UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS

CENTRO DE TECNOLOGIA

ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

Mateus Marinho Normande

Avaliação do impacto ambiental da subsidência na Lagoa Mundaú na produtividade de Sururu

Maceió

2023

Mateus Marinho Normande

Avaliação do impacto ambiental da subsidência na Lagoa Mundaú na produtividade de Sururu

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientador: Professor Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior

Maceió

2023

Catalogação na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

N847a Normande, Mateus Marinho.
Avaliação do impacto ambiental da subsidência na Lagoa Mundaú na produtividade de sururu / Mateus Marinho Normande. – Maceió, 2022.
32 f. : il. color.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.
Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental e Sanitária) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Maceió, 2022.

Bibliografia: f. 31-32.

1. Sururu. 2. Salinidade. 3. Subsidência. I. Título.

CDU: 551.244

Folha de Aprovação

AUTOR: MATEUS MARINHO NORMANDE

Avaliação do impacto ambiental da subsidência na Lagoa Mundaú na produtividade de Sururu

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

gov.br Documento assinado digitalmente
CARLOS RUBERTO FRAGOSO JUNIOR
Data: 10/02/2023 16:17:32-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Professor Dr. Carlos Ruberto Fragoso Júnior - Universidade Federal de Alagoas (Orientador)

Banca Examinadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
MARLLUS GUSTAVO FERREIRA PASSOS DA
Data: 09/02/2023 17:56:03-0300
Verifique em https://verificador.iti.br

Professor Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos Das Neves - Universidade Federal de Alagoas

VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZA:02902933673
Assinado digitalmente por VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZA:02902933673
ND: C=BR, O=ICP-Brasil, OU=presencial, OU=00489828000137, OU=Secretaria da Receita Federal do Brasil - RFB, OU=ARMPDG, OU=RFB e-CPF A3, CN=VLADIMIR CARAMORI BORGES DE SOUZA:02902933673
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização:
Data: 2023.02.10 16:06:38-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 12.1.0

Professor Dr. Vladimir Caramori Borges De Souza - Universidade Federal de Alagoas

RESUMO

O sururu, espécie de mexilhão nativa da Lagoa Mundaú e reconhecida como Patrimônio Cultural do Estado de Alagoas, é a principal fonte de alimento e de renda da população que vive próximo a Lagoa, também é consideravelmente sensível a mudanças de salinidade em seu ambiente. Já a salinidade no estuário depende de muitos fatores e um deles é a morfologia da laguna, no caso de uma eventual alteração no fundo da Lagoa, aumentando sua profundidade, os níveis de salinidade do estuário se afetariam. Sabendo que existe um processo de subsidência acontecendo nas margens da Lagoa, possivelmente causado por extração mineral de sal-gema e abalos sísmicos, que também ocorreram na área da Lagoa Mundaú, levanta-se a necessidade de investigação desse fenômeno e seu possível impacto na salinidade, e por consequência, na população de sururu. Este trabalho pretende estimar possíveis cenários, diferentes períodos de tempo, para o caso de estar ocorrendo um afundamento na região da laguna e como isso afeta a população e produção de sururu.

Palavras-chave: Sururu; Salinidade; Subsidência.

ABSTRACT

The sururu, a species of mussel native to Lagoa Mundaú and recognized as Cultural Heritage of the State of Alagoas, is the main source of food and income for the population that lives near the lagoon, and is also considerably sensitive to changes in salinity in its environment. The salinity in the estuary depends on many factors and one of them is the morphology of the lagoon, in the case of an eventual alteration in the bottom of the Lagoon, increasing its depth, the salinity levels of the estuary would be affected. Knowing that there is a process of subsidence taking place on the shores of the Lagoon, possibly caused by mineral extraction of rock salt and earthquakes, which also occurred in the area of Lagoa Mundaú, there is a need to investigate this phenomenon and its possible impact on salinity, and consequently, in the sururu population. This work intends to estimate possible scenarios, different periods of time, in case there is a sinking in the lagoon region and how this affects the population and production of sururu.

Palavras-chave: Sururu; Salinity; Subsidence.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização Lagoa Mundaú 9
Figura 2: Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno 10
Figura 3: Mapa ilustrativo da área afetada pela subsidência 11
Figura 4: Sismos x Cavidade nas minas de extração de sal-gema (raio médio) 11
Figura 5: Evolução temporal da salinidade de uma laguna 13
Figura 6: Distribuição espacial da salinidade de uma laguna 13
Figura 7: Resultados do modelo de população para uma entrada de salinidade simulada no período de 1974 a 1979. 15
Figura 8: Fluxograma de atividades 16
Figura 9: Mapa de integração dos processos de instabilidade do terreno 17
Figura 10: Mapa do espelhamento da deformação 18
Figura 11: Mapa de estimativa do efeito da subsidência na Lagoa Mundaú 19
Figura 12: Representação da geometria do projeto na Lagoa Mundaú 21
Figura 13: Gráfico da condição de contorno da contribuição da vazão do rio na laguna. 22
Figura 14: Gráfico da condição de contorno do nível da maré na desembocadura 23
Figura 15: Gráfico de nível na estação Coqueiro Seco (observado e simulado) 24
Figura 16: Regressão linear do nível na estação (Observado x Simulado) 24
Figura 17: Representação das condições iniciais de salinidade 26
Figura 18: Representação dos grupos de seções e as 5 selecionadas 27
Figura 19: Diagrama de caixa das médias de salinidade nos cenários 30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7
2 OBJETIVOS 8
2.1 Objetivo Geral 8
2.2 Objetivos Específicos 8
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 9
3.1 Área de estudo 9
3.2 Subsidência na área de estudo 10
3.3 Modelagem da população de sururu e sua relação com a salinidade 12
3.3.1 Modelagem da salinidade 12
3.3.2 Modelagem populacional de sururu 14
4 MÉTODOS 16
4.1 Cenários avaliados 16
4.2 Dados utilizados 16
4.3 Definição da estimativa de subsidência na Lagoa Mundaú 17
4.4 Simulação espacial de salinidade 20
4.4.1 Geometria 20
4.4.2 Modelagem Hidráulica 22
4.4.3 Calibração do Modelo 23
4.4.4 Simulação de Salinidade 25
4.5 Projeções de população de sururu 28
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES 29
6 CONCLUSÃO 31
REFERÊNCIAS 32

1 INTRODUÇÃO

O Sururu, molusco bivalve de nome cientifico *Mytella falcata*, tem um impacto cultural e econômico de grande importância para o estado, sendo a principal fonte de alimento e renda de famílias que residem a região em torno da Lagoa Mundaú (NUNES et al., 2021). Além disso, é considerado um patrimônio cultural e imaterial do estado de Alagoas e uma atração turística (ALAGOAS, 2022).

De acordo com Nunes et al. (2021) o Sururu é uma espécie que, reage a mudanças sensíveis de salinidade, ou seja, diferente das outras variáveis ambientais importantes, a salinidade serve como um limiar para o crescimento da população. Sabendo disso, é preocupante a situação do mexilhão quanto ao fenômeno de subsidência, pois as possíveis alterações no nível da Lagoa podem acarretar numa alteração nos índices de salinidade e por consequência afetar a população de Sururu.

Tendo em vista que os estudos disponíveis sobre a subsidência não abordam questões como o afundamento na área da Laguna, ou seja, ainda não há previsões ou estimativas para uma possível mudança na profundidade. Vê-se a necessidade de um estudo de cenarização que investigue o impacto da subsidência na Lagoa Mundaú e as consequências para a população de Sururu.

Uma das soluções para analisar tal impacto é a modelagem, que consiste na utilização de equações matemáticas para simular os fenômenos relevantes ao sistema de interesse. No caso, é necessário um modelo hidráulico que apresente equações de salinidade e que se utilize da morfologia da Lagoa Mundaú, para isso, o HEC-RAS, software de modelagem hidráulica, é ideal por ser uma ferramenta já comumente utilizada para modelagem da área de estudo.

Entretanto o modelo hidráulico não é capaz de estimar a diferença de profundidade causada pela subsidência, então é preciso de outra ferramenta para realizar tal estimativa. Para isso, um sistema de informação geográfica possibilita a realização de uma extrapolação dos dados espaciais de diferença de nível nas margens e determinar a diferença de nível na lagoa.

