultado importante de destacar é o papel do pequeno reservatório na retenção de mais de 27% dos sedimentos produzidos na bacia do Pentecoste. Apesar de pouco eficientes individualmente pelas maiores frequências de vertimentos, em conjunto eles são responsáveis por desconectar uma parcela significativa dos sedimentos produzidos, evitando que este material chegue nos reservatórios estratégicos, localizados a jusante, ampliando assim sua vida útil.

De acordo com Mamede et al. (2018), a existência de densas redes de reservatórios e o seu padrão de distribuição espacial exerce um impacto significativo no transporte de água e sedimentos. Isso corrobora com os resultados obtidos, onde apesar da fração pequena no volume de água armazenada na bacia, os reservatórios de pequeno porte demonstraram ter uma importante contribuição na retenção de sedimentos a montante.

A Figura 6 apresenta a evolução do decaimento da capacidade de armazenamento do açude Pentecoste como resultado da deposição de sedimentos, considerando as três parametrizações definidas com base no critério de estabelecimento dos limites das classes de tamanhos da rede de pequenos reservatórios. Os resultados reforçam a tese de que a escolha aleatória dos limites das classes de reservatório pouco influência nos resultados da modelagem dos processos hidrológicos e sedimentológicos com o modelo WASA-SED. O assoreamento foi estimado comparando-se os dados medidos de capacidade de armazenamento do açude Pentecoste em levantamentos topográficos/batimétricos realizados em períodos distintos e disponibilizados pela COGERH, com média 1,80% por década. Os valores encontrados na simulação estão representados na tabela 7. De acordo com Araújo (2003) que realizou uma estimativa do assoreamento em sete bacias hidrográficas com reservatórios representativos no estado de Ceará, a taxa média de produção de assoreamento é de 1,85% para cada década.

Figura 6 – Decaimento da capacidade de armazenamento no açude Pentecoste em virtude do assoreamento, considerando as Parametrizações 1 a 3

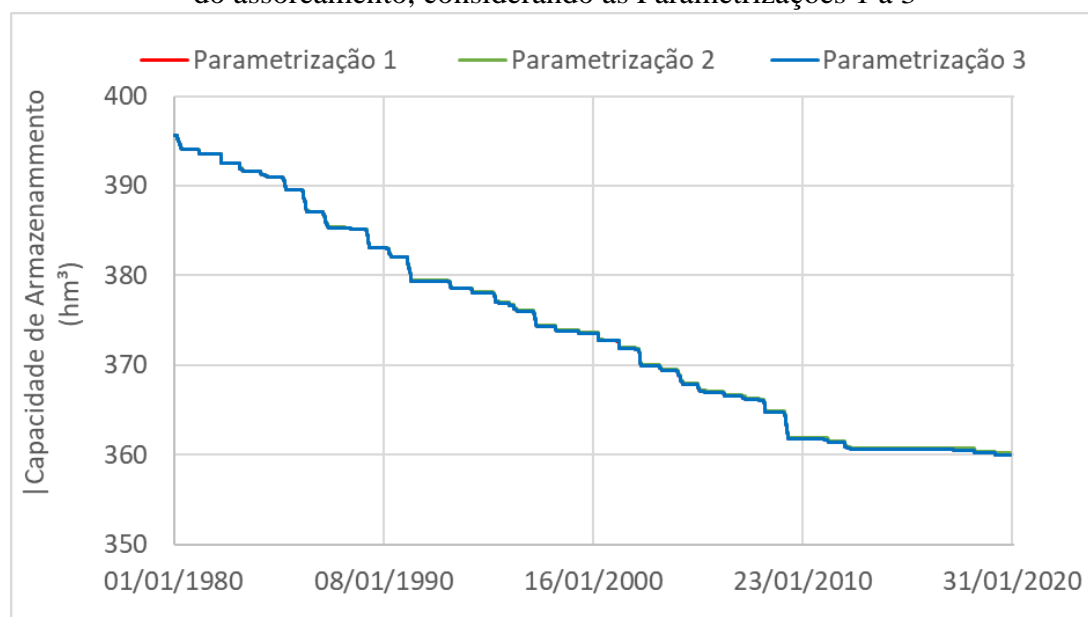


Tabela 7 – Assoreamento no açude Pentecoste

Item	Parametrização 1	Parametrização 2	Parametrização 3
Assoreamento (%/déc.)	2.25%	2.24%	2.30%

