



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
Curso de Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia

Wesley Lopes Moreira

**Simulações Numéricas de ondas de enchentes
em um trecho do Rio Itapecuru no município
de Codó/MA**

Codó
2025

Wesley Lopes Moreira

Simulações Numéricas de ondas de enchentes em um trecho do Rio Itapecuru no município de Codó/MA

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de licenciado em Ciências Naturais/Biologia.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rogério da Silva Rodrigues

Codó

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Moreira, Wesley Lopes.

Simulações Numéricas de ondas de enchentes em um trecho do Rio Itapecuru no município de Codó/MA / Wesley Lopes Moreira. - 2025.

40 f.

Orientador(a): Leonardo Rogério da Silva Rodrigues.
Monografia (Graduação) - Curso de Ciências Naturais - Biologia, Universidade Federal do Maranhão, Ufma, 2025.

1. Simulação de Enchentes. 2. Modelagem Matemática.
3. Mitigação de Desastres. 4. Gestão de Riscos. 5. Planejamento Urbano. I. Rogério da Silva Rodrigues, Leonardo. II. Título.

Wesley Lopes Moreira

Simulações Numéricas de ondas de enchentes em um trecho do Rio Itapecuru no município de Codó/MA

Monografia apresentada ao curso de Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de licenciado em Ciências Naturais/Biologia.

Trabalho aprovado em 19 de Março de 2025

Prof. Dr. Leonardo Rogério da Silva
Rodrigues
Orientador

Prof.
Dr. Alex de Sousa Lima.

Prof.
Dr. Leomar dos Santos Veras.

Codó
2025

Agradecimentos

Primeiramente, a conclusão deste trabalho não seria possível sem o apoio e incentivo de muitas pessoas. Por isso, expresso minha profunda gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta jornada.

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter me dar força, saúde e perseverança no decorrer de todo esse processo acadêmico.

À minha família, especialmente aos meus pais, Maria do Socorro Silva Lopes e Francisco das Chagas Salazar Moreira, por todo amor, compreensão e incentivo ao longo dessa jornada. Vocês são minha base e fonte de inspiração. Agradeço também aos meus irmãos e demais familiares por todo carinho e apoio emocional durante os momentos mais desafiadores.

Aos meus amigos (Renilson, Iolanda, Irlane e Ângela) que sempre estiveram ao meu lado, proporcionando momentos de alegria, apoio e compreensão. Obrigado por ouvirem minhas preocupações e por celebrarem minhas conquistas comigo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leonardo Rogério Rodrigues, pela orientação, paciência e sabedoria. Suas contribuições foram fundamentais para a realização deste trabalho, e sua dedicação em me guiar com precisão e respeito foi indispensável para o sucesso desse trabalho de conclusão de curso.

Aos meus professores e colegas de curso, que, ao longo desses anos, compartilharam conhecimento, experiências e aprendizados que foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Agradeço também a instituição de ensino por ter me fornecido bolsas, como foco acadêmico, durante minha jornada acadêmica, pois esses recursos foram essencial para minha dedicação exclusiva ao curso. Além do mais, agradecer pelo fornecimento da biblioteca, laboratórios e demais facilidades.

Por fim, agradeço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. A cada um de vocês, meu sincero muito obrigado!

"Não fiques em terreno plano.
Não subas muito alto.
O mais belo olhar sobre o mundo
Está a meia encosta."

Friedrich Nietzsche, em "A Gaia Ciência"

Resumo

Os rios desempenham um papel importante em todos os aspectos da vida humana e também para manutenção dos ecossistemas adjacentes, Pois, os rios vem sofrendo eventos naturais como enchentes, inundações, alagamentos etc. Nesse sentido, este trabalho de conclusão de curso apresenta uma aplicação de modelos matemáticos para simulações e previsões de enchentes no Município de Codó-MA. A modelagem computacional foi utilizada para prever o comportamento hidrológico de um trecho do Rio Itapecuru de Caxias até Timbiras. Nesta simulação, foi utilizado o software Matlab, com isso foi possível observar o acúmulo de água em áreas críticas. Os resultados indicaram que a simulação pode ser uma ferramenta eficaz para previsão, planejamento urbano e na tomadas de decisões para minimizar prejuízos ocasionado por eventos extremo de chuvas. Portanto, este trabalho busca contribuir para o desenvolvimento de estratégias para a gestão de riscos ambientais e nos dá uma projeção de como as ondas de enchente se comportam.