Ademais, um estudo de uma universidade sueca em conjunto com a Ufal apresenta o desenvolvimento de um modelo que relaciona as mudanças de valores de salinidade com a população de Sururu (NUNES et al., 2021), logo, é importante para estimar a população de Sururu a partir da variação de salinidade provocada pela subsidência.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do trabalho é avaliar o impacto da subsidência na salinidade e na população de Sururu, com projeções de 1, 5 e 10 anos.

2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

a) Realizar uma estimativa de diferença de profundidade na Lagoa Mundaú devido a subsidência;
b) Avaliar alterações na distribuição espacial de salinidade na Lagoa Mundaú provocadas pela mudança de profundidade.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Área de estudo

O Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM) é composto por duas Lagunas conectadas por um canal, e está situado no litoral de Alagoas, entre as latitudes 9°35'(S) e 9°47'(S) e longitudes 35°44'(W) e 35°58'(W). A Laguna Manguaba possui uma área estimada de 42km², já a Laguna Mundaú, de aproximadamente 27 km², enquanto o sistema de canais estreitos que conecta as duas lagunas possui 12km² e possui somente uma única entrada de maré com largura de 250 m no Oceano Atlântico (Lins et al., 2013; Jucá, 2020)

Embora faça parte do complexo a Laguna Manguaba não será analisada nesse estudo, já que as duas lagunas são governadas por hidrodinâmicas independentes (NUNES et al., 2020). A Laguna Mundaú se encontra diretamente próxima da região metropolitana de Maceió (Figura 1), sua proximidade e localização das áreas afetadas pela subsidência levam a suspeitas de possíveis alterações morfológicas em sua área.

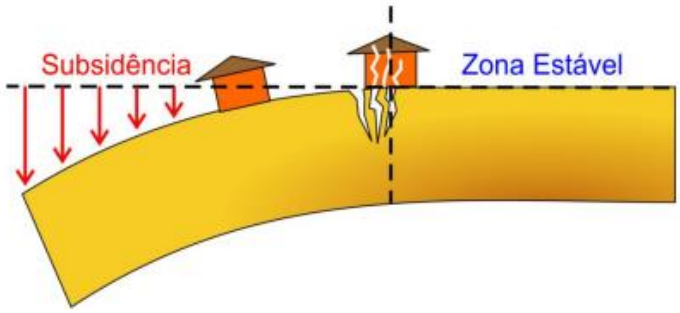
Figura 1: Localização Lagoa Mundaú

Fonte: Brasil, 2019

3.2 Subsidência na área de estudo

A subsidência do solo envolve o assentamento da superfície do solo e pode afetar grandes áreas. As edificações civis nessas áreas nem sempre resistem a essas deformações verticais, podendo sofrer graves danos estruturais, exemplado na Figura 2 (HERRERA et al., 2007).

Figura 2: Esquema ilustrativo do processo de subsidência e danos causados na superfície do terreno



Fonte: Brasil, 2019

O bairro de Pinheiro, em Maceió, historicamente apresenta rachaduras e afundamentos em moradias e ruas públicas, tendo esse fenômeno intensificado por chuvas e abalos ocorridos em 2018 (Brasil, 2019).

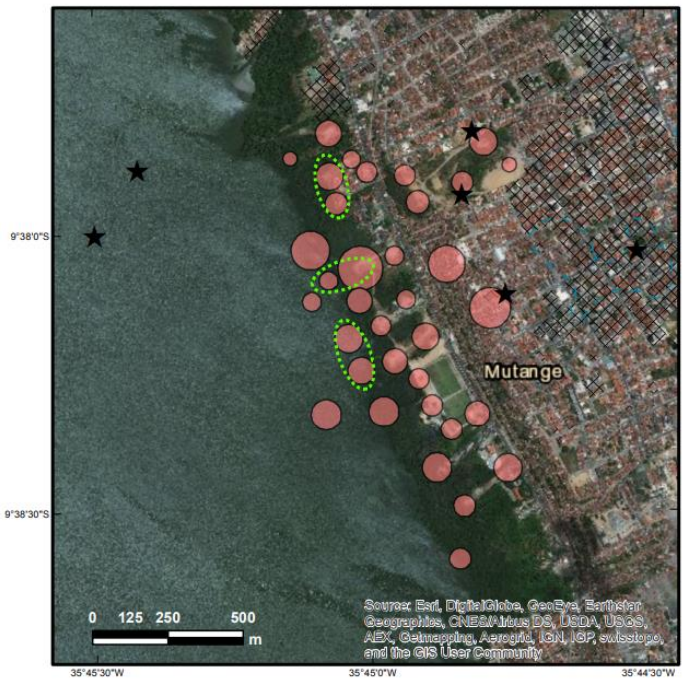
O relatório técnico de estudo de instabilidade do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) concluiu que está ocorrendo uma desestabilização das cavidades provenientes da extração de sal-gema, provocando movimento do sal (halocinese) e, por consequência, reativa estrutura geológicas preexistentes, causa subsidência e deformações rúpteis em superfície. Além disso, outra conclusão é de que a presença de bacias endorreicas, erosão do solo e falta de um sistema de drenagem efetivo na região também contribui para o fenômeno de instabilidade e subsidência.

Figura 3: Mapa ilustrativo da área afetada pela subsidência

Fonte: Autor, 2022

Assim, considerando que existem minas (representado por círculos na Figura 4) e dois dos hipocentros de sismos (representado por estrelas na Figura 4) localizados dentro da Lagoa, é natural o interesse por uma investigação do impacto desse fenômeno na área de estudo.

Figura 4: Sismos x Cavidade nas minas de extração de sal-gema (raio médio)



Fonte: Brasil, 2019

3.3 Modelagem da população de sururu e sua relação com a salinidade

3.3.1 Modelagem da salinidade

O modelo de Nunes et al. (2021) é importante para entender a relação entre salinidade e sururu, sendo composta inicialmente pela modelagem da distribuição espacial de salinidade, dada pela equação 01:

$$s(x) = s_o \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^m \quad (01)$$

Onde:

s é o valor da salinidade;

s_o é a salinidade do mar;

L é a extensão da laguna;

x é um ponto na extensão da laguna;

m é um parâmetro para taxa do aumento da salinidade (eq. 02).

A equação demonstra uma salinidade s = 0 quando x = 0 (água doce) e s = s_o quando x = L (água salgada), correspondendo respectivamente as contribuições do rio e da maré (NUNES et al., 2021).

Já a equação 03 representa uma solução analítica para a evolução da salinidade no tempo, e ao relacionar com as equações 01, 02 e 03 temos enfim a equação de distribuição espacial de salinidade (equação 04):

$$m = \frac{s_o}{s_{méd}} - 1 \quad (02)$$

$$s_{méd}(t) = s_o \cdot (1 - \exp(-t/T)) \quad (03)$$

$$s(x,t) = s_o \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^{\left((1-\exp(-t/T))^{-1}-1\right)} \quad (04)$$

Onde:

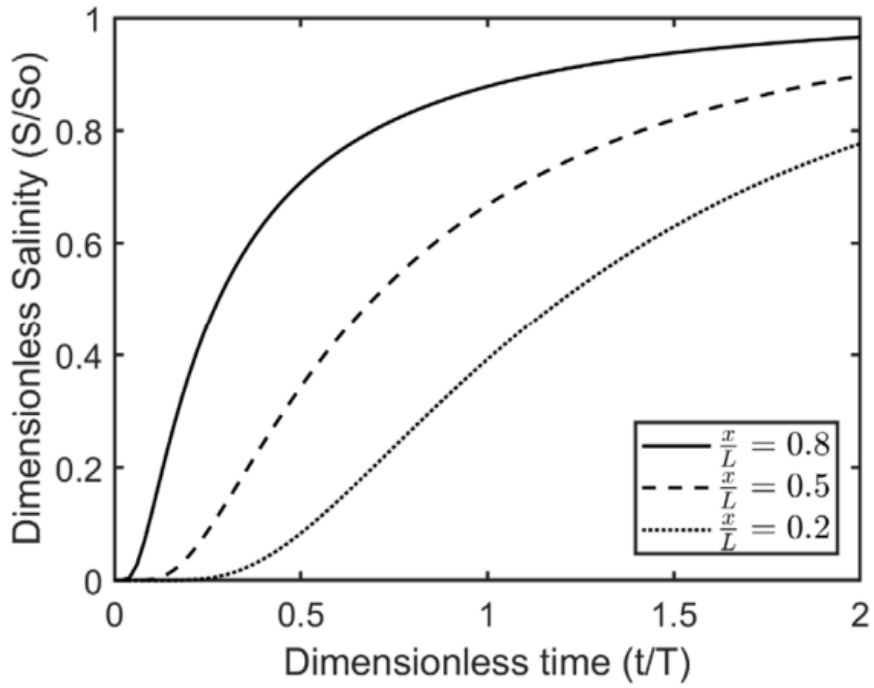
t é o tempo;

T é a razão entre o volume da laguna (V) e a vazão de renovação de água (Q_o).

