



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

**JOÃO DA SILVA CAVALCANTE**

**APLICAÇÃO DO SWMM PARA MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA DE  
UMA BACIA LITORÂNEA NO ESTADO DO CEARÁ**

**FORTALEZA**  
**2021**

JOÃO DA SILVA CAVALCANTE

APLICAÇÃO DO SWMM PARA MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA DE  
UMA BACIA LITORÂNEA NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto  
Coorientador: Dr. Silvano Porto Pereira.

FORTALEZA

2021

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

---

C364a Cavalcante, João da Silva.  
Aplicação do SWMM para modelagem hidrológico-hidráulica de uma bacia litorânea no estado do Ceará / João da Silva Cavalcante. – 2021.  
46 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Ambiental, Fortaleza, 2021.  
Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.  
Coorientação: Prof. Dr. Silvano Porto Pereira.

1. Lagoa de Jijoca. 2. Macrodrenagem. 3. SIG. 4. Imagem orbital. I. Título.

CDD 628

---

JOÃO DA SILVA CAVALCANTE

APLICAÇÃO DO SWMM PARA MODELAGEM HIDROLÓGICO-HIDRÁULICA DE  
UMA BACIA LITORÂNEA NO ESTADO DO CEARÁ

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Samiria Maria Oliveira da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Silvano Porto Pereira  
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

A Deus.

Aos meus pais, José Pinto Cavalcante e Ana  
Cheila da Silva Pereira.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, por suas bênçãos sem medidas e por nunca ter me deixado só.

À meu pai, pelos ensinamentos e apoio incondicional que me permitiram seguir na jornada universitária com foco exclusivo.

À minha mãe por ter transmitido o amor pelos números e pelo exemplo de força e resiliência perante as adversidades.

À minha tia, Ana Altina, pelos cuidados, carinho e motivação na vida.

À CAGECE pelo conhecimento proporcionado durante a elaboração do trabalho e ao longo de todo o programa de estágio. Em especial a Gerência de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação pela contribuição que cada um forneceu tanto pessoal como profissionalmente.

Ao Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto por quem tenho grande admiração, pela excelente orientação, dedicação, conselhos e compreensão durante a elaboração deste trabalho.

Aos professores participantes da banca examinadora Samiria Maria Oliveira da Silva e Silvano Porto Pereira, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos professores que fizeram parte da graduação, em especial a Natália Maria e Cely Martins, com quem pude ter a oportunidade de ser monitor.

Aos colegas do PET Engenharia Ambiental e a então tutora professora Ana Bárbara, pelos 2 anos de muita experiência e de crescimento pessoal e profissional.

À minha namorada, Yanna Lopes pelo companheirismo e força que foram fundamentais diante dos desafios.

Aos colegas da turma de graduação, em especial Marcelo Ferreira, João Victor, Júlio Claudino, Eduardo Costa e Dante Guerra, irmãos que a academia me presenteou.

“A matemática, vista corretamente, possui não apenas verdade, mas também suprema beleza [...]”

(BERTRAND RUSSELL)

## RESUMO

A Lagoa de Jijoca, a 290 km de Fortaleza, é uma área estratégica de turismo na região do Noroeste Cearense no Litoral de Camocim e Acaraú, entre os municípios de Jijoca de Jericoacoara e Cruz, além de estar inserida no Parque Nacional de Jericoacoara. Desta forma, ferramentas para auxiliar no gerenciamento de seus recursos hídricos são de extrema relevância. Neste cenário, o presente trabalho se propõe a elaborar um modelo hidrológico-hidráulico no SWMM da bacia da lagoa de Jijoca, delimitando a macrodrenagem e suas sub-bacias, estimando os parâmetros de infiltração e escoamento, a partir de uma classificação supervisionada de imagem do satélite Landsat-8 para o uso e ocupação do solo, desenvolvida com ferramenta SIG. Estimou-se as características físicas da lagoa através de MDE, gerando gráfico área-cota. A precipitação aplicada foi uma série temporal de reanálise horária do ERA5 para 30 anos (1990 a 2019). A validação do modelo se deu por meio de análise histórica das imagens do *Google Earth*, convertendo a área de espelho d'água da lagoa em cota equivalente do nível d'água, e comparando aos valores modelados no mesmo período. Os resultados da modelagem apontam que a lagoa apresenta perdas por infiltração da mesma ordem de grandeza da evaporação, indicando a importância de se avaliar esse parâmetro em pequenos reservatórios. O modelo, após calibração, apresentou coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.28, ao avaliar o período de dez anos (2010 a 2019), contemplando as estações chuvosa e seca, do comportamento do nível d'água na lagoa, atestando que o modelo se mostrou um melhor preditor, se comparado com a utilização da média das observações estimadas do *Google Earth* no mesmo período. Desse modo, os resultados obtidos indicam que o modelo proposto tem potencial de auxiliar na gestão dos recursos hídricos da região, simulação de cenários em que haja variabilidades climáticas ou modificações no uso do solo, e demais alterações hidrológicas ou hidráulicas.

**Palavras-chave:** Lagoa de Jijoca; SWMM; modelo hidrológico-hidráulico.



## ABSTRACT

Lagoa de Jijoca, 290 km from Fortaleza, is a strategic area for tourism in the northwest region of Ceará on the coats of Camocim and Acaraú, between the municipalities of Jijoca de Jericoacoara and Cruz, and it's part of the Jericoacoara National Park. Thus, tools to help in the management of it's water resources are extremely relevant. In this scenario, the present work proposes to elaborate a hydrological-hydraulic model in the SWMM of the Jijoca lagoon basin, delimiting the macro-drainage and its sub-basins, estimating the infiltration and runoff parameters, from a supervised image classification of the Landsat-8 satellite for land use and occupation, developed with a GIS tool. The physical characteristics of the lake were estimated through MDE, generating an area-height plot. The applied precipitation was a time series of hourly reanalysis of the ERA5 for 30 years (1990 to 2019). The model was validated through the historical analysis of Google Earth images, converting the lake's surface area into an equivalent water level, and comparing the values modeled in the same period. The modeling results indicate that the lake presents infiltration losses of the same order of magnitude as evaporation, indicating the importance of evaluating this parameter in small reservoirs. The model, after calibration, presented a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.28, when evaluating the ten-year period (2010 to 2019), considering the rainy and dry seasons, the behavior of the water level in the lake, attesting that the model is a better predictor when compared to using the average of the estimated observations from Google Earth in the same period. Thus, the results obtained indicate that the proposed model has the potential to assist in the management of water resources in the region, simulation of scenarios in which there is climate variability or changes in land use, and other hydrological or hydraulic changes.

**Keywords:** Lagoa de Jijoca; SWMM; hydrological-hydraulic model.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comportamento das águas pluviais pré-urbanização (a) e pós-urbanização (b) .....	17
Figura 2 – Simplificações da equação de Saint Venant para quantidade de movimento.....	20
Figura 3 – Fluxograma da metodologia aplicada .....	22
Figura 4 – Localização da área de estudo .....	23
Figura 5 – Hidrografia e sub-bacias geradas com o BASINS .....	24
Figura 6 – Distribuição das classes de uso e cobertura do solo de Jijoca de Jericoacoara.....	27
Figura 7 – Comparativo dos córregos da bacia da Lagoa de Jijoca, IBGE e BASINS .....	31
Figura 8 – Curvas de nível da Lagoa de Jijoca .....	32
Figura 9 – Perfil do reservatório (cota-área) .....	32
Figura 10 – Classificação do uso do solo .....	33
Figura 11 – Série de precipitação e evaporação .....	36
Figura 12 – Modelo SWMM, detalhes dos ajustes .....	37

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Distribuição da ocupação do solo na bacia .....	34
Gráfico 2 – Série de precipitação e evaporação .....	36
Gráfico 3 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = -0,66) .....	39
Gráfico 4 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = 0,26) .....	40
Gráfico 5 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = 0,28) .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cotas e áreas equivalentes da Lagoa .....	25
Tabela 2 – CN por tipo de uso do solo .....	28
Tabela 3 – Evaporação mensal diária .....	29
Tabela 4 – Síntese de parâmetros ajustados das sub-bacias .....	35
Tabela 5 – Dados históricos observados e estimado no Google Earth .....	38
Tabela 6 – Parâmetros do solo e NSE verificados na Lagoa de Jijoca .....	41

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
APA	Área de Proteção Ambiental
BASINS	Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources
CN	Curva-Número
ECMWF	Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
MDE	Modelo Digital de Elevação
NRCS	National Resources Conservation Service
PARNA	Parque Nacional
SCS	Soil Conservation Service
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SRC	Sistema de Referência de Coordenadas
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SUDENE	Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste
SWMM	Storm Water Management Model
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1	Objetivo .....	14
1.2	Justificativa .....	15
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
2.1	A Bacia Hidrográfica .....	16
2.2	Drenagem Urbana .....	17
2.3	Modelagem dos escoamentos de fluidos .....	18
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	22
3.1	Definição da área de estudo .....	22
3.1.1	<i>Delimitação da rede de drenagem e suas sub-bacias</i> .....	23
3.1.2	<i>Ajustes na hidrografia</i> .....	24
3.2	Obtenção da batimetria do reservatório .....	25
3.3	Classificação do uso do solo .....	26
3.4	Ajuste dos parâmetros de escoamento e infiltração .....	27
3.5	Obtenção de dados meteorológicos .....	28
3.5.1	<i>Obtenção da precipitação</i> .....	28
3.5.2	<i>Obtenção da série de evaporação</i> .....	29
3.6	Validação do modelo .....	29
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	30
4.1	Drenagem natural e sub-bacias .....	30
4.2	Batimetria da Lagoa de Jijoca .....	31
4.3	Análises do uso do solo .....	33
4.4	Parâmetros de infiltração e escoamento das sub-bacias .....	34
4.5	Séries meteorológicas .....	35
4.6	Exportação do modelo para o SWMM .....	36
4.7	Calibração e validação do modelo SWMM .....	37
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	43
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	44

# 1 INTRODUÇÃO

O conhecimento das características hidrológicas e hidráulicas de uma região, a drenagem natural, bem como a morfologia e topografia do solo, é de suma importância para o planejamento urbanístico e do bem-estar social, permitindo o monitoramento e manejo de reservatórios superficiais, antecipação de eventos de seca ou enchentes (ALBERTINI *et al.*, 2020).

As ações antrópicas por sua vez, modificam estes sistemas naturais, alterando cursos d'água, o uso e ocupação do solo, implementando culturas e impermeabilizando grandes áreas durante o processo de desenvolvimento urbano, com construções de vias e edifícios. Estas intervenções, sobretudo o processo de impermeabilização do solo, provocam impactos expressivos no comportamento do escoamento superficial, levando a picos de volume máximo em menores intervalos de tempo, acarretando problemas socioeconômicos diversos (CARDOSO *et al.*, 2014).

Embora seja conhecida a utilidade destes parâmetros ambientais, muitas áreas de elevado interesse econômico, social e ambiental ainda não são monitoradas. Neste cenário, métodos utilizados para estimar tais propriedades de forma indireta por meio de análises e modelos matemáticos e computacionais foram desenvolvidos e estão sendo empregados a fim de suprir a ausência destes dados (REIG; BOUCHER; TREMBLAY, 2020).

O município de Jijoca de Jericoacoara, situada ao norte do estado do Ceará, movimentada toda uma economia baseada no turismo, impulsionado pelas praias e lagoas paradisíacas. Em 1984, determinou-se o litoral de Jijoca, contemplando toda a praia de Jericoacoara, como Área de Proteção Ambiental (APA) por Decreto nº 90.379 do então presidente João Figueiredo, sendo extinguida em 2007 e passando a ser integralmente denominada Parque Nacional (PARNA) com 8.850 ha (UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NO BRASIL, 2021). Um dos pontos turísticos mais relevantes é a Lagoa de Jijoca, constituída pelas Lagoa Azul e do Paraíso, segunda maior do estado, com 57 km de perímetro (PREFEITURA JIJOCA DE JERICOACOARA, 2021).

## 1.1 Objetivo

O objetivo geral do presente estudo é elaborar um modelo hidrológico-hidráulico da bacia hidrográfica da Lagoa de Jijoca, fazendo uso de ferramentas de geoprocessamento e simulação.