4.2.2 Alteração no quantitativo de reservatórios com eliminação de grupos de tamanhos distintos.

A tabela 8 apresenta a retenção de água e sedimentos na bacia do Pentecoste para cada classe de açude considerado. De toda a água retida nos reservatórios, 43,19% ficam nos de pequeno porte e 56,81% nos estratégicos. Com relação aos sedimentos, os pequenos reservatórios são responsáveis pela retenção de 54,4% enquanto os estratégicos retêm 45,6% dos sedimentos não vertidos.

Tabela 8 – Síntese dos resultados de retenção de água e sedimentos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste, considerando as diferentes configurações da rede de reservatórios com eliminação de algumas estruturas

Grupos de reservatórios	Retenção de água (%)	Retenção de sedimentos (%)	Retenção de água (m <sup>3</sup> /ano)	Retenção de sedimentos (ton/ano)
Classe 1	0,75%	1,29%	137.896	11.411
Classe 2	1,94%	2,87%	356.802	25.301
Classe 3	3,32%	4,95%	610.381	43.681
Classe 4	5,99%	6,81%	1.103.490	60.100
Classe 5	31,19%	38,48%	5.742.939	339.741
Pequenos reservatórios	43,19%	54,40%	7.951.509	480.234
Reservatórios estratégicos	56,81%	45,60%	10.460.025	402.612
<b>Total</b>	<b>100,00%</b>	<b>100,00%</b>	<b>18.411.533</b>	<b>882.846</b>

A tabela 9 apresenta o impacto de retenção de água e sedimentos, e escoamento médio da bacia para a Parametrização 1. Nota-se que os pequenos reservatórios, apesar de representarem 98,9% da rede (725 açudes), retêm 2,72% de toda a água que escoar pela bacia, enquanto os reservatórios estratégicos com apenas oito açudes retêm 4,07% (quase 50% a mais que os pequenos açudes da rede). Enquanto os mesmos retêm 27,18% de sedimentos, de forma que desempenham um papel importante na vida útil dos reservatórios estratégicos uma vez que retardam os efeitos do assoreamento nestes.

Os resultados também indicam que a densa rede de reservatórios tem uma baixa capacidade de retenção de água, com máxima de 8,33% do escoamento gerado considerando todos os reservatórios da rede, o que pode ser explicado pela elevada conectividade dos fluxos que ocorrem nos grandes eventos de escoamento com vertimentos em cascata.

Tabela 9 – Síntese dos resultados de escoamento e produção de sedimentos na bacia hidrográfica do açude Pentecoste, considerando as diferentes configurações da rede de reservatórios com eliminação de algumas estruturas

	Retenção de água na rede de reservatórios (%)	Retenção de sedimentos na rede de reservatórios (%)	Carga de sedimentos média no exultório (ton/ano)	Escoamento médio gerado na bacia (m <sup>3</sup> /ano)
Todos os reservatórios (pequenos e estratégicos)	8.33%	48.56%	968,811	171,066,138
Sem pequenos reservatórios de classe 1	8.25%	47.95%	980,222	171,204,034
Sem pequenos reservatórios de classe 1 e 2	8.06%	46.61%	1,005,523	171,560,836
Sem pequenos reservatórios de classe 1 a 3	7.73%	44.29%	1,049,204	172,171,217
Sem pequenos reservatórios de classe 1 a 4	7.14%	41.10%	1,109,304	173,274,707
Somente reservatórios estratégicos	4.07%	23.06%	1,449,045	179,017,646
Somente pequenos reservatórios	2.72%	27.18%	1,371,423	181,526,162
Sem nenhum reservatório (pequeno ou estratégico)	-	-	1,883,395	186,603,629

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos na presente pesquisa, destacam-se as seguintes conclusões:

- Mesmo sendo parametrizado para a escala macro e validado para uma outra bacia, modelo teve um bom desempenho da representação dos processos hidrológicos na bacia estudada.
- A definição de intervalos para classes de tamanhos de reservatórios de pequeno porte não apresentou diferenças para os resultados de volume e produção de sedimentos modelados.
- Apesar de contribuírem muito pouco para a retenção de água a montante, os reservatórios de pequeno porte são importantes na retenção de sedimentos. No presente estudo o total acumulado nos reservatórios menores é maior que o acumulado nos estratégicos.
- Os pequenos reservatórios, apesar de representarem 98,9% da rede (725 açudes), retêm 2,72% de toda a água que escoia pela bacia, enquanto os reservatórios estratégicos com apenas oito açudes retêm 4,07% (quase 50% a mais que os pequenos açudes da rede).
- Os pequenos reservatórios retêm mais de 27% dos sedimentos produzidos na bacia do Pentecoste.
- Os reservatórios estratégicos e os pequenos, juntos, desempenham um papel importante na retenção de sedimentos a montante, reduzindo a carga que acumularia no Açude Pentecoste.
- A taxa de assoreamento por década produzido pelo modelo varia de 2,24% a 2,30%, valores maiores que o 1,80% medido.

## 6 REFERÊNCIAS

ANA. **Práticas mecânicas de conservação de água no solo: Erosão hídrica**, Unidade 1. Disponível em: <https://capacitacao.ana.gov.br/conhecerh/handle/ana/62>. Acesso em: 20 de jan. 2021.

ARAGÃO, R., SANTANA, G.R., COSTA, C.E, CRUZ, M.A., FIGUEIREDO, E.F., SRINIVASAM, V. **Chuvas Intensas para o estado de Sergipe com base em dados desagregados de chuva diária**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v 17, n. 3, pg.243-252, 2012.

ARAÚJO, J. C.; LIMA NETO, I. E.; WIEGAND, M. C. ; MALVEIRA, V. T. C. . **Impact of a dense reservoir network on water availability in the semiarid north-eastern Brazil**. In: Hydropredict 2010, 2010, Praga. Proceedings. Wallingford : IAHS, 2010. v. 1.

ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. **Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil**, Hydrological Sciences Journal, 51:1, 157-170, DOI: 10.1623/hysj.51.1.157 (2006)

ARAÚJO J. C. **Assoreamento em Reservatórios do Semi-árido: Modelagem e Validação**. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 8, n.2, p. 39–56 Abr./Jun. 2003.

BRONSTART et al. **Process-based modelling of erosion, sediment transport and reservoir siltation in mesoscale semi-arid catchments**. Journal of Soils and Sediments. p. , 2014.

CARVALHO, N.O; FILIZOLA JÚNIOR, N.P; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. **Guia de avaliação de assoreamento de reservatórios**. Brasília: ANEEL. 2000. 140p.

FLACKE, K. W.; AUERSWALD, F. K.; NEUFANG, M. L. **Combining a Modified Universal Soil Loss Equation with a Digital Terrain Model for Computing High Resolution Maps of Soil Loss Resulting from Rain Wash**. CATENA, Vol. 17, p. 383-397, 1990.

FRANÇA et al. **Comportamento das variáveis qualitativas do açude pereira de miranda – pentecoste/ce, no período de estiagem**. Geociências, UNESP, São Paulo, v. 32, n. 4, p.586-599, 2013.

GODIM, J. et al. **A seca atual no Semiárido nordestino – Impactos sobre os recursos hídricos**. Parc. Estrat, Brasília, DF, v. 22, n. 44, p. 277-300, jan./jun. 2017.

GOMES F.E.F. **Processos hidrossedimentológicos em uma bacia experimental do semiárido brasileiro** . Dissertação (mestrado em engenharia agrícola) - departamento de engenharia agrícola, Universidade Federal do Ceará, 2016.

GUIRRO, M. O. **Avaliação da aplicabilidade do modelo geowepp na bacia hidrográfica do rio cunha, município rio dos cedros (SC)**. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade federal do Rio Grande do Sul, 2018.

GÜNTNER, A. et al. **Simple water balance modelling of surface reservoir systems in a large data-scarce semiarid region.** Hydrological Sciences Journal/Journal des Sciences Hydrologiques. p. 901–918 , 2004.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modelling in the semi-arid North-East of Brazil.** Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculty of Mathematics and Sciences, University of Potsdam, Potsdam, 2002.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. **Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas.** Journal of Hydrology, v. 297, n. 1–4, p. 136–161, 2004.