A Figura 5 ilustra como a salinidade evolui com o tempo em locais selecionados na lagoa, enquanto a Figura 6 mostra a distribuição espacial em momentos selecionados. Em ambos os casos, a aproximação a uma lagoa com s = s_o em todos

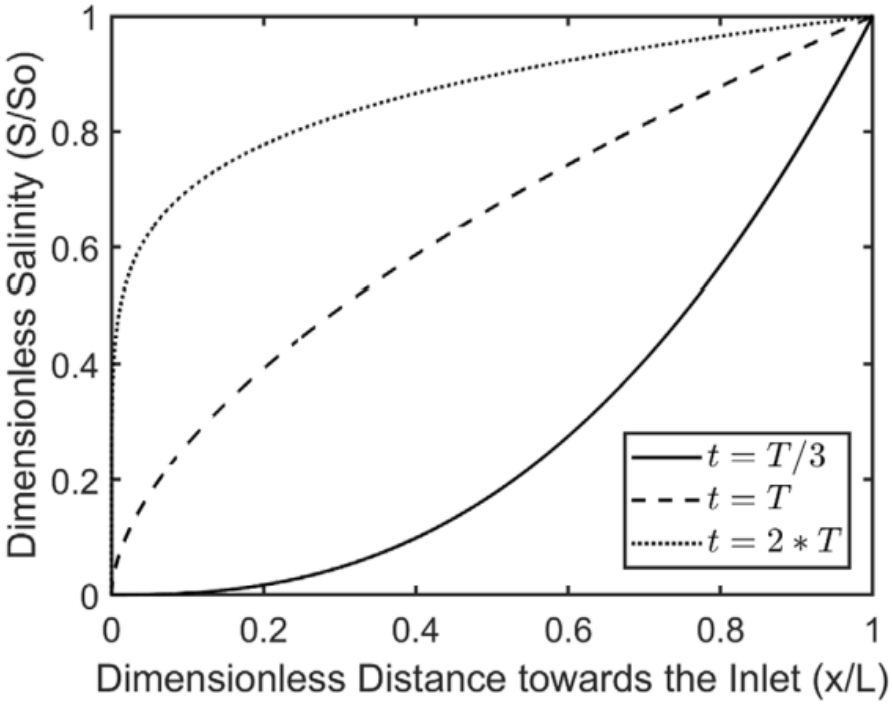
os lugares é claramente exibida, mas onde locais mais a montante atingem a salinidade de equilíbrio em momentos posteriores (NUNES et al., 2021).

Figura 5: Evolução temporal da salinidade de uma laguna



Fonte: Nunes et al., 2021

Figura 6: Distribuição espacial da salinidade de uma laguna



Fonte: Nunes et al., 2021

Também, a fim de representar o caso de mudanças de salinidade com variações senoidais para comparar a reação do sururu, tem-se a equação não dimensional:

$$s' = \frac{1}{2} \cdot \left(1 + sen(2 \cdot \pi \cdot t')\right) \quad (05)$$

Onde:
s' é a salinidade (adimensional);
t' é o tempo (adimensional).

3.3.2 Modelagem populacional de sururu

O modelo populacional utilizado no trabalho de Nunes et al. (2021) é definido por duas soluções, uma equação analítica útil para casos simples de mudanças instantâneas na salinidade e calibração dos parâmetros, e uma solução numérica para casos onde a analítica não é aplicável, como a variação senoidal de salinidade (NUNES et al., 2021).

Semelhante a muitos sistemas da natureza, a população (N) se encaminhará para um estado de equilíbrio (Ne). Qualquer desvio que N tiver de Ne, a população ou crescerá ou diminuirá (NUNES et al., 2021). Definindo-se então um coeficiente de crescimento da população (α), temos a equação 06.

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot (Ne - N) \quad (06)$$

Porém, essa equação ainda não considera a salinidade, que é um importante para a manutenção da espécie, então utiliza-se a equação 07 que possui o coeficiente de decrescimento (b), e o parâmetro δ, que está definido pela equação 08.

$$\frac{dN}{dt} = \alpha \cdot (Ne - \delta \cdot N) \quad (07)$$

$$\delta = 1 + \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{s_o}{s} - 1\right)^n \quad (08)$$

Por fim, a solução numérica para essa relação é definida por Nunes et al. (2021) na equação 09:

$$N_{k+1} = N_k + \alpha \cdot \Delta t \cdot (Ne - \delta_k \cdot N_k) \quad (09)$$

Onde:

K é o índice da iteração;

N_k é a população naquela iteração;

N_{k+1} é a população da próxima iteração;

α é o coeficiente de crescimento da população;

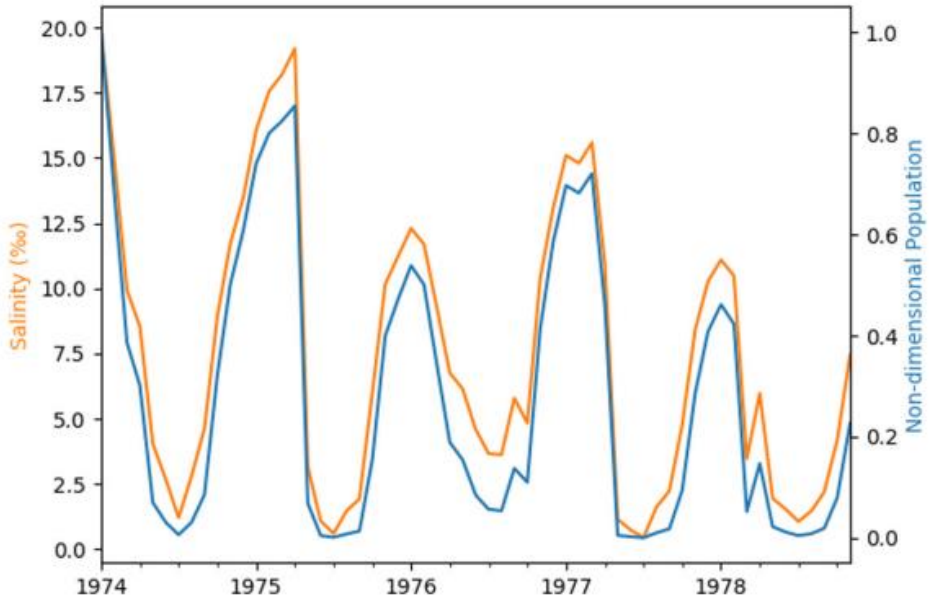
Δt é a variação no tempo;

Ne é a população de equilíbrio;

δ_k é o parâmetro naquela iteração.

Com isso, Nunes et al. simularam a população de sururu a partir do modelo numérico da equação 09 e equação de salinidade 05, tendo como resultado a Figura 7. Nela, é possível observar como o sururu reage diretamente aos níveis de salinidade.

Figura 7: Resultados do modelo de população para uma entrada de salinidade simulada no período de 1974 a 1979.