Para tanto, propõe-se:

- a) Delimitar a bacia hidrográfica da Lagoa de Jijoca e suas sub-bacias;
- b) Delimitar a rede de drenagem natural da bacia;
- c) Produzir a batimetria da Lagoa de Jijoca;
- d) Classificar o uso e ocupação do solo da bacia;
- e) Obter parâmetros físicos do solo e da drenagem em estudo;
- f) Obter dados meteorológicos da área;
- g) Consolidar as informações no software *Storm Water Management Model* (SWMM) para simulação;
- h) Validar o nível d'água modelado na Lagoa de Jijoca correlacionando com o histórico de imagens do Google Satélite.
- i) Calibrar e validar o modelo hidrológico-hidráulico.

## 1.2 Justificativa

O gerenciamento dos recursos hídricos impacta diretamente no desenvolvimento econômico e social de uma região. O município de Jijoca de Jericoacoara, que tem sua economia baseada principalmente pelas atividades de turismo relacionadas com suas praias e lagoas, possui interesse reforçado na preservação e manejo de seus recursos naturais, além da importância da conservação de seu Parque Nacional.

Neste cenário, a utilização de ferramentas de modelagem computacional para contemplar os diversos fatores relacionados com a dinâmica hidrológica e hidráulica da bacia hidrográfica se torna fundamental. O SWMM, software desenvolvido pela *US Environmental Protection Agency's*, utiliza-se de um modelo denominado chuva-vazão, permitindo estimar o fluxo de base através de uma série histórica de precipitação, a partir daí torna-se possível a simulação de cenários, para estimativa dos impactos gerados por mudanças no uso do solo ou variação nas precipitações (TSENG *et al.*, 2020).

Um dos impasses no uso do SWMM é em virtude da vasta quantidade de parâmetros necessários para a devida caracterização da área de estudo, como variáveis hidrológicas e características físicas do solo (NIEMI *et al.*, 2019). A ausência de tais dados implica em resultados não compatíveis com o observado *in loco*, ou ainda, na impossibilidade de prosseguir com os estudos. Portanto, evidencia-se a relevância de metodologias que permitam extrair de forma indireta os dados de entrada para modelos que complementarão a base existente.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 A Bacia Hidrográfica

Segundo definição de Viessmann et al. (1977), bacia hidrográfica é uma área definida topograficamente, drenada por um curso d'água ou um sistema conectado de cursos d'água, tal que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída. Este ponto de convergência é denominado exutório.

De acordo com a Lei nº 9.433/1997, a bacia hidrográfica é a unidade territorial para execução da Política Nacional de Recursos Hídricos e operação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Para Maksimovic (2001), as bacias devem ser utilizadas não só como unidade de planejamento e gerenciamento de água, mas também de outros recursos e atividades econômicas e sociais, em que qualquer intervenção deve ser estudada e avaliado o impacto causado na bacia.

Pode-se considerar a bacia hidrográfica como um sistema físico do ciclo hidrológico, ou seja, a entrada deste é a água precipitada e a saída é a água escoada pela seção de controle, havendo-se perdas nos processos de evaporação, transpiração e infiltração, que podem ser desconsideradas quando se analisa um evento isolado (TUCCI, 2004). Além disso, o comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica também é afetado por ações antrópicas, uma vez que, ao intervir no meio natural, o homem acaba interferindo nos processos do ciclo hidrológico (TONELLO, 2005).

A dinâmica interna das bacias hidrográficas dependerá das características específicas dos vários elementos que as compõem. Para Calijuri e Cunha (2013), a caracterização de bacias hidrográficas depende da união de quatro aspectos chave. Os físicos (clima, rede de drenagem, uso e ocupação do solo, relevo, geologia e geomorfologia), comportamento hidroclimatológico (séries históricas de pluviometria, fluviometria, sedimentometria e de qualidade da água), além dos ecológicos e socioeconômicos. A integração destes aspectos é simplificada pelo uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG).

Alguns destes atributos são intitulados como dados fisiográficos, que por definição, são aqueles que podem ser obtidos através de mapas, imagens aéreas ou orbitais. Sucintamente, são áreas, comprimentos, inclinação e tipo de uso do solo, que podem tanto ser extraídos de forma direta ou por meio de índices (TUCCI, 2004, p. 45).

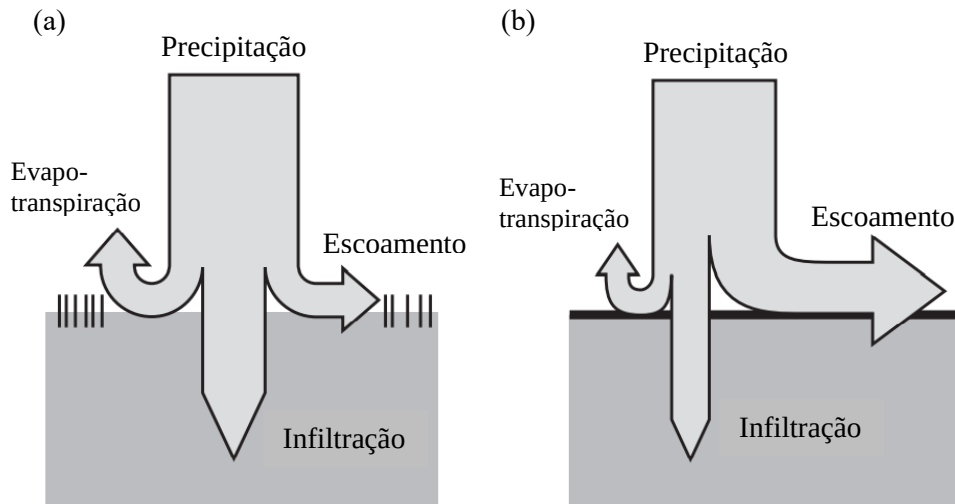
A forma de uso e ocupação do solo em bacias hidrográficas interage com os elementos e fenômenos ambientais, podendo influenciar diretamente, por exemplo, em aspectos

hidrológicos, sendo a qualidade da água indicador de tais alterações (BRITES & GASTALDINI, 2007; ZAFANNI, 2012). Contudo, o uso e ocupação do solo é um efeito gerado exclusivamente pela atividade antrópica, dessa forma, podendo ser empregada regulamentação e controle (Dornelles, 2003).

## 2.2 Drenagem Urbana

As modificações antrópicas realizadas sobre o ambiente implicam em impactos diretos na dinâmica natural dos recursos hídricos. O processo de impermeabilização dos solos com a implantação de infraestruturas urbanas, seja durante as instalações domiciliares, edifícios ou pavimentação das vias, resultam na redução da capacidade de infiltração e no aumento do escoamento superficial. Com isso, as vazões máximas podem atingir até 7 vezes a original, segundo Leopold (1968). A Figura 1 (a), representa a dinâmica das águas pluviais em uma situação de solo natural, enquanto a Figura 1 (b) ilustra os efeitos da impermeabilização do solo.

Figura 1 – Comportamento das águas pluviais pré-urbanização (a) e pós-urbanização (b)



Fonte: Butler & Davies (2004, com adaptações).

Para Canholi (2014), a problemática do controle de vazões de chuva em uma bacia, imprescindivelmente demandaria um plano de macrodrenagem, indo além de obras estruturais, assumindo papel de instrumento regulador, norteador da tomada de decisões para que haja desenvolvimento dos sistemas de drenagem urbana.

De acordo com DSD (2018), o sistema de drenagem de águas pluviais, assim como

o esgoto, tem caráter essencial em uma cidade moderna. O objetivo é coletar a vazão produzida em uma área de captação e transportar para um corpo receptor, seja ele um rio, um lago ou diretamente no mar, durante e após os eventos de chuva.

Em termos de grau de impacto hidráulico e do potencial de inundação, existem dois níveis na drenagem: a micro e a macrodrenagem (CIWEM, 2021).

A microdrenagem é composta pelos sistemas subterrâneos, comumente são drenos de esgoto, cursos d'água provenientes de bueiros e sarjetas das rodovias, podendo incluir a drenagem de edifícios individuais (CIWEM, 2021).

Nos núcleos urbanos é caracterizada pelo traçado das ruas, estando associada a áreas em que o escoamento natural não é bem estabelecido, assim, sendo definido pela ocupação do solo (TUCCI, 2004).

Fazem parte da macrodrenagem os sistemas superficiais, como os rios que compõem a drenagem natural das bacias hidrográficas, vales de inundação e a área urbana. Usualmente são classificados como canais ou fluxos superficiais (CIWEM, 2021).

A principal finalidade da macrodrenagem é possibilitar a condução final das águas captadas pela microdrenagem, dando continuidade ao escoamento proveniente do deflúvio das ruas, sarjetas, valas e galerias. Tais estruturas são equiparadas ao sistema de drenagem natural da zona urbana (MARTINS, 1995).

### 2.3 Modelagem dos escoamentos de fluidos

Segundo Von Sperling (2007), o escoamento de fluidos é dependente de uma série de variáveis, as quais podem ser classificadas a partir de suas características.

Quanto à oscilação no tempo, pode ser considerado como:

- Permanente: As características do escoamento não sofrem alterações com o tempo ( $\frac{dV}{dt} = 0$ );
- Não permanente ou transiente: As características do escoamento sofrem alterações com o tempo ( $\frac{dV}{dt} \neq 0$ ).

À variação na trajetória das partículas:

- Laminar: A trajetória é constante com o deslocamento ( $Re < 2300$ );
- Turbulento: A trajetória é variável com o deslocamento ( $Re > 2300$ ).

Sendo,  $Re$  o Número de Reynolds, um valor adimensional resultado de uma relação matemática, de acordo com a Equação (1):

$$Re = \frac{D \cdot V}{\nu} \quad (1)$$

Em que, D = Diâmetro (m), V = Velocidade média do fluido (m/s) e  $\nu$  = Viscosidade cinemática ( $m^2 \cdot s^{-1}$ ).

À variação na trajetória do escoamento do fluido:

- Uniforme: O vetor velocidade é constante em módulo, direção e sentido em todos os pontos ( $\frac{dV}{dx} = 0$ );
- Variado: O vetor velocidade varia com deslocamento ( $\frac{dV}{dx} \neq 0$ ).

À rotação:

- Rotacional: As partículas apresentam rotação em relação a um eixo qualquer;
- Irrotacional: As partículas não apresentam rotação em relação a um eixo qualquer.

À massa específica:

- Compressível: Quando há variação na massa específica;
- Incompressível: Quando não há variação na massa específica.

Ao número de coordenadas espaciais requeridas:

- Unidimensional: Quando considera apenas uma coordenada principal;
- Bidimensional: Quando considera duas coordenadas principais;
- Tridimensional: Quando considera três coordenadas principais.

O escoamento dos fluidos, assim como a modelagem em rios e canais, é governado pelas equações de Saint Venant, considerando o escoamento unidimensional longitudinalmente e não-permanente, permitindo descrever a maioria dos casos. As equações são baseadas no Princípio de Conservação de Massa (equação da continuidade) e Quantidade de Movimento (equação dinâmica). As equações da continuidade e quantidade de movimento, para a situação em que a contribuição lateral e o cisalhamento dos ventos são desprezados, resultam nas Equações (2) e (3), respectivamente (CHAPRA, 1997):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_c}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{1}{A_c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A_c} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_c} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0 \quad (3)$$

Em que: Q = Vazão ( $m^3 \cdot s^{-1}$ );  $A_c$  = Área da seção transversal ( $m^2$ ); t = tempo (s); x = distância (m); y = altura da água no conduto (m);  $S_o$  = Inclinação do leito;  $S_f$  = Inclinação de atrito; g = Aceleração da gravidade ( $m \cdot s^{-2}$ ).

A Equação (3) também é conhecida como equação da Onda Dinâmica. Ao sofrer simplificações na sua forma completa, resulta nas equações da Onda Difusa e Onda Cinemática,

conforme exposto na Figura 2.

Figura 2 – Simplificações da equação de Saint Venant para quantidade de movimento

$$\frac{1}{A_c} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A_c} \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A_c} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_o - S_f) = 0$$

Aceleração local	Aceleração convectiva	Força de pressão	Força de gravidade	Força de atrito
---------------------	--------------------------	---------------------	-----------------------	--------------------

← Onda Cinemática

← Onda de Difusão

← Onda Dinâmica

Fonte: Chapra (1997, com adaptações).

Modelos resumem-se na representação simplificada da realidade por meio da utilização de sistemas de equações matemáticas e procedimentos computacionais compostos por variáveis e parâmetros capazes de prever comportamentos, transformações ou evoluções (CHRISTOFOLETTI, 1999).

A modelagem em sistemas de drenagem urbana se dá basicamente com a aplicação de modelos hidrológicos e hidráulicos e modelagem de qualidade da água; esta, dependente da primeira para o entendimento dos processos de transporte de poluentes (BUTLER; DAVIES, 2004).