Palavras-chave: simulação de enchentes, modelagem matemática, mitigação de desastres, gestão de riscos, planejamento urbano.

Abstract

Rivers play an important role in all aspects of human life and also in the maintenance of adjacent ecosystems, but these rivers have been suffering from natural events such as floods, inundations, etc. In this sense, this research paper presents an application of mathematical models for simulations and forecasts of floods in the municipality of Codó-Ma. Computational modeling was used to predict the hydrological behavior of a stretch of the Itapecuru River from Caxias to Timbiras. In this simulation, Matlab software was used, thus it was possible to observe the accumulation of water in critical areas. The results indicated that simulation can be an effective tool for forecasting, urban planning and decision-making to minimize the losses caused by extreme rainfall events. Therefore, this work seeks to contribute to the development of strategies for environmental risk management and gives us a projection of how flood waves behave.

Keywords: flood simulation, mathematical modeling, disaster mitigation, risk management, urban planning.

Lista de ilustrações

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Corte da área Transversal do Rio | 16 |
| Figura 2 – Lei hidrológica da seção | 18 |
| Figura 3 – Interface do software Matlab, versão: 2023 | 21 |
| Figura 4 – Interface do software Matlab, versão: 2023 | 21 |
| Figura 5 – Trecho do Rio Itapecuru analisado para o problema de enchentes | 25 |
| Figura 6 – Ondas de enchentes | 27 |
| Figura 7 – Variação do volume de água em relação ao tempo | 28 |
| Figura 8 – Ondas de enchentes após 7 dias | 28 |
| Figura 9 – Variação do volume de água após 7 dias | 29 |
| Figura 10 – Mapeamento da Defesa Cível | 32 |
| Figura 11 – Zonas de riscos de inundação | 32 |
| Figura 12 – Curvas de Nível ao longo do rio no techo Urbano de Codó | 33 |
| Figura 13 – Bairro Trizidela | 34 |
| Figura 14 – Bairro Santa Filomena | 35 |
| Figura 15 – Bairro Santo Antônio | 36 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Valores do Parâmetros. | 26 |
|---|----|

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|---------|--|
| LCN Bio | Licenciatura em Ciências Naturais/Biologia |
| UFMA | Universidade Federal do Maranhão |

Sumário

| | | |
|-----|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 11 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 14 |
| 3 | FORMULAÇÃO MATEMÁTICA | 16 |
| 4 | METODOLOGIA COMPUTACIONAL | 20 |
| 4.1 | Por que <i>MATLAB</i> [®] ? | 20 |
| 4.2 | Ambiente computacional | 20 |
| 4.3 | Primeiros Passos no <i>MATLAB</i> [®] | 20 |
| 4.4 | Configurando o Ambiente para Simulações Hidrodinâmicas | 22 |
| 4.5 | Aplicando o Modelo de Ondas de Enchentes no <i>MATLAB</i> [®] | 25 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 27 |
| 5.1 | Cenários de enchentes em um trecho da área urbana de Codó | 31 |
| 5.2 | Curvas de Nível | 33 |
| 5.3 | Bairro Trizidela | 34 |
| 5.4 | Bairro Santa Filomena | 35 |
| 5.5 | Santo Antônio | 35 |
| 6 | CONCLUSÃO | 37 |
| | REFERÊNCIAS | 38 |

1 Introdução

Os rios desempenham um papel fundamental para a população mundial, pois são fontes vitais de água doce para o consumo, animal, humano, agrícola e industrial. Ademais, os rios são essenciais para irrigação de diversas culturas, pois desde as civilizações antigas, as pessoas se estabeleciam perto dos rios, devido irrigação e a fertilização das terras por meio das cheias sazonais. Contudo, os rios são essenciais para o meio ambiente, oferecendo uma grande diversidade de ecossistemas, como para fauna e flora, sendo essencial para manter o equilíbrio ecológico. Além disso, durante muitos anos, os rios foram rotas de transporte para o comércio, também para geração de energia hidrelétrica. Pois, Devido a todo esse contexto histórico, os rios passaram a ser patrimônios e pontos turísticos.

Apesar dos rios ser vital para a vida na terra, também pode ocasionar eventos extremos ao ser humano e ao ecossistema. Por exemplo, deslizamento de terra, erosão fluvial, alagamentos, contaminação, secas, acidentes industriais, inundações, poluição e enchentes, sendo que enchentes é o principal objetivo desse trabalho de conclusão de curso.