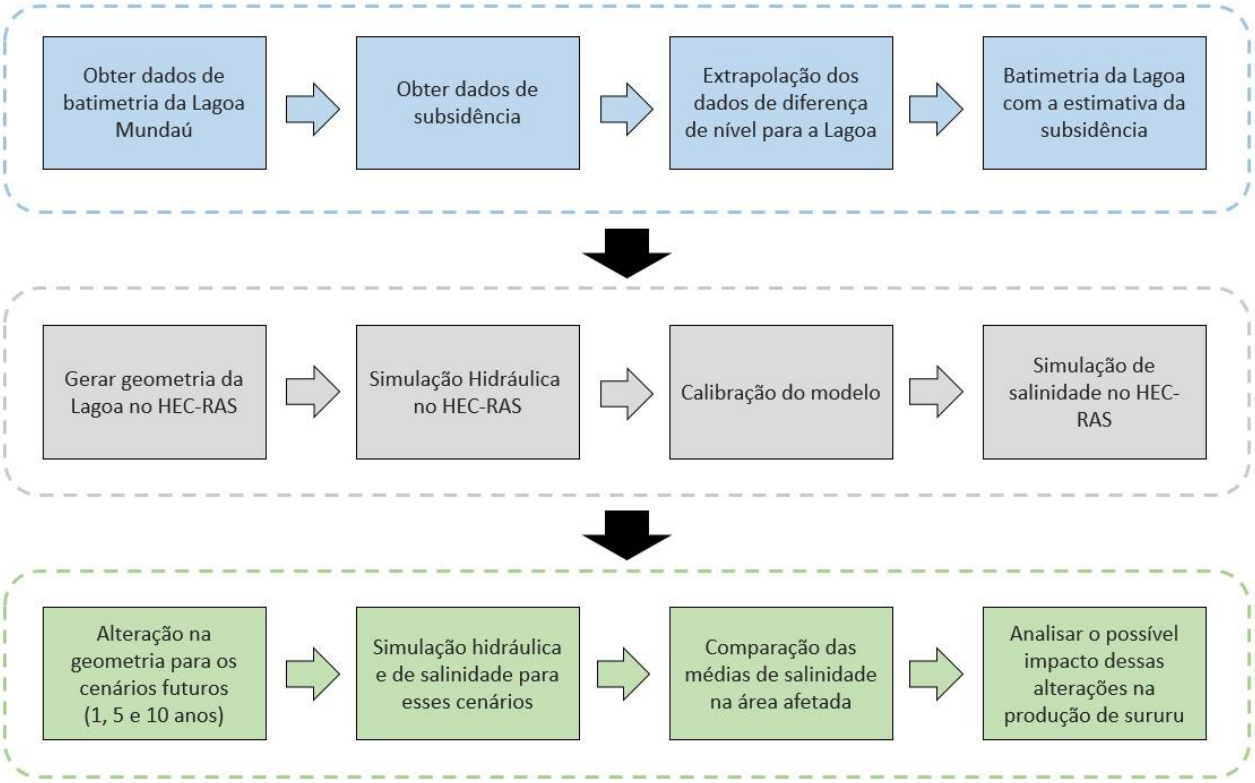


Fonte: Nunes et al., 2021

4 MÉTODOS

O trabalho seguiu as etapas descritas na Figura 8, as quais foram separadas em blocos que correspondem a um objetivo.

Figura 8: Fluxograma de atividades



Fonte: Autor, 2022

4.1 Cenários avaliados

Neste trabalho, foram definidos, a fim de comparação, quatro cenários diferentes, eles são: Antes da subsidência, 1 ano depois, 5 anos depois e 10 anos depois. Neles, todo os processos de simulação hidrodinâmica e de salinidade são os mesmos, somente alterando a batimetria.

Para o cenário antes da subsidência foi utilizado a batimetria da Lagoa medida em 2016, antes de serem registrados os efeitos. Já para os cenários após a subsidência, foi utilizado a batimetria com as modificações da subsidência.

4.2 Dados utilizados

No trabalho foram utilizados dados de batimetria, série temporal de vazão do rio a montante da laguna, série de nível da água em uma estação na laguna e uma série de nível do mar na desembocadura.

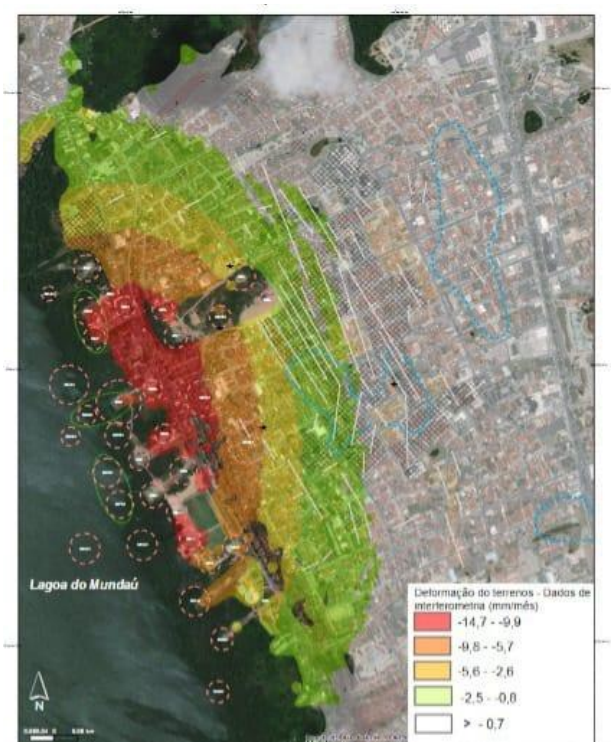
A batimetria foi registrada pela Agência Nacional de Águas (ANA) em 2016, a série temporal de vazão foi obtida de uma estação em Rio Largo – AL, município localizado ao Noroeste de Maceió, em janeiro e fevereiro de 2017. Foi definido esse período no verão pois a salinidade na Lagoa em períodos chuvosos é majoritariamente zero.

A série de nível na Lagoa utilizada para calibração do modelo foi obtida de uma estação em Coqueiro Seco – AL, município localizado na margem da laguna diretamente oposta a Maceió. E a série de nível do mar na desembocadura foi obtida por um modelo de previsão de maré do porto de Maceió.

4.3 Definição da estimativa de subsidência na Lagoa Mundaú

Apesar de ser uma área comumente estudada, a Lagoa Mundaú ainda não possui trabalhos específicos que abordem a questão da subsidência na sua área. Também podemos observar pela Figura 9 que a região com mais deformações de terreno está justamente na margem da Lagoa. O grau de intensidade de deformação do terreno está representado pelas cores no mapa, sendo muito alto (vermelho), alto (laranja), médio (amarelo), baixo (verde) e muito baixo (branco).

Figura 9: Mapa de integração dos processos de instabilidade do terreno

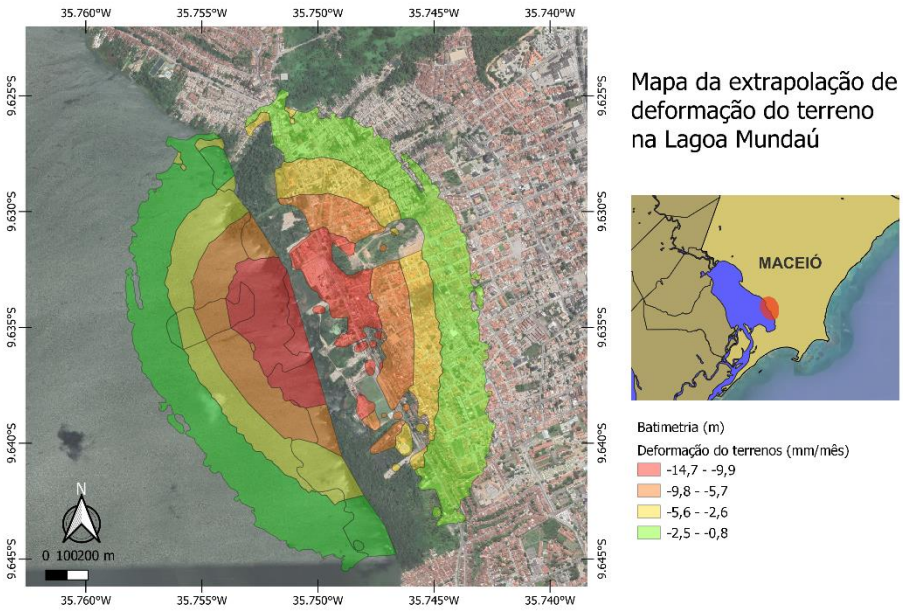


Fonte: Brasil, 2019

Então para a determinação de uma estimativa são necessários os dados de deformação de terreno nas margens para que seja possível uma extrapolação para a Lagoa. Os dados de deformação de terreno seriam, mais especificamente, dados vetoriais e georreferenciados contendo a informação do tamanho da deformação em um determinado local.

Quanto a extrapolação, Bostan et al. (2012) definem a krigagem como um dos melhores métodos de extrapolação espacial, especialmente a krigagem de regressão. Porém, as tentativas de extrapolação pelo QGIS não tiveram resultados satisfatórios devido às limitações computacionais, então pela tendência do formato elíptico, um simples espelhamento da base vetorial pelo Q-GIS é suficiente para gerar uma estimativa (Figura 10).

Figura 10: Mapa do espelhamento da deformação



Fonte: Autor, 2022

Sendo assim, utilizou-se o mapa da Figura 10, para construir novas bases vetoriais que complementam a Figuras 11. Ao analisar os dados de deformação de terreno foi possível notar a tendência de um formato elíptico que se estende até a laguna. Então, supondo simetria, foi realizado um espelhamento da deformação e calculou-se, a partir da taxa de deformação mensal média, as taxas anuais em metros (Tabela 1).