Segundo Lima et al. (2013), os modelos de simulação em drenagem urbana possuem dois módulos interligados, sendo um para conversão de chuva em vazão, quantificados através de algoritmos, e outro para simulação do escoamento, representando o comportamento da água no sistema de drenagem de águas pluviais.

Já para Tucci (1995), os modelos de simulação hidrológica-hidráulica podem ser subdivididos, de acordo com a sua capacidade de simulação hidráulica: aqueles que adotam algum tipo de simplificação, como, por exemplo, a utilização da equação de onda cinemática para fluxo à superfície livre ou análise grosseira de fluxo sob pressão, são exemplos o modelo do MIT, SWMM e o ISS; e aqueles que utilizam equações completas de fluxo não-permanente e representam as diversas situações de fluxo com o mínimo de simplificações, representando geralmente redes malhadas e contemplando todos os efeitos de remanso, a exemplo do SWMM.

O SWMM tem sido utilizado em estudos de simulação hidrológica e hidráulica e qualidade de água tem aplicado o modelo SWMM. Pode-se citar dois desses estudos realizados no Ceará, são eles: Rocha (2021) e Mesquita (2020).

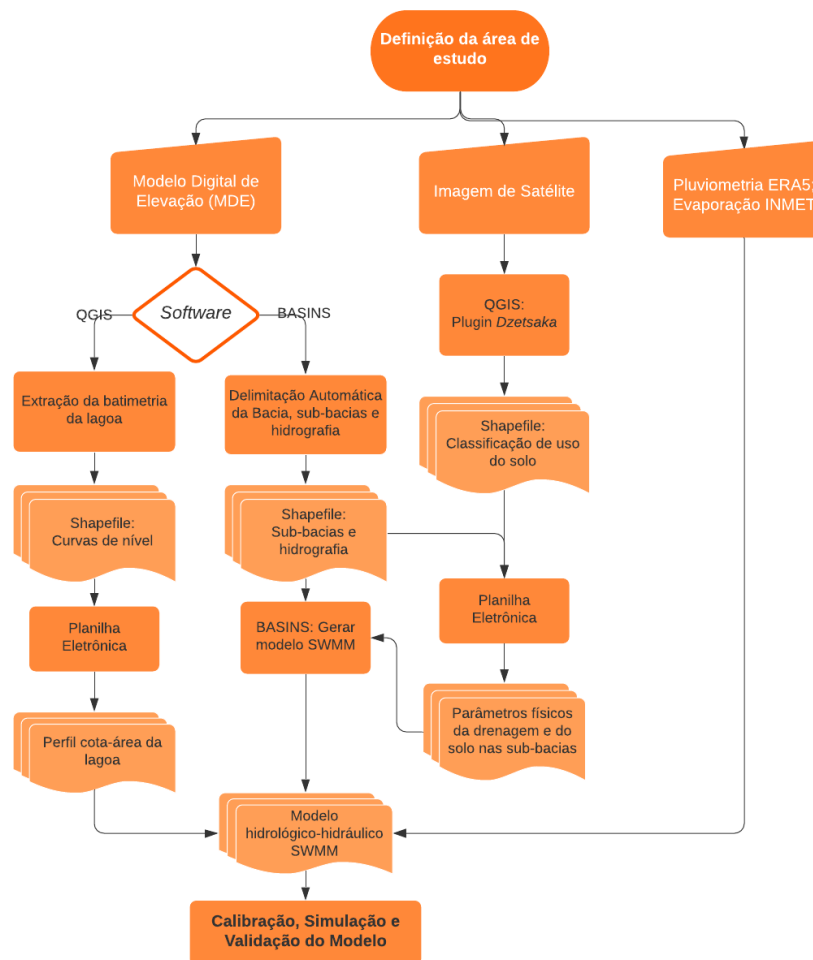
Rocha (2021) aplicou o SWMM em um rio costeiro para avaliação do comportamento hidrológico no sistema de macrodrenagem de uma bacia de transição urbana-rural, com efeitos de maré em seu exutório. Realizou simulação de vazão no sistema durante um mês com moderadas condições de precipitação. Verificou-se que as vazões modeladas nos trechos em que havia vazões medidas em campo nas sub-bacias rurais, apresentaram desvio médio de 8,6%, enquanto o modelo resultou em um coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,57. Concluiu que, com os resultados obtidos, o modelo elaborado tem potencial para auxiliar na gestão integrada de águas rurais, urbanas e costeiras.

Mesquita (2020), propôs uma ferramenta para modelagem das cargas bacteriológicas do sistema de drenagem urbana da bacia da Vertente Marítima de Fortaleza, Ceará, utilizando o SWMM nas simulações hidrológicas e hidráulicas. No trabalho foi proposta uma metodologia para calcular as cargas bacteriológicas por meio de estimativa da carga difusa e para correlacionar esta, com variados parâmetros hidro ambientais. Inferiu-se dos resultados do SWMM que a maior carga bacteriológica aportada na orla é decorrente do período chuvoso. Dentre os demais resultados, a correlação proposta entre a carga difusa, precipitação média mensal e resíduos sólidos dispostos inadequadamente, resultou em um  $R^2 = 0,99$ , possibilitando gerar uma equação de estimativa de carga difusa para qualquer sub-bacia da Vertente Marítima.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será apresentada a metodologia empregada no desenvolvimento do presente estudo. Inicialmente, foi discretizado e caracterizado os limites geográficos de abrangência da área de estudo. A Figura 3 sintetiza os passos realizados no estudo.

Figura 3 – Fluxograma da metodologia aplicada



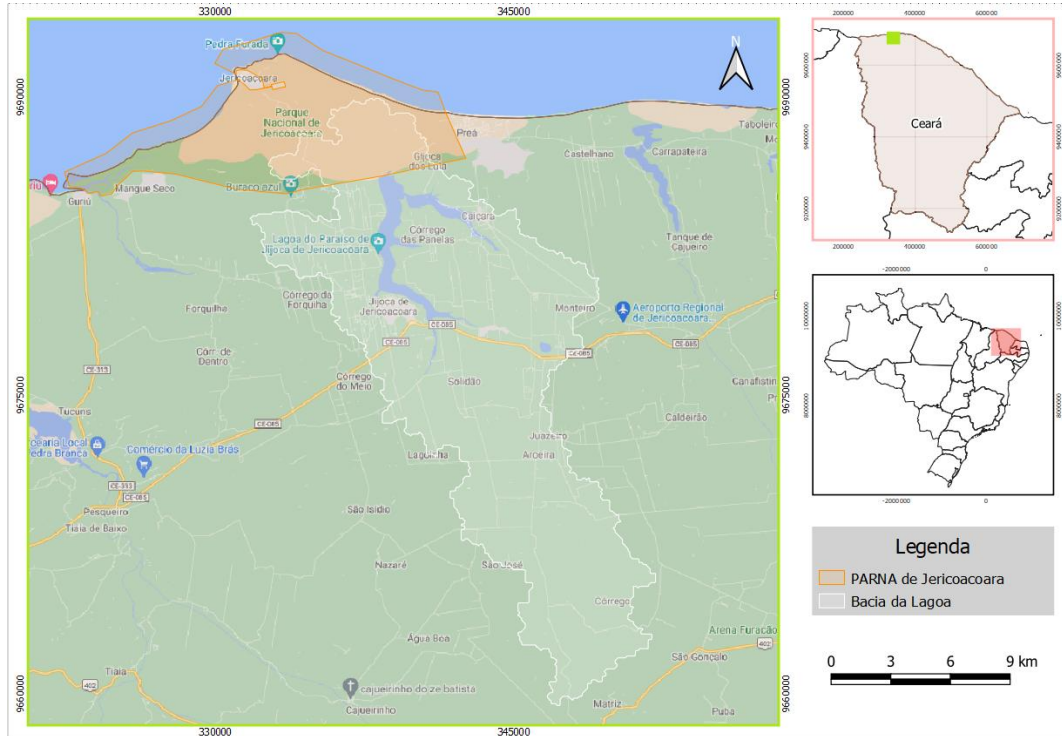
Fonte: elaborado pelo autor.

#### 3.1 Definição da área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrográfica da Lagoa de Jijoca de Jericoacoara, lagoa formada pelo barramento dos Córregos do Paraguai e do Mourão, resultado da migração de dunas móveis na planície costeira. Pertence a mesorregião do Noroeste Cearense no Litoral de Camocim e Acaraú, entre os municípios de Jijoca de Jericoacoara e Cruz, localizada a cerca de 290 km de Fortaleza-CE.

A Figura 4 apresenta a localização geográfica da área supracitada, destacando a bacia de estudo e a área do PARNA de Jericoacoara.

Figura 4 – Localização da área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor.

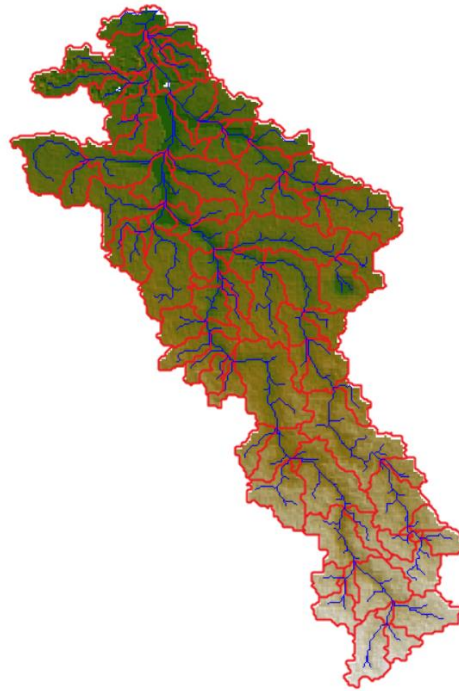
### 3.1.1 Delimitação da rede de drenagem e suas subbacias

A bacia hidrográfica foi delimitada utilizando ferramenta específica do software *Better Assessment Science Integrating Point and Non-point Sources* (BASINS), extraindo a tendência de fluxo e as áreas correspondentes a cada trecho tributário, além de outras informações, como as cotas nos trechos e declividade média das sub-bacias. Devido a não existência de medições topográficas para a região em estudo, fez-se uso do Modelo Digital de Elevação (MDE) originado da Missão Topográfica Radar Shuttle (SRTM) com resolução de 90 m x 90 m, cena única, em suma pela velocidade e acurácia na obtenção dos dados (Rabus et al., 2003). Para fins de padronização, todo o trabalho foi realizado adotando o Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) *SIRGAS 2000 UTM ZONE 24 SOUTH*.

No processo de delimitação da bacia, definiu-se um número mínimo de células tal, que permitiu subdividir a área em 99 sub-bacias. A Figura 5 ilustra o resultado obtido com o uso do BASINS.



Figura 5 – Hidrografia e sub-bacias geradas com o BASINS



Fonte: elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Ajustes na hidrografia

O BASINS infere algumas informações dos tributários a partir do MDE como, cotas, inclinação, comprimento, largura e profundidade. Porém, algumas vezes esses dados apresentam inconsistências que demandam ajustes manuais que devem ser avaliados. Os valores obtidos para a hidrografia da bacia da Lagoa de Jericoacoara apresentaram subdimensionamento para os seguintes parâmetros, largura e profundidade, identificado pela descontinuidade de fluxo durante a simulação do modelo hidráulico da bacia. Portanto, fez-se necessário revisar estes parâmetros.

De acordo com o manual de uso do BASINS (2019), a largura e a profundidade dos fluxos são estimadas levando em consideração a área total de contribuição do trecho, conforme as equações (4) e (5), respectivamente.

$$\text{Largura} = 1,29 \cdot \left( \frac{\text{Area}_c}{1000000} \right)^{0,6} \quad (\text{m}) \quad (4)$$

$$\text{Profundidade} = 0,13 \cdot \left( \frac{\text{Area}_c}{1000000} \right)^{0,4} \quad (\text{m}) \quad (5)$$

Sendo  $\text{Area}_c$  referente ao somatório das áreas de todas as sub-bacias a montante, que contribuem para o trecho específico a ser dimensionado.

O levantamento das áreas de contribuição dos trechos ( $Area_c$ ) foi realizado no QGIS, enquanto os cálculos da largura e profundidade foram elaborados em planilha eletrônica aplicando as equações 4 e 5. Os resultados obtidos na revisão dos parâmetros apresentaram valores condizentes com o esperado. Logo, estes foram adotados como valores de entrada do modelo hidráulico.

### 3.2 Obtenção da batimetria do reservatório

Devido a inexistência de medições batimétricas da Lagoa de Jericoacoara, fez-se necessário a utilização de ferramentas indiretas para a modelagem deste reservatório. Logo, aplicou-se uma metodologia adaptada aquela empregada no trabalho de Lopes e José (2019), em que utilizam imagens de satélite na obtenção de batimetria para análise de assoreamento em reservatórios.