IPIRANGA P.C. **Nutriente em sedimentos e qualidade da água em açude do semiárido brasileiro.** Monografia (Graduação em Ciências Ambientais) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, 2016.

KINNELL, P. I. A. **The USLE-M and Modeling Erosion With in Catchments.** USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, selected papers from the 10th international soil conservation organization meeting held, p. 924-928, 1999.

LIMA, T.B.R. **Resposta hidrológica de uma grande bacia hidrográfica no semiárido brasileiro diante de cenários de transposição hídrica e racionalização do uso de reservatórios não estratégicos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento De Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2020.

LIRA, C.D.L. **Assoreamento em densas redes de reservatórios: o caso da bacia hidrográfica da barragem Pereira de Miranda, CE.** (2012). Dissertação (Mestrado em engenharia agrícola) – Departamento De Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Ceará, Fortaleza, 2012.

LOPES, J. W. B. **Modelagem Hidrossedimentológica em Meso-Bacia do Semiárido.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

LOPES, J. W. B.; NETO, J. R. A.; RODRIGUES, E. A. **Produção de sedimentos e assoreamento em reservatório no semiárido: o caso do açude marengo, Ceará.** Geoambiente online: Revista eletrônica do curso de geografia. UFG/REJ. Jataí,| n.24, Jan./Jun. 2015.

LOPES, J.W.B.; PINHEIRO, E.A.R. **Análise temporal da conectividade e da Capacidade de transporte potencial de sedimentos em meso-bacia semiárida, CE, Brasil.** Revista Agro@mbiente On-line, Boa Vista, v. 7, n. 2, p. 136-144, mai./ago. 2013.

LOVE, D. et al. **Rainfall – interception – evaporation – runoff relationships in a semi-arid catchment, northern Limpopo basin, Zimbabwe.** Hydrological Sciences Journal, v. 55, n. 5, p. 687-703, 2010.

MAGALHÃES P.B. **Qualidade da água subsuperficial e de fundo no cultivo de tilápia em tanques-rede na fazenda campo grande** (Açude Pereira de Miranda, Pentecoste, Ceará. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Pesca) – Departamento de engenharia de pesca, Universidade Federal de Ceará, 2013.

MAIA, A. G; VILLELA S. M. **Análise do assoreamento do reservatório de Promissão através do modelo RESSASS**. *Ambiência - Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais* V. 5 N. 2 Maio/Ago. 2009.

MALVEIRA, V. T. C. **Pequena açudagem e sustentabilidade hidrológica em grandes bacias semi-áridas: estudo de caso da bacia do Orós**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE, G. L. **Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management**. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) – Faculty of Mathematics and Sciences, University of Potsdam, Potsdam, 2008.

MAMEDE, G.L. et al. **Overspill avalanching in a dense reservoir network**. *PNAS*. vol. 109, no. 19, p. 7191–7195, mai. 2012.

MAMEDE, G. L. et al. **Modeling the Effect of Multiple Reservoirs on Water and Sediment Dynamics in a Semiarid Catchment in Brazil**. *J. Hydrol. Eng.*, v. 23, n.12. 2018.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, J. C. ; MEDEIROS, P. H. A. **Modelagem hidrossedimentológica de pequenos reservatórios da bacia hidrográfica do Benguê**. In: Carlos Nobuyoshi Ide; Luiz Augusto Araújo do Val; Maria Lúcia Ribeiro. (Org.). *Produção de sedimentos e seus impactos ambientais, sociais e econômicos*. Campo Grande: Editora Oeste, 2009, v., p. 393-410.

MARCELINO, L. **Transporte de sedimentos em suspensão nos rios catarinenses**. Monografia (Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Centro tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

MEDEIROS, P. H. A. et al. **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, jun./dec. 2019.

MEDEIROS, P. H. A. **Processos hidrossedimentológicos e conectividade em bacia**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, 2009.

MONTE-MOR, R. C. A. **Análise De Processos Hidrológicos Em Bacias De Rios Intermitentes No Semiárido Mineiro**. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.