Tabela 1: Taxa e médias de deformação para cada região

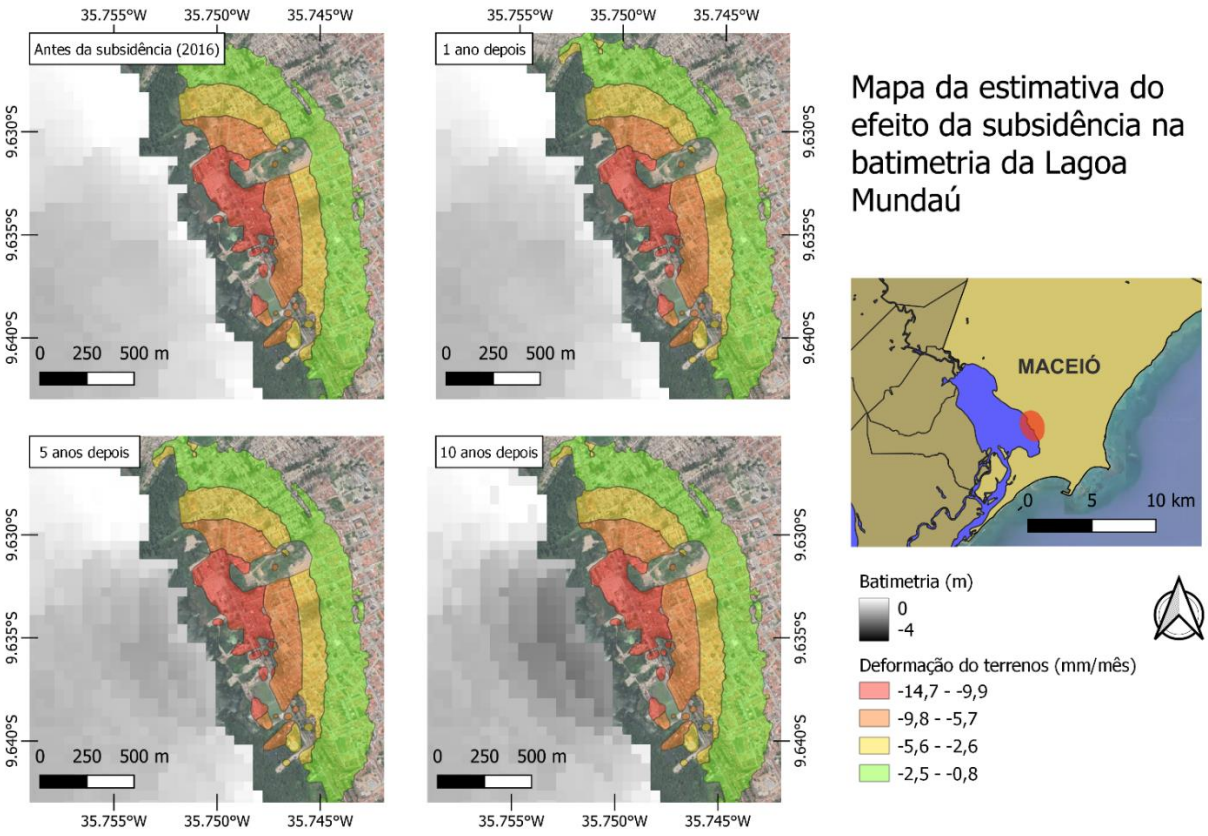
Deformação				
mm/mês	média de mm/mês	média de m/ano	média de m/5 anos	média de m/10 anos
-14,7 a -9,9	-12,3	-0,1476	-0,738	-1,476
-9,8 a -5,7	-7,75	-0,093	-0,465	-0,93
-5,6 a -2,6	-4,1	-0,0492	-0,246	-0,492
-2,5 a -0,8	-1,65	-0,0198	-0,099	-0,198

Fonte: Autor, 2022

As regiões citadas na Tabela 1 correspondem a cada área na Figura 10, exceto a região com o grau de intensidade muito baixo pois seu impacto é irrisório. Também foi considerado a estabilização ocorra após 10 anos (último cenário). Já as taxas anuais correspondem para cada cenário definido, de 1, 5 e 10 anos.

Logo, com as taxas anuais e as bases vetoriais foi possível subtrair o valor de deformação da batimetria, como está demonstrado na Figura 11.

Figura 11: Mapa de estimativa do efeito da subsidência na Lagoa Mundaú



Fonte: Autor, 2022

4.4 Simulação espacial de salinidade

A simulação foi realizada utilizando o *software* HEC-RAS, desenvolvido pelo corpo de engenheiros do exército dos Estados Unidos (USACE), o programa permite realizar, em sua atual versão (6.3), simulações de escoamento não-permanente unidimensional e bidimensional, assim como, transporte de sedimentos, mudança no leito, modelagem de temperatura e qualidade da água (USACE, 2022).

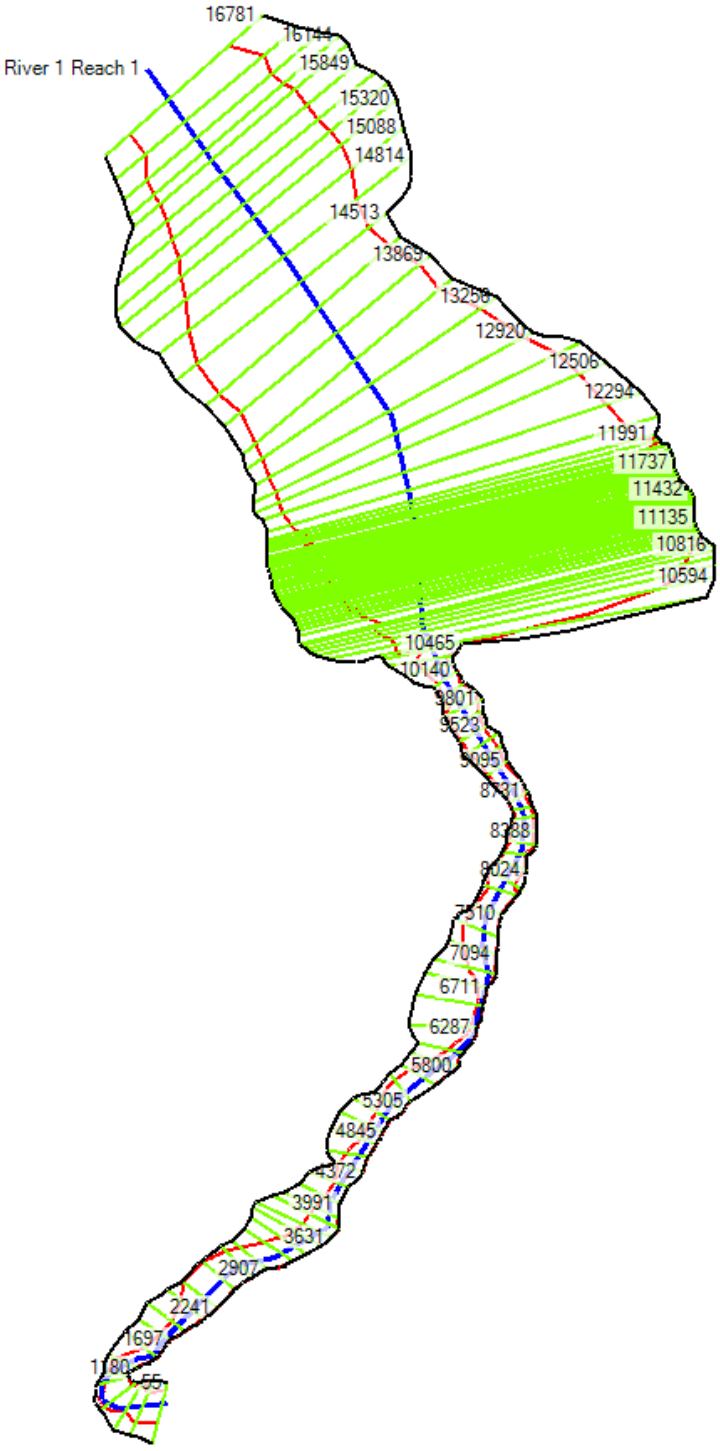
Neste trabalho, foram utilizados os módulos de simulação hidráulica, simulação de qualidade da água para a salinidade, e o Sistema de Informações Geográficas (SIG) integrado de nome “RAS-Mapper" para definição da geometria do projeto.