Alternativamente a imagem de satélite, aplicou-se o mesmo MDE utilizado na delimitação da drenagem natural, fornecido pelo projeto SRTM com precisão de 90 m, ou seja, a cada pixel, corresponde uma área 90 x 90 m com a informação de altitude naquele local. Coletou-se então todos os pontos dentro da área do reservatório.

Para tanto, assumiu-se que a morfologia da lagoa acompanha o relevo do terreno nas regiões em que se encontram secas. Já nas áreas submersas o MDE foi extrapolado mediante tratamento por interpolação realizada no software *Surfer*, obtendo-se um MDE modificado, o qual se extraiu os planos isométricos na área do reservatório, permitindo gerar a curva cota-área-volume. A Tabela 1 abaixo, apresenta as áreas por cota.

Tabela 1 – Cotas e áreas equivalentes da Lagoa

Cotas (m)	Áreas (m <sup>2</sup> )
3	257,992
4	6.772,127
5	26.145,556
6	73.075,011
7	199.041,852
8	610.683,678
9	1.532.964,410
10	2.914.067,836
11	4.769.776,448
12	6.394.161,064
13	8.019.505,049

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.3 Classificação do uso do solo

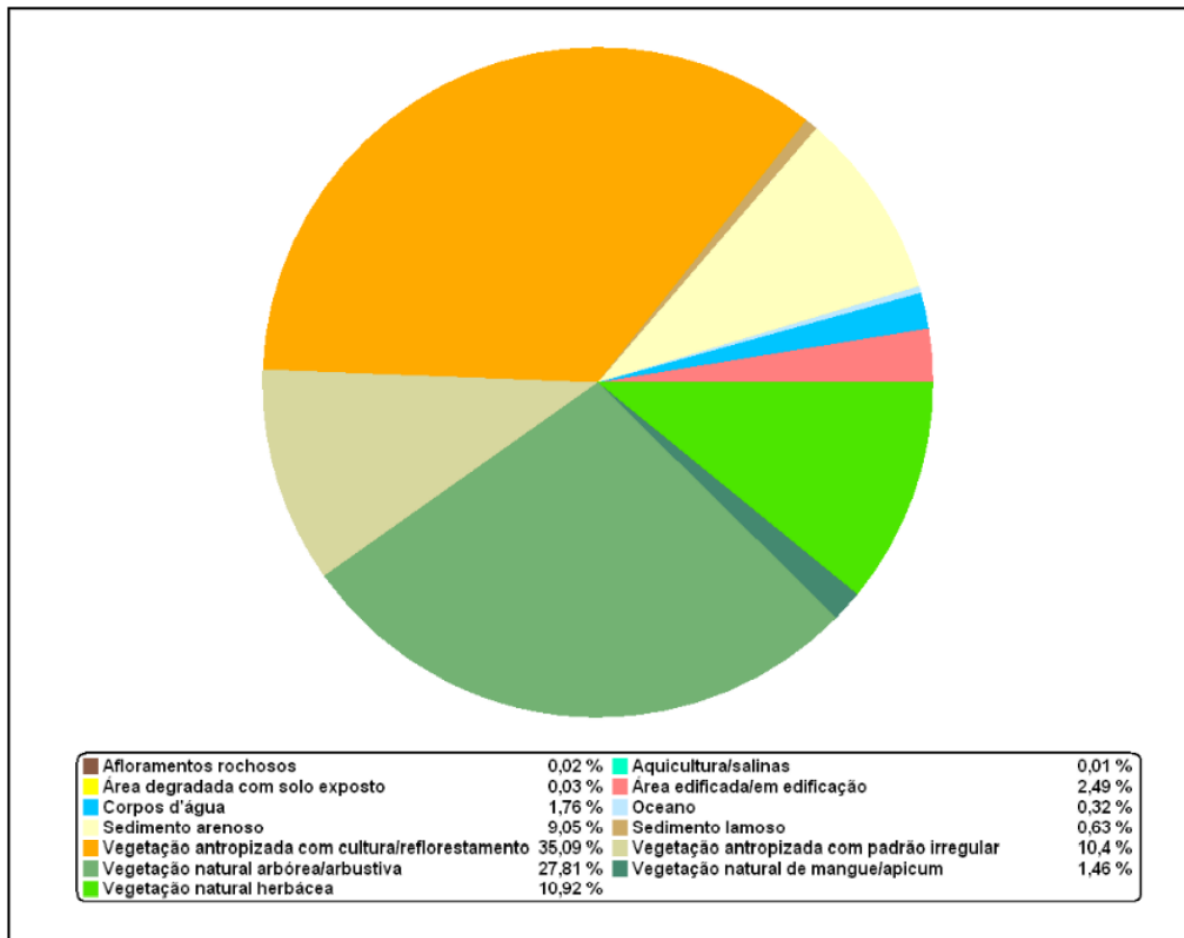
A necessidade de se conhecer o uso e ocupação do solo parte da escolha do modelo de infiltração empregado na modelagem hidráulica, o Método do SCS. Este método é uma aproximação adotada a partir da denominada Curva-Número (CN) do *National Resources Conservation Service* (NRCS) para estimativa do escoamento superficial. Considera-se que a capacidade total de infiltração do solo pode ser obtida da tabela de Curva-Número (SWMM, 2010).

Posto isso, foi realizada uma classificação supervisionada de imagem de satélite, utilizando o *plug-in Dzetsaka* através do software QGIS, ambiente de SIG, tendo como vantagem o fato de ter código livre e gratuito. Neste método foi necessário realizar um treinamento de máquina, que consiste na delimitação de áreas de uso homogêneo e previamente conhecido. Quanto maior a complexidade da área e categorias de classificação, proporcionalmente, maior será a quantidade de pixels de treinamento a serem inseridos. A partir desse treinamento, o algoritmo estende a classificação para as demais áreas da imagem.

A imagem de satélite utilizada foi uma composição colorida das bandas 6, 5, 4, 1, 2, 3, 7 e 9, na ordem disposta, da cena L8OLI21806220160801 do satélite Landsat-8 de 1 de agosto de 2016, órbita 218, ponto 062, com resolução espacial de 30 metros, disponibilizada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Os aspectos essenciais observados durante a escolha da cena foram a data de captura, priorizando a mais recente, e que apresentasse maior número de bandas disponível, qualidade e nitidez do pixel e ausência de nuvens, possibilitando uma satisfatória diferenciação dos usos.

A partir do Relatório Final de Caracterização Ambiental e dos Mapeamentos da SEMACE (2016), foram obtidos os usos do solo para o município de Jijoca de Jericoacoara, Figura 6. Dos usos observados, fez-se uma simplificação destes para definir cinco categorias de uso para representar a bacia da lagoa, sendo elas: Espelhos d'água, solo exposto, telhados e superfícies impermeáveis, vegetação de baixa densidade e dunas. A simplificação na quantidade de categorias está em conformidade às recomendações do manual do SWMM.

Figura 6 – Distribuição das classes de uso e cobertura do solo de Jijoca de Jericoacoara



Fonte: SEMACE (2016)

### 3.4 Ajuste dos parâmetros de escoamento e infiltração

O SWMM contempla em seus cálculos diversas variáveis referentes ao escoamento nas bacias, possibilitando realizar um refinamento da modelagem. Estas variáveis são diretamente relacionadas com o uso e ocupação do solo, como o percentual de área permeável e impermeável nas bacias, a rugosidade média do solo permeável e impermeável e a condutividade hidráulica do solo.

De posse da classificação do solo, já descrita, pôde-se calcular os parâmetros abordados, aplicando metodologia utilizada por Rocha (2019), em que se adota um valor base para cada uso do solo conforme literatura. Tendo em vista que a distribuição do uso do solo não é homogênea ao longo da área, foram realizadas médias ponderadas de acordo com o percentual de área de cada ocupação do solo para os diversos parâmetros e para cada uma das 99 sub-bacias.

Quanto à infiltração, o SWMM dispõe de três modelos para representar a infiltração da chuva nas regiões permeáveis das sub-bacias, sendo eles os modelos de infiltração de Horton, de Green-Ampt e um modelo baseado na Curva Número (CN) do *Soil Conservation Service* (SCS). No presente trabalho foi adotado o modelo da Curva Número.

Este modelo realiza uma aproximação da CN do *National Resources Conservation Service* que estima o escoamento superficial assumindo que a capacidade máxima de infiltração do solo pode ser obtida a partir da tabela de Curva Número. Desta forma, os dados a serem informados para fins de cálculo são o número CN e o tempo necessário para o solo saturado secar por completo. (SWMM, 2010).

No Apêndice A do Manual do usuário do SWMM são fornecidas as faixas de valores da curva SCS em função das características de ocupação e classe dos solos, a partir da qual foram extraídos os valores apresentados na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2 – CN por tipo de uso do solo

<b>Espelhos d'água</b>	<b>Solo exposto</b>	<b>Telhados e superfícies impermeáveis</b>	<b>Vegetação de baixa densidade</b>	<b>Dunas</b>
100	76	98	77	25

Fonte: elaborada pelo autor.

### 3.5 Obtenção de dados meteorológicos

O modelo chuva-vazão utilizado no SWMM, como o nome indica, relaciona o volume precipitado com o escoamento gerado na bacia. Portanto, fez-se necessário levantar a série histórica de precipitações da área de estudo.

#### 3.5.1 Obtenção da precipitação

Foram utilizados dados horários dos últimos 30 anos de precipitação, período de janeiro de 1990 a dezembro de 2019, fornecidos pelo Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus, processados através da ferramenta ERA5. O ERA5 é uma ferramenta global de monitoramento climático, operado pelo Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo – ECMWF na sigla em inglês, que faz a reanálise de dados climáticos combinando observações passadas com modelos e assim construindo séries temporais consistentes.

O pluviômetro de referência foi o da estação de Jijoca de Jericoacoara, sob o código 240013, operado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME, com telemetria iniciada em dezembro de 1899, conforme informações da Rede Hidrometeorológica Nacional no site da Agência Nacional de Águas – ANA.

### 3.5.2 Obtenção da série de evaporação

No modelo elaborado foi utilizada a entrada de evaporação por meio de médias mensais diárias, unidade de milímetro por dia (mm/dia). Os dados foram retirados das normais climatológicas de 1981 a 2010 disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, obtidas por medições com um evaporímetro de Piche. Devido ausência de dados específicos para Jijoca, adotou-se a estação disponível mais próxima geograficamente, sendo então a estação de Acaraú cujo código é 82294, a cerca de 50 km da Lagoa de Jijoca. A série pode ser verificada na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3 – Evaporação mensal diária

Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5,0	3,9	2,5	2,2	2,9	3,6	5,1	6,7	7,6	7,7	7,5	6,8

Fonte: INMET (2021, com adaptações).

### 3.6 Validação do modelo

Devido a inexistência de dados de medição em trechos da bacia ou de parâmetros da Lagoa, recorreu-se a fontes digitais para validação do modelo. Para tanto, utilizou-se do histórico de imagens de satélite do *Google Earth*, o que permitiu obter imagens espaçadas da área de estudo com boa resolução no período de 2010 a 2019, logo, limitou-se a simulação para este período.