MUELLER, E. N. et al. **Model Development Modelling sediment export, retention and reservoir sedimentation in drylands with the WASA-SED model.** Geosci. Model Dev, v. 3, p. 275–291, 2010.

NASCIMENTO, A.T.P.; MACAMBIRA, A.G.; MEDEIROS, P.H.A. **Efeito da rede de reservatórios sobre a energia Hidráulica acumulada em bacia hidrográfica de Meso-escala no semiárido brasileiro.** Conex. Ci. e Tecnol. Fortaleza, v. 10, n. 5, p. 49-56, dez. 2016.

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

NEITSCH, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. and Williams, J.R. **Soil and Water Assessment Tool: Theoretical Documentation—Version 2009.**

PEIXOTO, R. A. L. **Estudo do transporte de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Jordão – upgrh-pn 1.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

PETER ET AL., **Flood avalanches in a semiarid basin with a dense reservoir network.** Journal of Hydrology 512 P. 408–420. (2014).

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

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; PORTER, J.P. **RUSLE: Revised Universal Soil Loss.** Journal of Soil and Water Conservation, v.46, n.1, p 30-33. 1991.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. **Conceitos Básicos de Modelagem hidrológica.** Disponível em: <[http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2\\_modelos\\_hidrologicos.pdf](http://www.dpi.inpe.br/cursos/tutoriais/modelagem/cap2_modelos_hidrologicos.pdf)>.

Acesso em: 30 nov. 2020.

SANTOS, F.A. et al. **Estimativa e análise do volume dos pequenos açudes através de imagem de satélite e levantamento de campo na bacia hidrográfica do açude Sumé.** XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. 2009.

SANTOS, J. C. N. **Taxa de entrega de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica semiárida sob condições de baixa conectividade.** Revista Ciência Agronômica, Fortaleza, v. 48, n. 1, p. 49-58, jan./mar. 2017.

SANTOS, L. L. DOS. **Modelos Hidrológicos: Conceitos e Aplicações.** RBGF- Revista Brasileira de Geografia Física, v. 2, p. 1–19, 2009.

SILVA JR, Valdemir P et al. **Produção de água e sedimentos em bacia representativa do semiárido pernambucano.** Rev. bras. eng. agríc. ambient. Campina Grande , v. 15, n. 10, p. 1073-1081, Oct. 2011 .

SILVA R.M.; SANTOS C.A.G. **Influência da cobertura vegetal nos processos hidrossedimentológicos no semiárido do Nordeste, Brasil.** ISSN 1808-866x unioeste geografia, vol. 1 e 2, n. 5, p. 113 – 125, mar./ago. 2009.

SILVA, D. S. D. S. **Modelos empíricos para estimativa de produção de sedimentos.** Dissertação (Concentração em Engenharia Hídrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Pará, Belém, 2015.

SILVA, J. R. L. **Investigação da dinâmica dos processos hidrológicos e sedimentológicos em escala de parcela no semiárido de pernambuco.** Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural De Pernambuco, Recife, 2015.

SIMÕES, Kauem. **Modelagem hidrossedimentológica da bacia do rio indaiá, alto são francisco – MG, utilizando SWAT.** (2019)

SOUSA M. M. M. et al. **Determinant pluviometric characteristics of sediment transport in a catchment with thinned vegetation in the tropical semiarid** l. Rev. Caatinga, Mossoró, vol. 33, n. 3, p. 785 – 793, jul./ set. 2020.

SOUZA, A. B. et al. **Geração automatizada de dados de entrada para o Modelo wasa-sed.** Associação Brasileira de Recursos Hídricos. 2013.

SRINIVASAN, V. S.; SANTOS, C.A.G.; GALVÃO, C. O. **Erosão Hídrica do Solo no Semiárido Brasileiro: A Experiência na Bacia Experimental de Sumé.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 8, n.2, p. 57–73. abr./jun. 2003.

WILLIAMS, J.R. **Sediment-yield Prediction with Universal Equation Using Runoff Energy Factor.** In: Present and Prospective Technology for Predicting Sediment Yield and Sources. Publication ARS-S-40. US Department of Agriculture: Washington, DC. 1975