4.4.1 Geometria

A geometria de um projeto no HEC-RAS pode ser feita de forma unidimensional e bidimensional, porém, na versão usada, o módulo de qualidade de água não poderia ser utilizado para simulações bidimensionais.

Então foi utilizado uma geometria unidimensional (Figura 12), composta pelo “*river*” (linha azul) que representa o caminho principal do rio até o mar, pelos “*bank lines*” (linhas vermelhas) que representam uma divisão no rio onde pode-se adotar diferentes coeficientes de manning, pelos “*flow path*” (linhas pretas) que representam os limites da laguna e, por último, pelas seções transversais (linhas verdes) que são os objetos computacionais a serem simulados, ou seja, os resultados da simulação são dispostos por cada seção transversal.

Figura 12: Representação da geometria do projeto na Lagoa Mundaú



Fonte: Autor, 2022

O espaçamento entre as seções transversais foi definido de acordo com a área de estudo, a fim de otimizar tempo e processamento computacional, a densidade de seções na laguna é menor do que a da área de estudo. No total foram traçadas 130 seções transversais e 48 dessas abrangem a área de estudo.

4.4.2 Modelagem Hidráulica

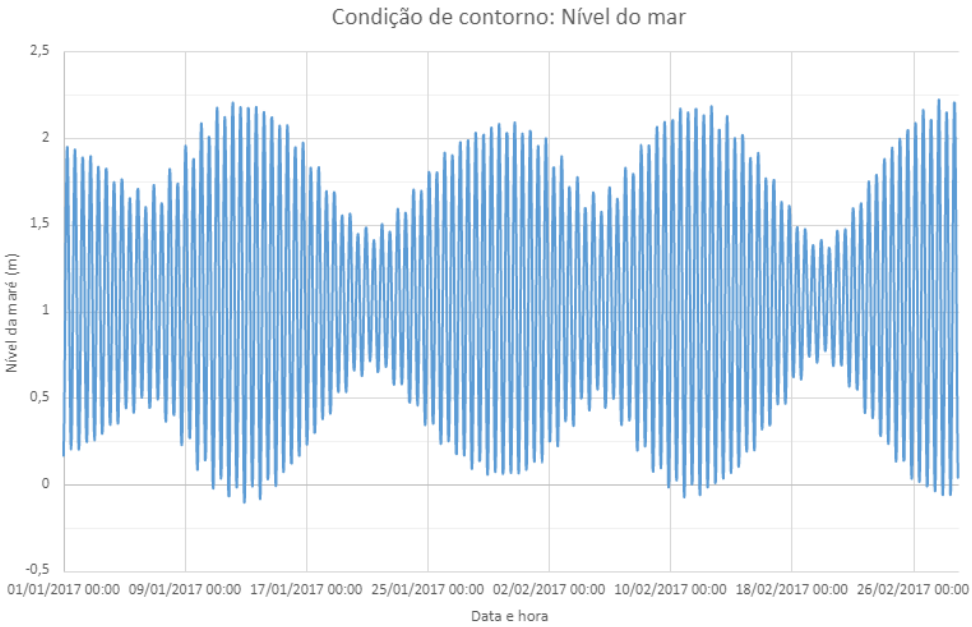
A simulação hidráulica necessita de uma definição do número de manning para a região central, entre as duas *bank* lines, e para as regiões laterais, os valores do número de manning foram posteriormente corrigidos na calibração. Também foi necessária a definição de condições de contorno, onde foi escolhido a vazão do rio a montante da laguna e o nível da maré na desembocadura, justamente por representar as principais contribuições para hidrodinâmica da Lagoa Mundaú.

Os valores de vazões diárias do rio Mundaú e valores horários de nível do mar na desembocadura nos períodos de janeiro e fevereiro de 2017, representados na Figura 13 e 14.

Figura 13: Gráfico da condição de contorno da contribuição da vazão do rio na laguna.

Fonte: Autor, 2022.

Figura 14: Gráfico da condição de contorno do nível da maré na desembocadura

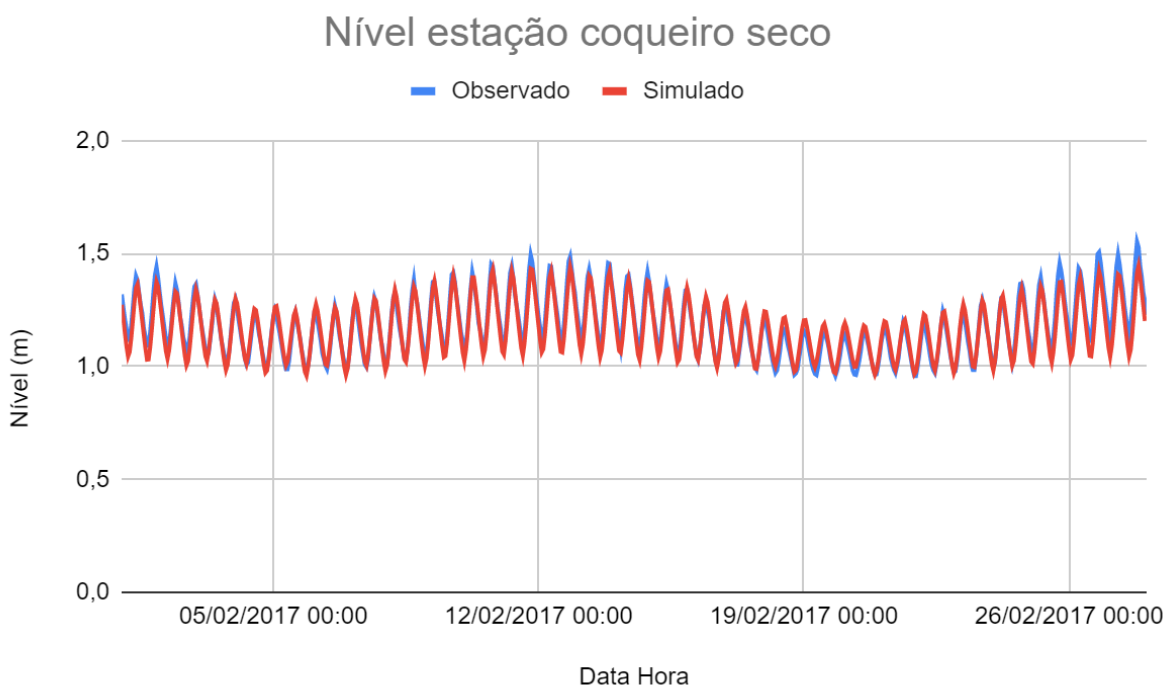


Fonte: Autor, 2022.

4.4.3 Calibração do Modelo

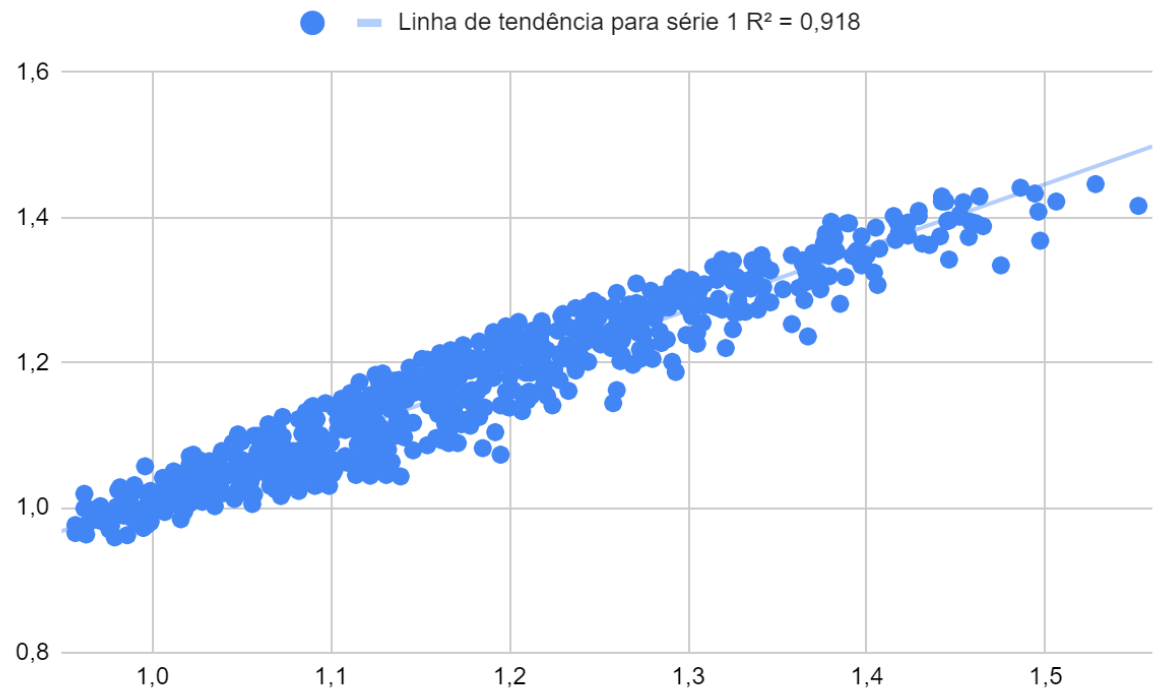
Após a realização da simulação comparou-se os dados de nível de uma estação em Coqueiro Seco – AL com o nível simulado na seção transversal mais próxima (Figura 15) e calculando a linha de tendência e seu coeficiente (Figura 16). A fim de atingir uma correlação satisfatória, pela praticidade foram feitas iterações por meio de tentativa e erro alterando os valores de manning, resultando assim nos valores de 0,015 na região central e de 0,025 nas laterais.