A partir das imagens orbitais, a área do espelho d'água da Lagoa de Jericoacoara foi extraída através do software QGIS, o processo manual, consistiu no traçado de um polígono que envolveu a superfície de água no dado momento de captura da imagem, seguidamente registrou-se a área equivalente do polígono. Tendo isto, a área foi convertida em altura do nível d'água na Lagoa, por meio de interpolação linear na curva área-cota conforme descrito no tópico 3.2.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

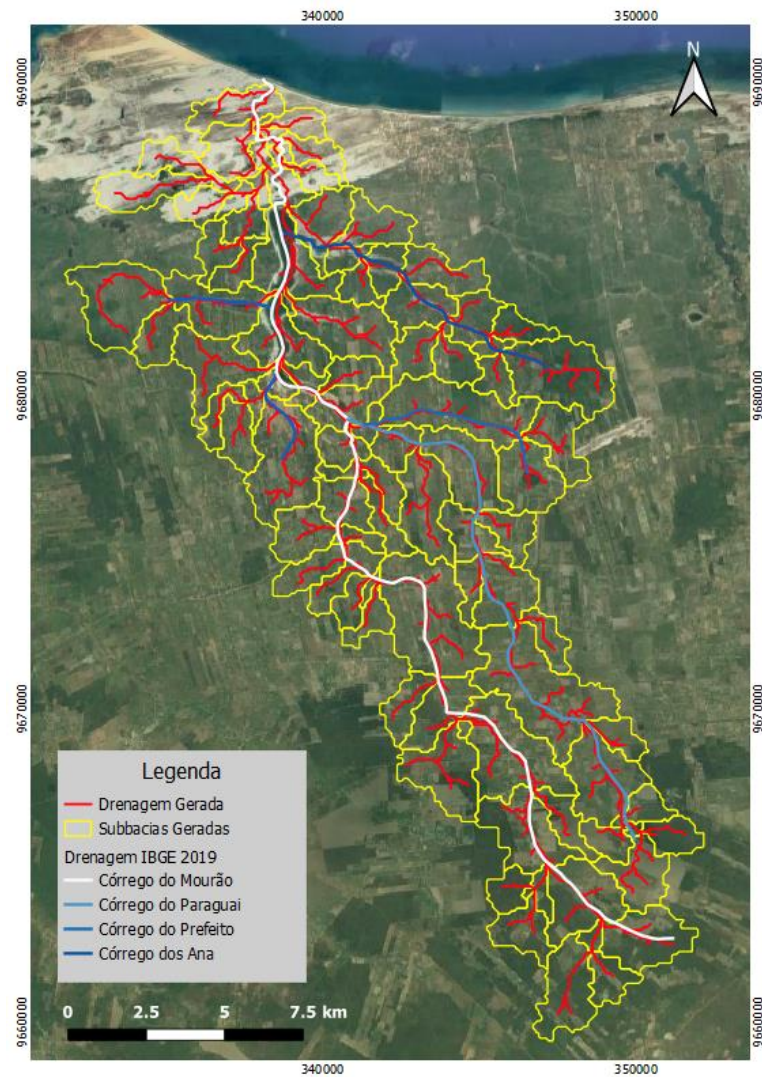
### 4.1 Drenagem natural e sub-bacias

A delimitação de drenagem natural gerada através do BASINS foi analisada, comparada e validada por meio dos dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), ano base 2019. Após repetidas simulações, verificou-se que os resultados foram compatíveis com a base oficial do IBGE contendo os principais córregos da bacia, sendo estes o córrego dos Ana, do Mourão, do Paraguai e do Prefeito.

Notou-se, ainda, que houve baixos desvios de caminamento de percurso, indicando que a resolução fornecida pelo MDE para esta bacia foi satisfatória, traçando uma rede fiel a base oficial. A Figura 7 exibe os dados do IBGE sobrepostos a delimitação obtida neste trabalho, evidenciando a conformidade nas informações. Ao todo, foram gerados 327 trechos de cursos d'água e 99 sub-bacias. A área média das sub-bacias foi de 238 ha, a mínima foi equivalente a 1ha e máxima de 975 ha.

Para Faustino (1996), as sub-bacias possuem áreas entre 100 km<sup>2</sup> e 700 km<sup>2</sup>, já para Rocha (1997, apud MARTINS et al., 2005), são áreas maiores que 20.000 ha e menores que 30.000 ha (200 km<sup>2</sup> a 300 km<sup>2</sup>). Para Santana (2003), bacias podem ser fragmentadas em um número qualquer de sub-bacias, a depender do ponto de saída considerado ao longo do seu eixo-tronco ou canal coletor. Com isso, concluiu-se que a definição para a fragmentação e tamanho das sub-bacias, tem caráter relativo.

Figura 7 – Comparativo dos córregos da bacia da Lagoa de Jijoca, IBGE e BASINS



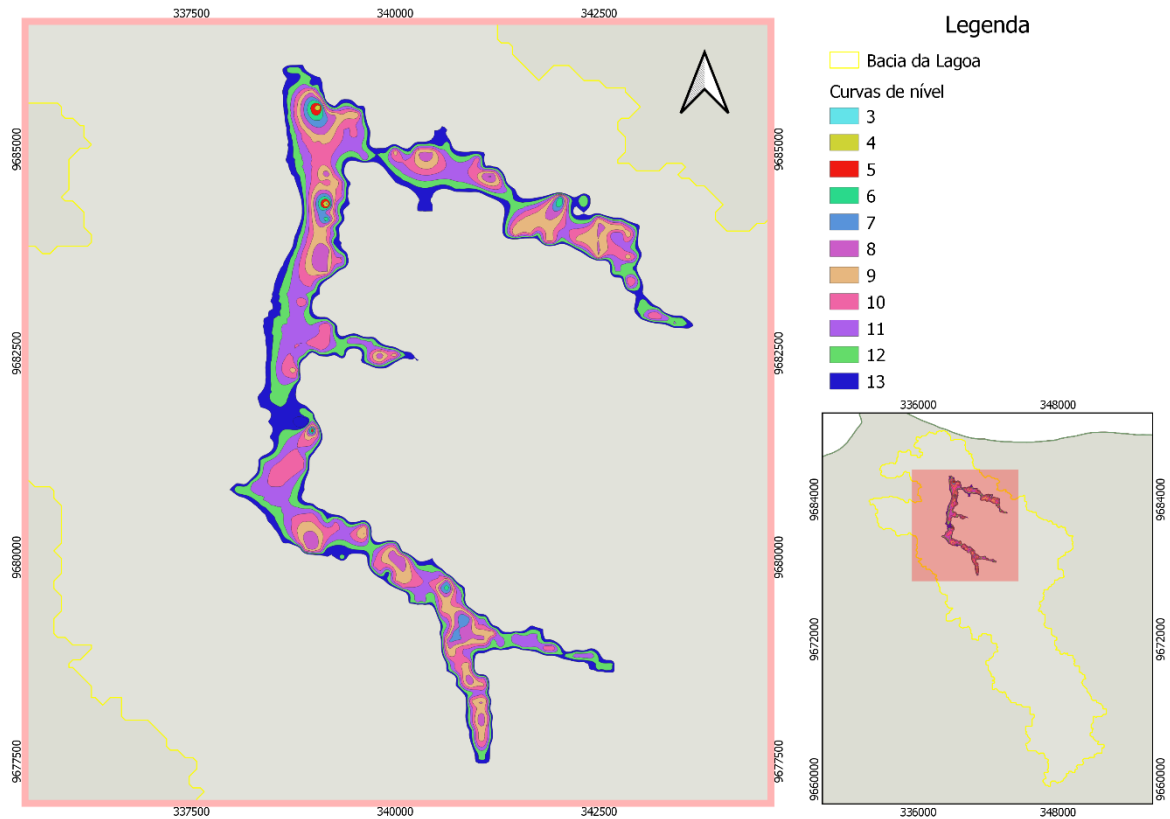
Fonte: elaborada pelo autor.

## 4.2 Batimetria da Lagoa de Jijoca

O processo de validação dos dados obtidos para a batimetria foi feito com imagens de satélite do *Google Earth*, fazendo-se uso do QGIS para unificar as informações, conforme método empregado por DE FARIAS MESQUITA (2020). Na Figura 8 estão ilustradas as curvas de nível da Lagoa, segundo foi extraído do MDE.



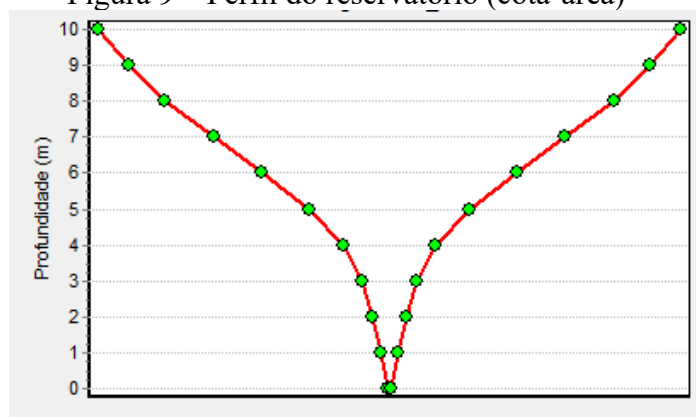
Figura 8 – Curvas de nível da Lagoa de Jijoca



Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme observado, a representação obtida foi satisfatória quanto a morfologia da lagoa, resultando em um perfil cônico, típico para reservatórios superficiais. O perfil geral do reservatório está exposto na Figura 9, os dados utilizados estão dispostos na Tabela 1. Subtraiu-se 3 m em cada cota para adequar ao formato de entrada do SWMM que utiliza a referência 0 como a cota de fundo, desse modo, a cota de fundo real, foi identificada a 3 m e cota do vertedouro a 13 m, profundidade resultante igual a 10 m nos pontos mais profundos.

Figura 9 – Perfil do reservatório (cota-área)

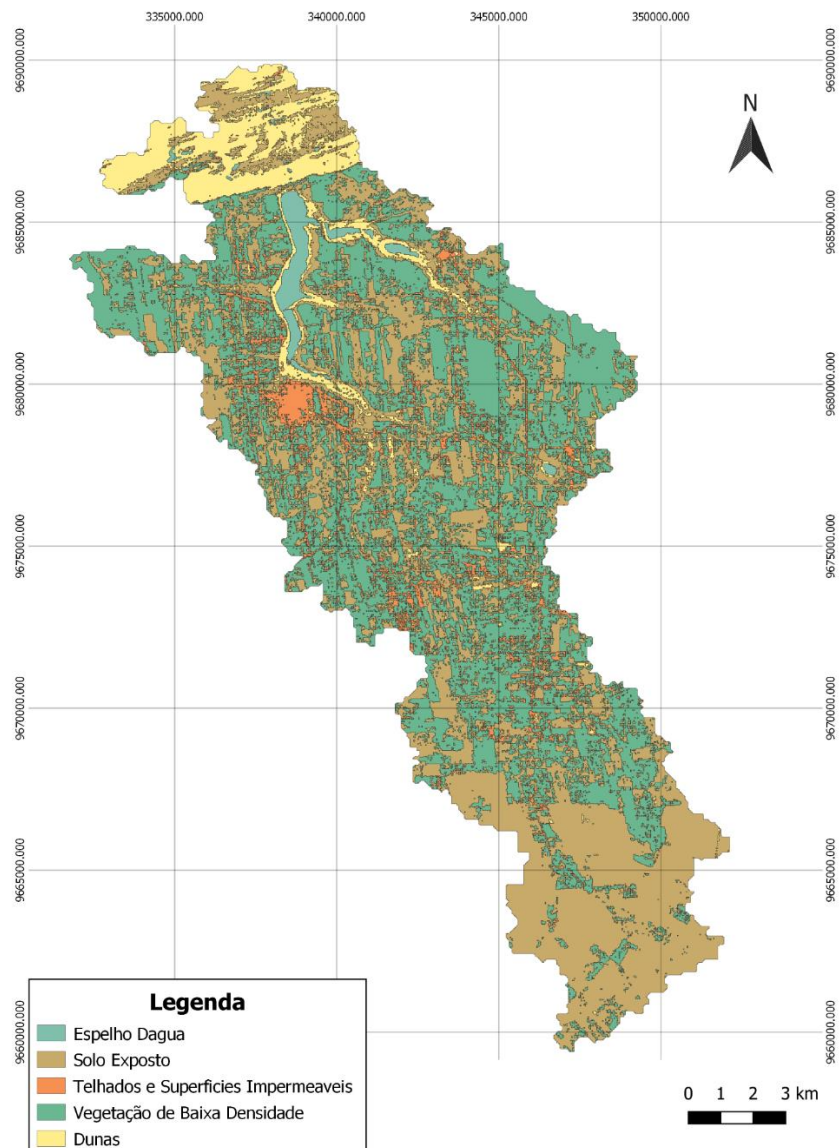


Fonte: elaborado pelo autor.

### 4.3 Análises do uso do solo

O estudo da ocupação do solo foi de extrema importância para fins de cálculo dos parâmetros de entrada do modelo do SWMM que envolvem as sub-bacias. Portanto, foi realizado um trabalho minucioso durante a classificação supervisionada de imagem. Após várias simulações, chegou-se a um resultado satisfatório na classificação utilizando um total de 84 polígonos traçados como treinamento de máquina, com área correspondente a 5,64% da área total da bacia, sendo suficiente para o QGIS através do *plug-in Dzetsaka* categorizar as demais áreas da bacia. A Figura 10 evidencia o resultado obtido com a classificação supervisionada na bacia da Lagoa de Jijoca.