Figura 15: Gráfico de nível na estação Coqueiro Seco (observado e simulado)



Fonte: Autor, 2022.

Figura 16: Regressão linear do nível na estação (Observado x Simulado)



Fonte: Autor, 2022.

4.4.4 Simulação de Salinidade

A modelagem espacial de salinidade é feita no módulo de qualidade de água no HEC-RAS. Como não há uma função específica para salinidade foi preciso criar um constituinte arbitrário para representar o sal. Depois foram definidas duas condições de contorno, uma na saída do rio para a laguna e outra na desembocadura, com salinidades nos valores de 0 e 35 (‰) respectivamente.

O programa calcula a dispersão de salinidade usando o esquema numérico explícito "*QUICKEST-ULTIMATE*", interpolação quadrática descrita por Leonard, 1979 e Leonard, 1991, para resolver a equação unidimensional de advecção-dispersão (USACE, 2022). Já para o cálculo do coeficiente de dispersão, o HEC-RAS utiliza a equação 10, baseada na equação de Fischer (1979):

$$D = 0{,}011 \cdot \frac{u^2 \cdot w^2}{y \cdot u'} \tag{10}$$

Onde:

u é a velocidade média na seção em m/s;

w é largura média da seção em m;

y é a profundidade média da seção em m;

u' é a velocidade de cisalhamento em m/s.

E a velocidade de cisalhamento é calculada com a seguinte equação:

$$u' = \sqrt{g \cdot d \cdot S} \tag{11}$$

Onde:

g é a constante gravitacional: 9,81 m/s²;

d é a profundidade média da seção em m;

S é a inclinação de fricção (adimensional).

Além disso, é necessário definir dois limites para coeficiente de dispersão, um inferior e um superior. Foi escolhido 0 como limite inferior pois não existe coeficiente negativo e zero é o menor possível, e para o limite superior foi escolhido 15 por representar um limite inalcançável, assim a margem de valor do coeficiente é a maior possível.

Figura 17: Representação das condições iniciais de salinidade

Fonte: Autor, 2022

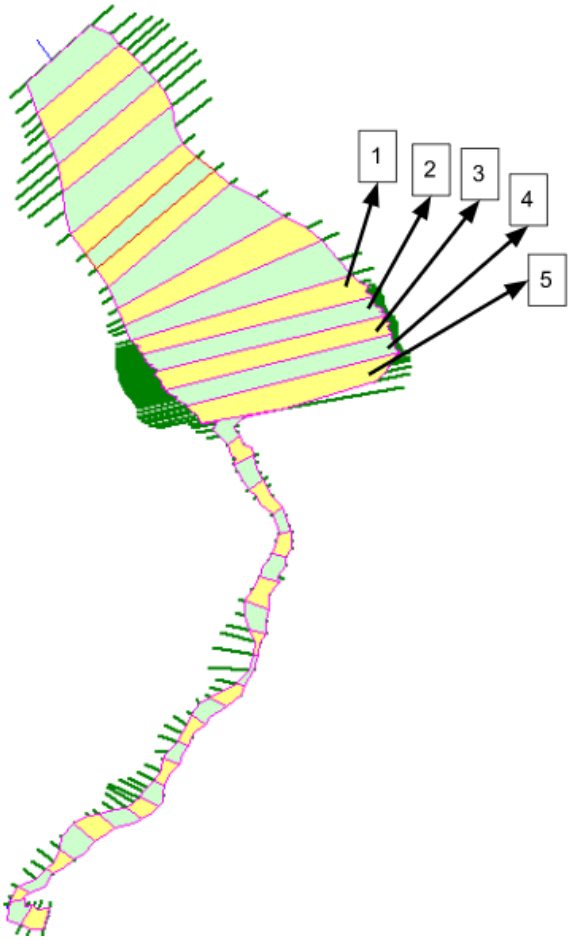
Na execução da simulação, o próprio software agrupa as seções transversais nos resultados, assim, foram selecionados os 5 grupos (Tabela 2) que representam a área de estudo (Figura 18). Para cada trecho foi calculado um valor de salinidade em intervalos de 15 minutos pelo período da simulação, janeiro e fevereiro de 2017.

Tabela 2: Id do intervalo das seções transversais de cada trecho

Área analisada (id)	Intervalo de seções transversais (id)
1	12105 - 11796
2	11796 - 11483
3	11483 - 11163
4	11163 - 10850
5	10850 - 10506

Fonte: Autor, 2022

Figura 18: Representação dos grupos de seções e as 5 selecionadas



Fonte: Autor, 2022

Os dados exportados da simulação foram dispostos conforme a Tabela 3. Também vale ressaltar que no início da simulação a salinidade passa por uma brusca alteração para sair da condição inicial e se estabilizar. Então foi desconsiderado o primeiro dia da simulação (primeiro de janeiro)

Tabela 3: Disposição dos dados de salinidade exportados

Trecho 1	Time	Salinidade (‰)	Média (‰)
97	02jan.2017 00:00:00	30,87	27,30639
98	02jan.2017 00:15:00	30,61	
99	02jan.2017 00:30:00	30,33	
100	02jan.2017 00:45:00	30,06	
101	02jan.2017 01:00:00	29,79	
102	02jan.2017 01:15:00	29,51	
103	02jan.2017 01:30:00	29,24	
	...		

Fonte: Autor, 2022

Para avaliação dos dados foram feitos gráficos de variação da salinidade no tempo para cada trecho e um gráfico de caixa com as médias de cada grupo.

Alguns passos da simulação foram refeitos para os outros cenários e a geometria foi reaproveitada com as alterações no terreno para estar de acordo com o cenário. O processo de calibração não foi necessário e os de modelagem hidráulica e de salinidade ocorreram da mesma forma. Assim, os gráficos de caixa de cada cenário foram comparados para analisar as alterações de salinidade.

4.5 Projeções de população de sururu

O modelo de Nunes et al. (2021) da relação entre salinidade e a população de sururu, como o próprio estudo afirma, é representativo da área de estudo, sendo confiável, utilizável em regiões onde não há grande disponibilidade de dados de distribuição e de densidade de sururu. Porém, a aplicação de tal modelo não é apropriada para uma análise quantitativa, mas sim comparativa entre os cenários.

Então, apesar das limitações da simulação da população de sururu, ainda é possível discutir o efeito da subsidência baseado somente na salinidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A extrapolação para a laguna da região de subsidência tem como resultado uma estimativa da área afetada, como é possível observar na Figura 10. Além disso, esta estimativa possibilita gerar cenários e impactos diferentes na região (Figura 11).

Com a utilização do programa HEC-RAS para simulação tanto hidrodinâmica quanto de salinidade, tem-se como resultado dados temporais de salinidade (exemplados na Tabela 3) categorizado por trechos na Lagoa. A área de estudo é composta por 5 desses trechos ilustrados na Figura 18.