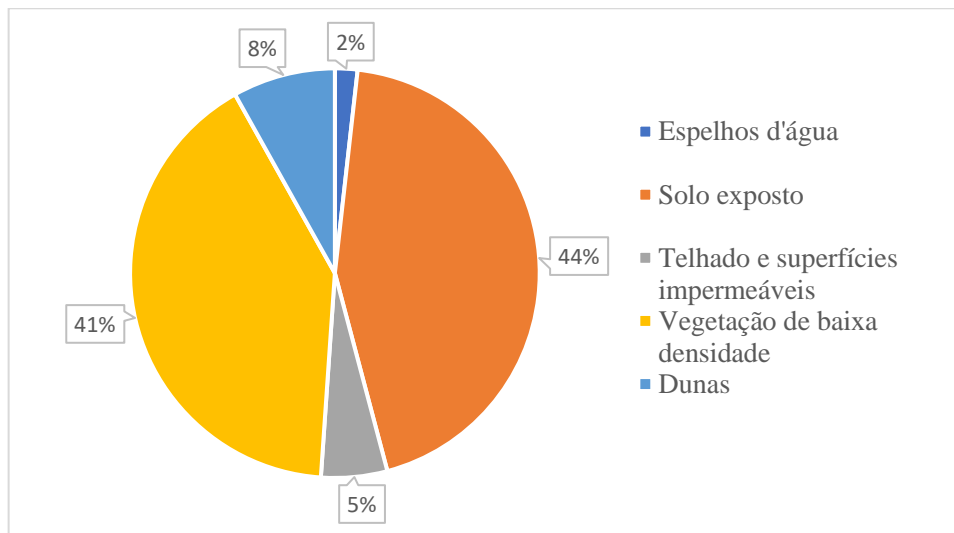
Figura 10 – Classificação do uso do solo



Fonte: elaborado pelo autor.

Dentre as categorias adotadas, duas representaram 85% da ocupação do solo, sendo elas solo exposto e vegetação de baixa densidade, com 44% e 41% da área, respectivamente. As demais categorias obtiveram os seguintes percentuais: Dunas 8%, telhado e superfícies impermeáveis 5% e Espelhos d'água 2%. Na Classificação da SEMACE (2016) as áreas de sedimento arenoso corresponderam a 9,05% da área, enquanto as áreas edificadas resultaram em 2,49% e os corpos d'água 1,76%. Os resultados estão proporcionalmente em conformidade com a classificação da SEMACE (2016) para o município de Jijoca de Jericoacoara, considerando que a área de estudo é uma fração da área total do município, como pode ser visto no Gráfico 1.

Gráfico 1 – Distribuição da ocupação do solo na bacia



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.4 Parâmetros de infiltração e escoamento das sub-bacias

Como esperado para o solo pertencente a faixa litorânea, com pouca ocupação urbana, foi verificada uma predominância de áreas permeáveis. Observou-se que, em média, 70% da área da bacia é considerada permeável. Este resultado é concordante com a distribuição da ocupação do solo, influenciado pelas áreas de solo exposto e a áreas de duna.

A declividade média da bacia foi de 1,5%, categorizando-se como uma região de baixa declividade ou plana, segundo classificação da EMBRAPA (1979). A máxima constatada nas sub-bacias foi 2,9%, enquanto a mínima registrada foi de 0,8%, indicando baixa variabilidade de inclinação ao longo da bacia. Esta característica, juntamente com a disponibilidade de áreas permeáveis, indicam uma baixa velocidade de escoamento e um

elevado tempo de concentração. Uma síntese dos demais parâmetros ajustados estão dispostos na Tabela 4, em que elucida os valores mínimos, médios e máximos registrados.

**Tabela 4 – Síntese de parâmetros ajustados das sub-bacias**

<b>Parâmetros</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Médio</b>	<b>Máximo</b>
PcntImperv	0,020	0,310	1,000
AveSlope (%)	0,800	1,500	2,900
n-Imperv (s/m <sup>1/3</sup> )	0,000	0,043	0,108
n-Perv (s/m <sup>1/3</sup> )	0,000	0,075	0,145
S-Imperv (mm)	1,905	3,640	4,540
S-Perv (mm)	1,905	4,34	5,026
HydCon (mm/h)	0,000635	0,25	0,45

Fonte: elaborada pelo autor.

A saber: PcntImperv é referente ao percentual de área impermeável; n-Imperv é o coeficiente “n” de Manning para escoamento superficial na parcela da sub-bacia impermeável; n-Perv é o coeficiente “n” de Manning para escoamento superficial na parcela da sub-bacia permeável; S-Imperv é o armazenamento em depressões na parcela impermeável; S-Perv é o armazenamento em depressões na parcela permeável; HydCon é a condutividade hidráulica do solo saturado.

Na estimativa destes parâmetros foram utilizados valores constantes fornecidos no manual do SWMM (2010). De acordo com estudo de sensibilidade realizado por Cavalcanti (2020), verificou-se que os parâmetros de maior influência nos resultados simulados são a área impermeável das sub-áreas (PcntImperv), o coeficiente “n” de Manning nas parcelas das sub-bacias impermeáveis (n-Imperv) e, em menor grau, a declividade das sub-bacias (AveSlope), estando em consonância com outros trabalhos da literatura. Entretanto, também foi constatado que a sensibilidade nos parâmetros pode diferenciar entre áreas de estudo, devido as particularidades físicas, ambientais e socioeconômicas locais, que resultam em respostas diferentes na drenagem. Dito isso, tem-se margens para calibração destes parâmetros.

#### **4.5 Séries meteorológicas**

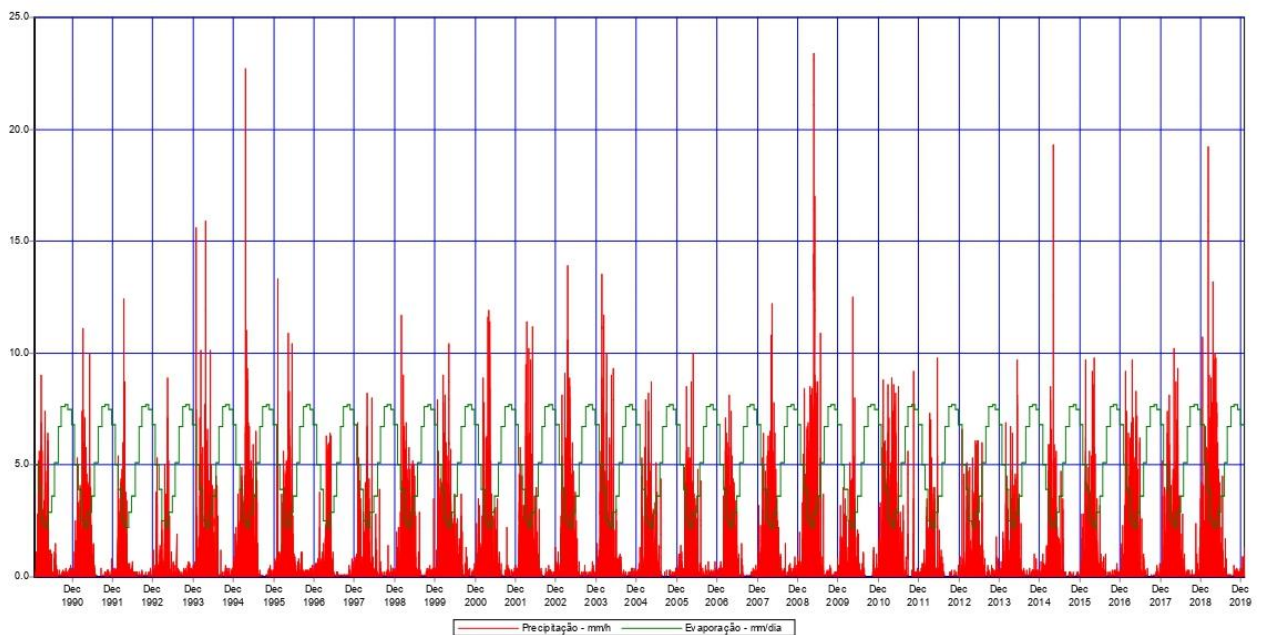
A série pluviométrica utilizada foi disponibilizada pelo projeto ERA5, com base na estação 240013, de Jijoca de Jericoacoara, operado pela FUNCEME. Estes dados foram de grande valor na aplicação do modelo devido ao tratamento realizado por reanálise, que

proporcionou uma série temporal concisa, sem lacunas ou ausência de registros. Os registros foram horários, iniciando em 1990 e finalizando em 2019.

Já as informações de evaporação, foram extraídos das normais climatológicas divulgadas pelo INMET. Por não haver dados diretos para o município de Jijoca, foram utilizados como referência a evaporação das normais climatológicas do posto mais próximo, portanto, do município de Acaraú.

Na Figura 11 estão apresentadas as duas séries, precipitação e evaporação, em que fica explícita a maior ocorrência de chuvas nos primeiros seis meses do ano, de janeiro a junho, enquanto no restante do ano tem-se o período de estiagem. Quando analisamos a evaporação, percebe-se que o comportamento é oposto, o que já é esperado, durante o período chuvoso a taxa de evaporação tem menor magnitude se comparada ao verificado no período seco.

Figura 11 – Série de precipitação e evaporação



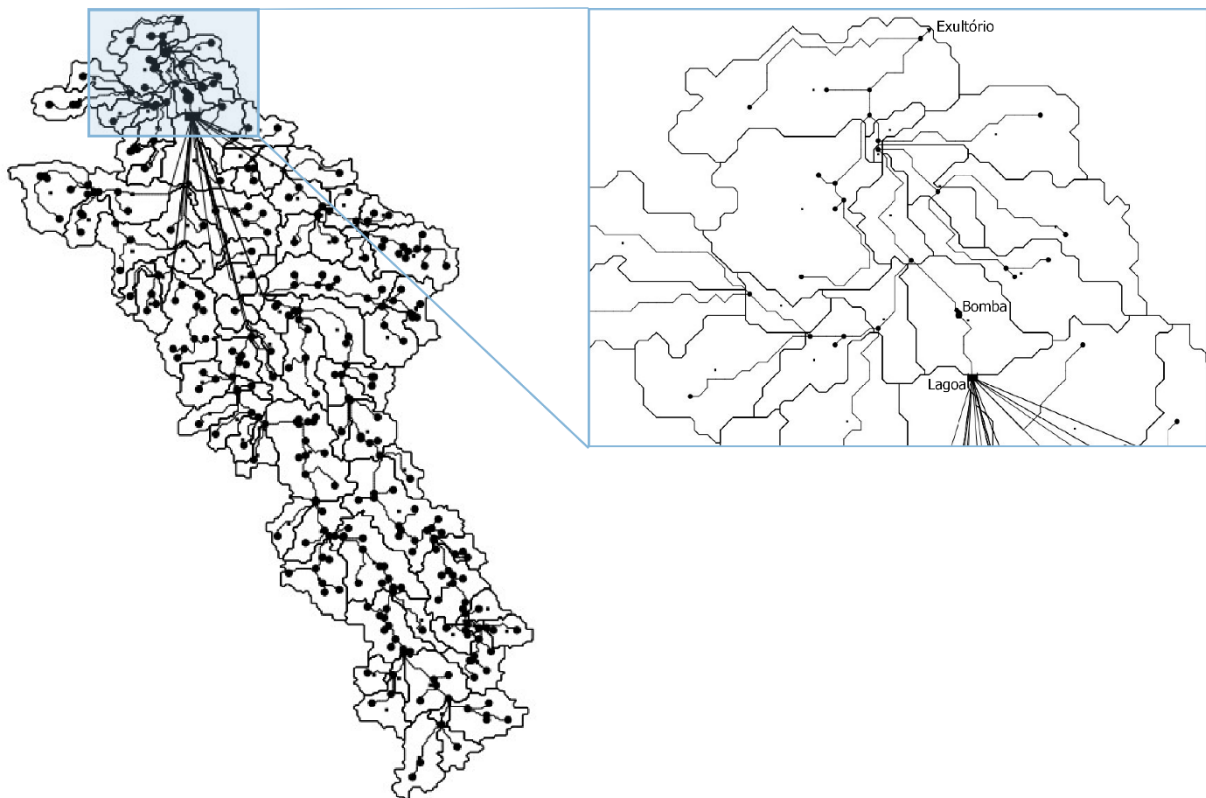
Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.6 Exportação do modelo para o SWMM

A exportação dos dados consolidados para o SWMM se deu através do BASINS. A escolha justifica-se pela praticidade do processo através de uma ferramenta nativa do BASINS, que compatibiliza os dois softwares gerando um modelo no SWMM através dos dados vetoriais pré-processados.

Após exportação, foram feitos alguns ajustes para melhor adequação do sistema. No ponto da barragem da lagoa inseriu-se uma unidade de armazenamento para desempenhar as funções do reservatório, para isso foram adicionadas as curvas batimétricas descritas anteriormente no tópico 3.2. Além disso, excluiu-se todos os trechos da drenagem que se situavam dentro da área da lagoa, pois já estavam contemplados pela unidade de armazenamento, portanto os trechos a montante foram ligados diretamente ao reservatório, e acrescentou-se um dispositivo de bomba ideal a jusante da lagoa, esta bomba opera de tal forma que toda vazão que ela recebe é transmitida sem perdas, assim sendo, a função dela é servir de vertedouro, permitindo a continuidade de fluxo a jusante. Por fim, configurou-se o exutório no último ponto a jusante. O resultado dos ajustes pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 – Modelo SWMM, detalhes dos ajustes



Fonte: elaborada pelo autor.

#### 4.7 Calibração e validação do modelo SWMM

A validação do modelo foi realizada por meio do histórico de imagens do *Google Earth*, optou-se pela utilização de imagens dos últimos 10 anos, de 2010 a 2019. Devido aos recentes avanços tecnológicos, a qualidade na resolução destas imagens se mostrou satisfatória,

diferentemente dos registros anteriores a essas datas. Um dos desafios verificados foi a presença de nuvens sobre a área do reservatório, o que inviabilizou o uso de algumas das imagens disponíveis. Ao todo, 12 imagens possuíram as características desejadas de resolução e ausência de nuvens e puderam ser utilizadas.

A partir das imagens coletadas, traçou-se polígonos equivalentes ao espelho d'água da lagoa através do próprio Google Earth, seguindo estratégia utilizada por DE FARIAS MESQUITA (2020) para contornar a ausência de medições em campo. O método de traçado dos polígonos foi manual e realizado por apenas uma única pessoa, para garantir o uso da mesma metodologia e interpretação das imagens. Em seguida, exportou-se estes dados para o QGIS onde pôde-se calcular a área da lagoa e converter essa área em profundidade através da curva cota-área. Os resultados desse procedimento encontram-se na Tabela 5.

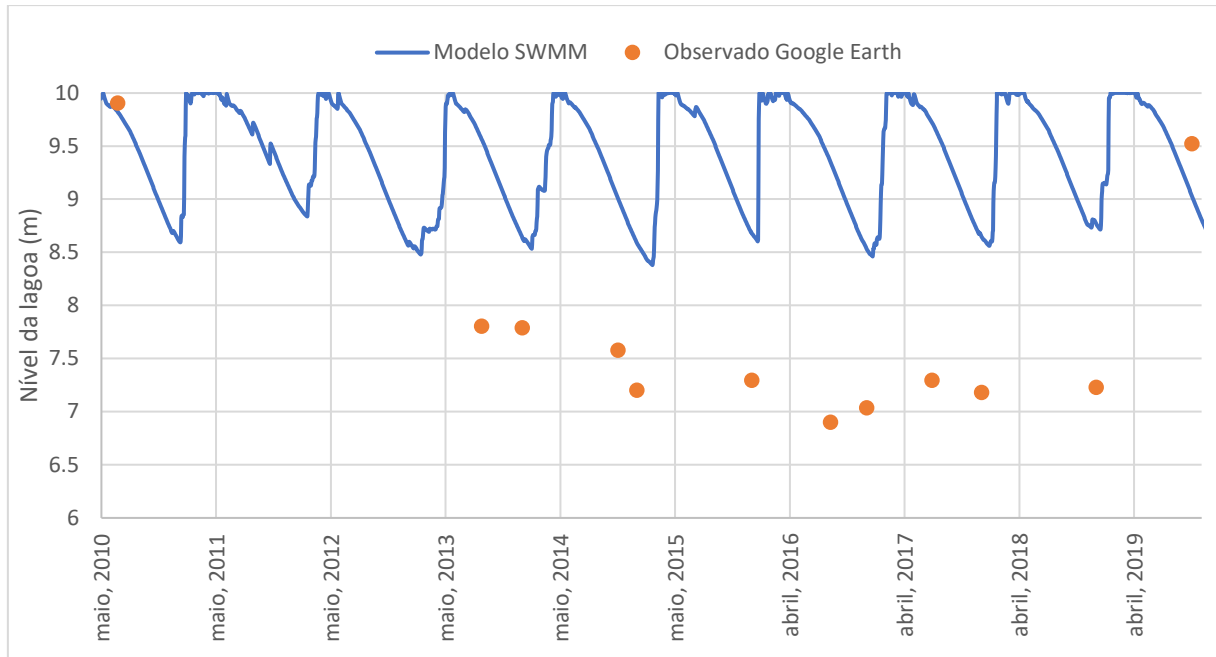
Tabela 5 – Dados históricos observados e estimado no Google Earth

<b>Data (MM/AAAA)</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Cota equivalente (m)</b>
06/2010	786,34	9,90
08/2013	440,71	7,80
12/2013	437,89	7,79
10/2014	398,79	7,58
12/2014	328,96	7,20
12/2015	346,12	7,29
09/2016	277,61	6,90
12/2016	298,09	7,04
07/2017	346,38	7,30
12/2017	325,04	7,18
12/2018	334,27	7,23
10/2019	724,31	9,52

Fonte: elaborada pelo autor.

A análise elaborada com os dados observados e modelados, dispostos no Gráfico 3, resultou em um coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) menor que 0, indicando que o modelo teve uma representação aquém de se adotar o valor médio modelado para representar o nível do reservatório.

Gráfico 3 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = -0,66)



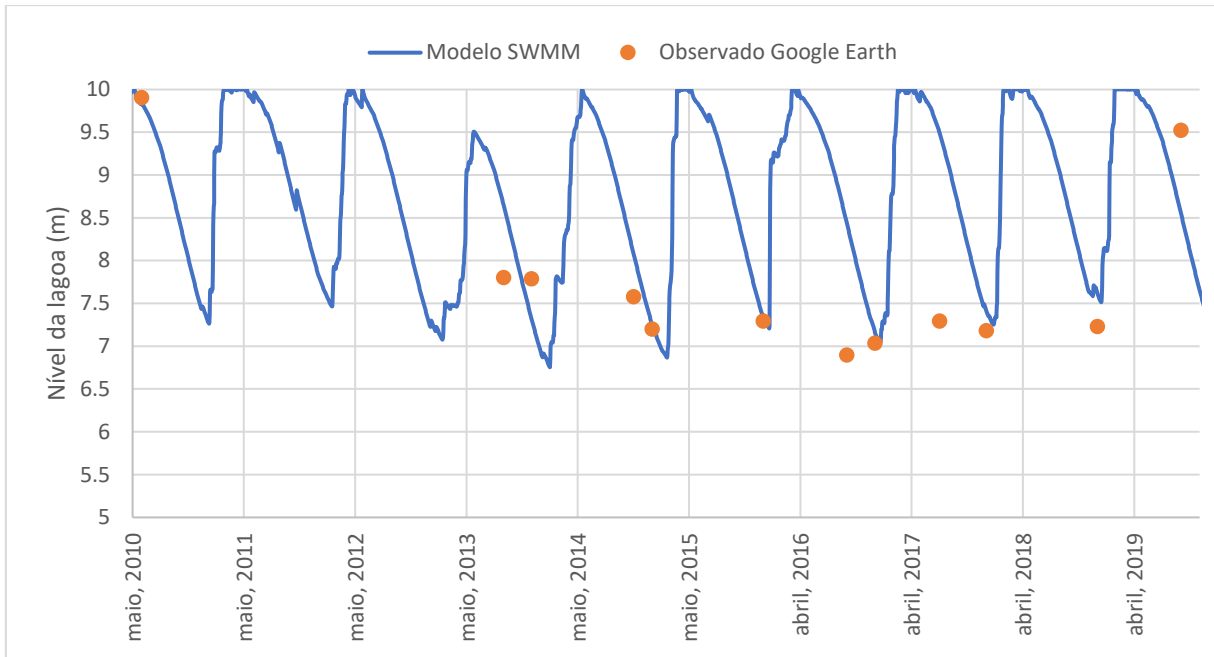
Fonte: elaborada pelo autor.

Verificou-se então que, a lagoa demonstrava estar tendo perdas com magnitude equivalente as perdas por evaporação. Logo, levantou-se a hipótese de tais perdas serem referentes a infiltração no reservatório, que até então estavam sendo consideradas insignificantes. A hipótese foi sustentada por um trabalho elaborado por Molle (1989) juntamente com a Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), no qual o mesmo fenômeno foi constatado, em que para pequenos açudes observou-se que a infiltração poderia ser equiparada a evaporação, devido a relação entre volume infiltrado e volume armazenado ser mais impactante para pequenos reservatórios.

Mantendo-se os demais parâmetros constantes, simulou-se o efeito no reservatório ao considerar o fator de evaporação igual a 2. Desta forma, o fator de evaporação representaria os efeitos combinados de evaporação e infiltração, para uma taxa de infiltração igual a taxa de evaporação fornecida no modelo. Para este novo cenário, obteve-se um NSE de 0,26, ressaltando os efeitos da calibração, como pode ser visto no Gráfico 4.



Gráfico 4 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = 0,26)



Fonte: elaborada pelo autor.

Por fim, com o intuito de segregar as parcelas de evaporação e infiltração, o fator de evaporação foi retornado para o padrão de 1, e calibrou-se o modelo de infiltração. O modelo empregado na unidade de armazenamento foi o de Green-Ampt. No manual do SWMM (2010) são dispostos os parâmetros exigidos, pressão de sucção e condutividade hidráulica do solo saturado, para os principais tipos de solo, de arenoso a argiloso, em escala granulométrica. Aquele que melhor se adequou ao modelo foi o solo argiloso, pressão de sucção igual a 320,04 mm e condutividade hidráulica de 0,01 mm/hora. Em estudo realizado por Meireles (2011) foi constatado que os terrenos nas lagoas de Jijoca são geralmente arenoargilosos, apresentando matéria orgânica e restos de conchas de moluscos no fundo lamoso, corroborando aos resultados encontrados. A Tabela 6 apresenta os tipos e parâmetros do solo, juntamente com o respectivo NSE calculado.

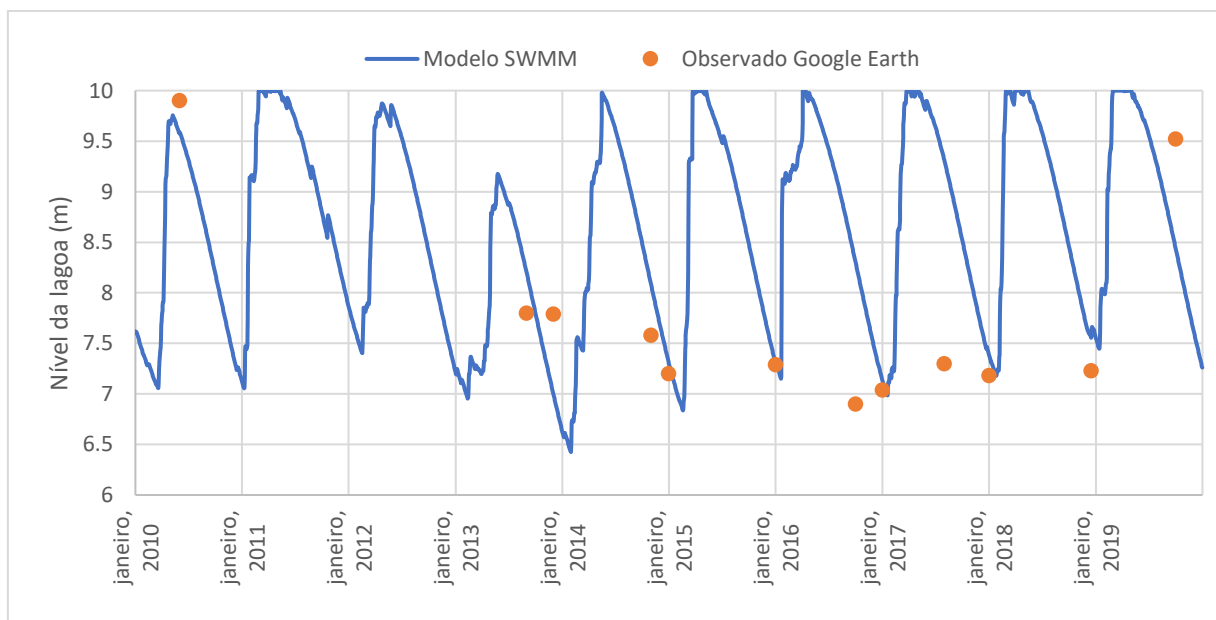
Tabela 6 – Parâmetros do solo e NSE verificados na Lagoa de Jijoca

<b>Tipo de solo</b>	<b>Condutividade hidráulica (mm/hora)</b>	<b>Pressão de Sucção (mm)</b>	<b>NSE</b>
Areia	120,396	49,022	-7,40
Areno lamoso	29,972	60,960	-6,97
Lemo arenoso	10,922	109,982	-6,34
Lemo	3,302	88,900	-4,80
Lemo franco	6,604	169,926	-5,83
Lemo arenoso argiloso	1,524	219,964	-2,96
Lemo argiloso	1,016	210,058	-1,79
Lemo franco argiloso	1,016	270,002	-1,77
Argila arenosa	0,508	240,030	-0,16
Argila franca	0,508	290,068	-0,18
Argila	0,254	320,040	0,28

Fonte: SWMM (2010, com adaptações).