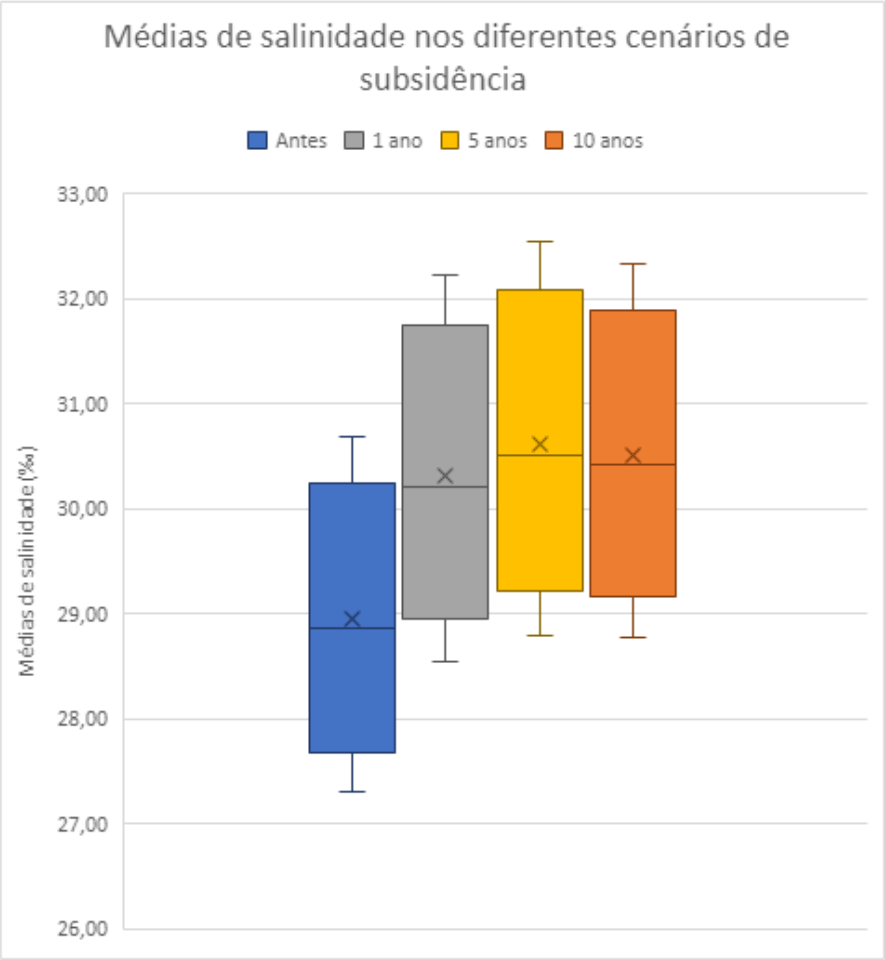
A avaliação da população de sururu depende principalmente da salinidade, na Tabela 4 podemos notar a diferença tanto entre os cenários quanto entre os trechos da área. Logicamente, os trechos mais próximos do rio possuem menores índices do que os mais distantes e também é notável que a diferença entre os trechos permanece próxima de 0,8 e 1,0.

Tabela 4: Médias de salinidade nas áreas para os quatro cenários

Trecho id	Médias de salinidade (‰)			
	Antes	1 ano	5 anos	10 anos
1	27,31	28,55	28,80	28,77
2	28,06	29,34	29,62	29,57
3	28,87	30,20	30,52	30,43
4	29,81	31,28	31,62	31,45
5	30,68	32,23	32,55	32,34

Fonte: Autor, 2022

Figura 19: Diagrama de caixa das médias de salinidade nos cenários



Fonte: Autor, 2022

Já a diferença entre os cenários, o maior salto de salinidade ocorre no primeiro ano e nos anos seguintes passam por uma estabilização (Figura 19). Esses efeitos provavelmente se devem, mesmo com o efeito da subsidência, às baixas velocidades e fluxo d'água na região, já que o trecho mais afetado é mais o próximo da entrada do canal da laguna.

Outro fator importante é que por ser uma geometria unidimensional, esses dados e trechos não refletem somente a área afetada pela subsidência, mas toda a extensão de uma margem a outra.

Quanto ao sururu, possui uma sensibilidade para a salinidade em valores menores que 2‰ e maiores que 35‰, para este caso, comparando com os resultados do modelo de Nunes et al. (2021), é notável que uma mudança 1,50‰ que não seja próxima dos limites populacionais de salinidade, não surtirá efeito significativo na população.

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram desenvolvidas estimativas para o efeito da subsidência na Laguna que podem ser comparadas com batimetrias no futuro. Também deve-se levar em consideração que as estimativas são baseadas em um efeito linear de subsidência. Por fim, percebe-se a importância da realização de uma nova batimetria na Lagoa, a fim de se observar alguma mudança real e o impacto dela.

Embora os resultados dos cenários mostrem alterações no nível de sal, demonstram uma mudança na salinidade que não chega ser suficiente para inferir uma queda ou aumento na quantidade de sururu. Considerando o tamanho da área afetada em relação ao total da Lagoa Mundaú, é possível concluir que um efeito de subsidência nas margens da laguna não deve interferir na população do molusco.

Vale ressaltar que este é um trabalho de cenarização que depende de diferentes fatores que possuem algum nível de incerteza que podem afetar o resultado final. A extrapolação da subsidência na Lagoa, limitações da simulação no HEC-RAS, tanto pela geometria ser unidimensional quanto pela modelagem de salinidade.

Sendo assim, é interessante que, para projetos futuros, se faça uma nova medição da batimetria a fim de reduzir as incertezas quanto ao processo de subsidência na laguna.

REFERÊNCIAS

ALAGOAS. Estado de Alagoas. Secretaria de Estado da Cultura. **Sururu**: patrimônio cultural. Patrimônio Cultural. Disponível em: http://www.cultura.al.gov.br/politicas-e-acoes/patrimonio-cultural/principal/textos/livro-de-registro/sururu. Acesso em: 10 fev. 2022.

BRASIL. Serviço Geológico do Brasil - Cprm.. Ministério de Minas e Energia. **Estudos sobre a instabilidade do terreno nos bairros Pinheiro, Mutange e Bebedouro, Maceió (AL)**: ação emergencial no bairro pinheiro. Brasília: Cprm, 2019. 3 v. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/imprensa/pdf/relatoriosintese.pdf. Acesso em: 07 fev. 2022.

BOSTAN, P.A. et al. Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. **International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation**, [S.L.], v. 19, p. 115-126, out. 2012. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.010.

FISCHER, Hugo B.; LIST, E. John; KOH, Robert C.y.; IMBERGER, Jörg; BROOKS, Norman H.. **Mixing in Inland and Coastal Waters**. California: Academic Press, 1979.

HERRERA, G.; TOMÁS, R.; LOPEZ-SANCHEZ, J.M.; DELGADO, J.; MALLORQUI, J.J.; DUQUE, S.; MULAS, J.. **Advanced DInSAR analysis on mining areas: la union case study (murcia, se spain). Engineering Geology**, [S.L.], v. 90, n. 3-4, p. 148-159, mar. 2007. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.001.

JUCÁ, Lorena Braga Quintella. **Avaliação de métodos de correção atmosférica para Sentinel-2 em um sistema estuarino lagunar tropical**. 2020. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2020.

LEONARD, B.P.. **A stable and accurate convective modelling procedure based on quadratic upstream interpolation.** Computer Methods In Applied Mechanics And

Engineering, [S.L.], v. 19, n. 1, p. 59-98, jun. 1979. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(79)90034-3.

LEONARD, B.P.. **The ULTIMATE conservative difference scheme applied to unsteady one-dimensional advection.** Computer Methods In Applied Mechanics And Engineering, [S.L.], v. 88, n. 1, p. 17-74, jun. 1991. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/0045-7825(91)90232-u.

LINS, R. C.; FRAGOSO JR., C. R.; CIRILO, J. A. **Simulações da hidrodinâmica no Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú-Manguaba** (CELMM/AL). 2013, [S.l: s.n.], 2013. p. 1–8.

NUNES, Almir et al. Modeling the salinity dynamics of a choked coastal lagoon and its impact on the Sururu mussel (*Mytella falcata*) population. **Regional Studies In Marine Science**, [S.L.], v. 45, p. 101807, jun. 2021. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101807.

NUNES, Almir et al. Morphological modeling of long-term inlet channel evolution with an application to the Mundaú Lagoon inlet, Brazil. **Estuarine, Coastal And Shelf Science**, [S.L.], v. 235, p. 106618, abr. 2020. Elsevier BV. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106618.

US Army Corps of Engineers (USACE). **HEC-RAS User's Manual**, U.S.A. : Hydrologic Engineering Center (HEC) . Institute for Water Resources (IRS), 2022. 735 p.. Disponível em: https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs. Acesso em: 02 nov. 2022.