O coeficiente NSE obtido para o solo argiloso foi de 0,28, indicando uma melhor predição se comparado aos demais tipos de solo, aos dois primeiros cenários modelados e se comparado ao uso da média das observações estimadas no *Google Earth*. O Gráfico 5, demonstra o comportamento do nível na Lagoa aplicando o modelo de infiltração.

Gráfico 5 – Nível da lagoa modelado e estimado pelo Google Earth (NSE = 0,28)



Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados obtidos no estudo desenvolvido, corroboram a capacidade preditiva do modelo,  $NSE > 0$ , podendo ser usado para auxiliar na gestão dos recursos hídricos da região,

simulação de cenários em que haja variabilidades climáticas ou modificações no uso do solo, e demais alterações hidrológicas ou hidráulicas. Desta forma, a utilização de modelos hidrológico-hidráulicos mostrou-se uma poderosa ferramenta, mesmo em situação de limitada fonte de dados, para embasar estudos em uma bacia hidrográfica.

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou a modelagem hidrológica hidráulica da bacia da Lagoa de Jijoca de Jericoacoara através do SWMM, utilizando uma série histórica de 30 anos de precipitação do ERA5, com a proposta de desenvolver uma metodologia aplicável em situações com limitada fonte de dados de monitoramento local.

Nesse sentido, foi delimitada a bacia da Lagoa, discretizada em 99 sub-bacias, bem como a rede de macrodrenagem, condizente com os registros de hidrografia do IBGE. Também foi realizada a classificação do uso e ocupação do solo, concordante com a base da SEMACE, permitindo estimar os parâmetros físicos, de infiltração e escoamento das sub-bacias.

Além disso, realizou-se a modelagem do perfil da Lagoa a partir das curvas de nível extraídas do MDE e ajustadas com auxílio de imagens de satélite. Com base nos relatórios da modelagem, inferiu-se que a Lagoa apresentava perdas por infiltração da mesma ordem de grandeza da evaporação, apontando para a importância de se avaliar esse tipo de perda em pequenos reservatórios.

A modelagem, após calibração, apresentou coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,28, ao avaliar o período de dez anos, abrangendo as estações chuvosa e seca, do nível d'água na Lagoa, atestando que o modelo se mostrou um melhor preditor, se comparado com a utilização da média das observações extraídas do *Google Earth* no mesmo período.

Desse modo, podendo ser usado para auxiliar na gestão dos recursos hídricos da região, simulação de cenários em que haja variabilidades climáticas ou modificações no uso do solo, e demais alterações hidrológicas ou hidráulicas.

Para trabalhos futuros, recomenda-se avaliar os resultados do modelo para uma série mais completa, elevando a quantidade de observações para validação. Realizar a calibração dos parâmetros das sub-bacias. Sugere-se ainda, o monitoramento de dados em campo para aplicação no modelo. Ademais, indica-se a aplicação da metodologia do presente trabalho na simulação de cenários em que ocorram significativas alterações hidrometeorológicas ou hidráulicas na bacia.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTINI, C.; MAZZOLENI, M.; TOTARO, V.; IACOBELLIS, V.; DI BALDASSARRE, G. **Socio-Hydrological Modelling: The Influence of Reservoir Management and Societal Responses on Flood Impacts**. *Water* 2020, 12, 1384.
- BRASIL. Lei nº 9.433 de 08 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989 dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 9 jan. 1997. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm). Acesso em: 20/08/2021.
- BRITES, A. P.; GASTALDINI, M. C. C. Avaliação da Carga Poluente no Sistema de Drenagem de Duas Bacias Hidrográficas Urbanas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 4, p. 211-221, out/dez, 2007.
- BUTLER, David; DAVIES, John W. **Urban Drainage**. 2nd. ed. London and New York: Spon Press – Taylor & Francis Group, 2004, 566p.
- CANHOLI, Aluísio Pardo. **Drenagem Urbana e controle de enchentes**. 2. Ed. São Paulo: Oficina de Textos. 2014.
- CARDOSO, M.; MULLER, S.; DUARTE, A.; LIMA J. Ações de regularização fundiária e de mensuração das desconformidades urbanas: o caso das terras da União sob tutela da Universidade Federal do Pará na cidade de Belém do Pará, [S.l.], **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 6, n. 3, p. 275-287, dez. 2014.
- CAVALCANTI, Allana Abreu. Utilização do software SWMM na modelagem hidrológica da sub-bacia do ribeirão Vai e Volta – Poços de Caldas/MG. **Universidade Federal de Alfenas**, 76 f., 2020.
- CHAPRA, Steven C. **Surface Water-Quality Modeling**. Waveland Press, Inc. 1997, 844p.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Blucher, 1999. 236p.
- CIWEM. Chartered Institution of Water and Environmental Management. **Integrated Urban Drainage Modelling Guide**. v2.01. 2021, 196p. Disponível em: <[https://www.ciwem.org/assets/uploads/IUD\\_1.pdf](https://www.ciwem.org/assets/uploads/IUD_1.pdf)>. Acesso em 20/08/2021.
- DE FARIAS MESQUITA, JANINE BRANDÃO; NETO, IRAN EDUARDO LIMA; RAABE, ARMIN; DE ARAÚJO, JOSÉ CARLOS. The influence of hydroclimatic conditions and water quality on evaporation rates of a tropical lake. **JOURNAL OF HYDROLOGY**, v. 590, p. 125456, 2020.
- DORNELLES, T. F. Análise da alteração do uso do solo em bacias hidrográficas. Dissertação de mestrado, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre – RS. 164p, 2003.

DSD. Drainage Service Department. **Stormwater Drainage Manual: Planning, Design and Management**. 5th. ed. Government of the Hong Kong: Special Administrative Region, Jan. 2018, 193p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos** (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p.

FAUSTINO, J. **Planificación y gestion de manejo de cuencas**. Turrialba: CATIE, 1996. 90p.

LEOPOLD, L. B. Hydrology for Urban Land Planning – A Guidebook on the Hydrologic Effects of Urban Land Use. **U.S. Geological Survey**, Circular, 554, 18. 1968.

LIMA, J. P.; MARQUES, A. S.; SOUZA, J.; SIMÕES, N. E. **Hidrologia urbana – Sistemas de drenagem de águas pluviais**. Lisboa: ERSAR – Universidade de Coimbra, 2013. 147 p.

LOPES, José W.B.; JOSÉ, C. de Araújo. Simplified Method for the Assessment of Siltation in Semiarid Reservoirs Using Satellite Imagery. *Water*, v.11, n. 5: 998. 2019.

MAKSIMOVIC, C. **General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. Urban Drainage in Specific Climates (IHP-V-Technical Documents in Hydrology)**. Paris: UNESCO, Vol.1, n.40, p.1-21, 2001.

MARTINS, F. B. et al. Zoneamento Ambiental da sub – bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS). Estudo de caso. *Cerne*, Lavras, v.11, n.3, p.315-322, jul./set. 2005.

MARTINS, R. L. Obras de Macrodrenagem. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. B. (Org.). **Drenagem Urbana**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995, Cap. 5, p. 167-200.

MEIRELES, Antônio Jeovah de Andrade; DANTAS, Eustógio Wanderley Correia; VICENTE DA SILVA, Edson. **Parque Nacional de Jericoacoara: trilhas para a sustentabilidade**. Coleção Estudos Geográficos/IABS, n.11. Fortaleza: Edições UFC, 157 p., 2011.

MESQUITA, J. B. F.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na vertente marítima de Fortaleza, Ceará. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 25, p. 205-216, 2020.

MOLLE, François. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Recife, SUDENE/DPG/PRN/GT.HME, 1989. 175p. il. (Brasil.SUDENE.Hidrologia, 25).

NIEMI, T. J.; KOKKONEN, T.; SILLANPÄÄ, N.; SETÄLÄ, H.; KOIVUSALO, H. Automated Urban Rainfall-Runoff Model Generation with Detailed Land Cover and Flow Routing, [S.l.], *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 24, n. 5, fev. 2019.

O MUNICÍPIO: Dados do município. **Prefeitura Jijoca de Jericoacoara**, c2021. Disponível em: < <https://www.jjocadejericoacoara.ce.gov.br/omunicipio.php>>. Acesso em: 02 de jul. de 2021.

RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v.57, n.4. p. 241 -262, 2003.

REIG, E.; BOUCHER M. A.; TREMBLAY, É. (2020). **Ensemble hydrological forecasts for reservoir management of the Shipshaw River catchment using limited data**. Canadian Water Resources Journal, 45(4), 372–390.

ROCHA, M. J. D.; PEREIRA, S. P.; LIMA NETO, I. E. Integração do SWMM e ferramentas SIG para modelagem hidrológico-hidráulica de bacia complexa. **ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ONLINE)**, v. 26, p. 451-459, 2021.

ROCHA, Maria de Jesus Delmiro. Aplicação do SWMM para Modelagem Hidrológico-Hidráulica em uma Grande Bacia de um Rio Costeiro. 2019. 62 f. TCC (Graduação em Engenharia Civil) - **Universidade Federal do Ceará**, Fortaleza, 2019.

ROCHA, S. M. G.; MESQUITA, J. B. F.; LIMA NETO, I. E. MODELAGEM HIDRODINÂMICA E AVALIAÇÃO DO DECAIMENTO DO FÓSFORO EM UM LAGO URBANO HIPEREUTRÓFICO. **REVISTA AIDIS DE INGENIERÍA Y CIENCIAS AMBIENTALES**, v. 13, p. 530, 2020.

SANTANA, D. P. **Manejo Integrado de Bacias Hidrográficas**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2003. 63p. (Embrapa Milho e Sorgo. Documentos, 30).

SEMACE. **RELATÓRIO FINAL DE CARACTERIZAÇÃO AMBIENTAL E DOS MAPEAMENTOS**. REESTRUTURAÇÃO E ATUALIZAÇÃO DO MAPEAMENTO DO PROJETO ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO CEARÁ – ZONA COSTEIRA E UNIDADES DE CONSERVAÇÃO COSTEIRAS. FORTALEZA, NOV. 2016.

SWMM. Storm Water Management Model – **User’s Manual**. U. S. Environmental Protection Agency, EPA, Cincinnati, jul. 2010.

TONNELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. 2005. 69p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

TSENG, CHUN-WEI; CHEN, CHI-FENG; WU, YI-RU; LIN, JEN-YANG. Application of a stormwater management model (SWMM) to assess the water resource conservation capability in the deji reservoir watershed, **Taiwan Journal of Forest Science**, v. 35, n. 2, p. 103-121, 2020.

TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia Ciência e Aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2004, 943p.

TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L.; BARROS, M. T. B. (Org.). **Drenagem Urbana**. 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 1995, 428p.

UNIDADES DE CONSERVAÇÃO NO BRASIL. **APA Jericoacoara**, c2021. Disponível em: <<https://uc.socioambiental.org/pt-br/arp/979>>. Acesso em: 02 de jul. de 2021.

US EPA (2019). BASINS 4.5 (Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources) Modeling Framework. **National Exposure Research Laboratory**, RTP, North Carolina. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-03/documents/basins4.5coremanual.2019.03.pdf>. Accessed 02 jul. 2021.

VISSMANN; KNAPP; HARBAUGH (1977), **Introduction to hydrology**, 2ª edição, New York, Harper and Row, 704 p.

VON SPERLING, Marcos. **Estudos de Modelagem da Qualidade da água de rios**. 1 Ed. Belo Horizonte, 2007, 588p.

ZAFFANI, A. G. **Poluição difusa da drenagem urbana com base ecohidrológica: Diagnóstico atual e cenários de longo prazo em bacias urbanas em São Carlos, SP**. 2012. 174f. Dissertação (Mestrado em Ciências-Engenharia Hidráulica e Saneamento), Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.