As inundações é responsável por ocasionar fenômenos naturais mais destrutivos no mundo, que ocorrem devido a chuvas intensas por períodos prolongados, assim ocasionando um aumento acentuado no nível dos rios, extravasando suas margens e alagando suas planícies adjacentes Reckziegel (2007). Para Santos (2007) os desastres naturais relacionados a inundações representam cerca de 58% dos desastres naturais mais ocorrido no Brasil entre os anos de 2000 e 2007.

Segundo Castro (2003), as inundações podem ser classificadas em quatro tipos: inundações graduais ou enchentes, inundações bruscas ou enxurradas, alagamento e inundações nas litorâneas. Durante as enchentes, a elevação das águas vai ocorrer de forma lenta e previsível, se mantendo elevada por um algum tempo e escoando gradualmente. Assim, estão associados a períodos longos de chuvas, alcançando principalmente grandes bacias, rios e planícies Castro (2003).

Estudos relacionado a enchentes é uma área muito importante dentro da hidrologia, pois é responsável por compreender o comportamento das ondas de enchentes que são provocada pela chuvas intensas, lixos nos bueiros, erros de projetos de drenagem, ocupação irregular do solo. Além do mais, esses estudos relacionados as ondas de enchentes são fundamentais para redução de risco para sociedade, além de proteger vidas, propriedades, influencia na economia e também esse estudos busca analisar como ocorre a propagação dessas ondas enchentes e os efeitos que ela causa ao meio ambiente.

As ondas de enchentes por descreve comportamento durante as inundações, devido intensidade da chuva, tipos de solos, topografia da região, velocidade da propagação da onda, tempo de recuo, erosão nas margens rios, entre outros. Além disso, entender esses comportamentos é essencial para um bom planejamento, prevenção e mitigação de seus efeitos na sociedade. devido a isso, há uma necessidade de estudos mais detalhados relacionado a simulações matemáticas para prever como essas ondas se comportam, além de descobrir quais áreas vão ser mais afetadas durante os desastres.

Para o nosso estudo, utilizaremos um pequeno trecho da Bacia do Rio Itapecuru na cidade de Codó. Logo, Codó é um município brasileiro que está localizado no interior do Maranhão, cuja sua área territorial é de $4.361,606 \text{ km}^2$, com uma população em torno de 114.269 habitantes e com densidade demográfica de $26,20 \text{ hab./km}^2$, (IBGE 2022), localizado 310,5 km de distância da capital de São Luís. Na cidade de Codó, possui três principais rios que são Codozinho, Saco e o Rio Itapecuru. Com base nisso, essa pesquisa busca tratar questões importantes especificamente sobre o rio Itapecuru. Pois, em épocas chuvosas o rio Itapecuru sofre com enchentes e inundações, obrigando as pessoas que moram as margens desse rio, abandonarem suas casas.

Nome Itapecuru vem do termo tupi ita (pedra), pe (caminho) e curu (influência) e significa água que caminha entre as pedras, Batista (1997). A bacia hidrográfica do rio Itapecuru está integralmente inserida no estado Maranhão, faz parte da região hidrográfica Atlântico Nordeste Ocidental, nasce no Parque Estadual do Mirador na confluência das Serras Cruzeiras, confusão, Itapecuru e Alpercatas, e se estende até a foz na baía de Marcos, ao Sul da ilha de São Luís, e corta o Estado do Maranhão de Sul para o Norte em forma de arco. Ademais, o vale do Itapecuru tem uma área de $2.540,06 \text{ km}^2$, correspondente a 16% do território do Maranhão, constituindo-se na segunda maior bacia fluvial do estado, está dividida em três regiões fisiográficas: Alto, Médio e Baixo Itapecuru Porto, Motta e Souza (2019).

Devido as grandes enchentes que o rio Itapecuru vem sofrendo anualmente, houve a necessidade de estudo relacionado a isso para um melhor entendimento. Pois, neste estudo temos como objetivo analisar o panorama de enchentes no Rio Itapecuru no município de Codó, utilizando o software Matlab para simulações e previsões, compreender como essas ondas de enchentes se propogam ao longo do trecho de análise do rio e também identificar áreas de risco de acordo com as simulações proposta pelo software Matlab.

Neste trabalho, Utilizaremos o métodos das diferenças finitas para resolver a equação matemática que modela as ondas de enchentes. O método de diferenças finitas é uma técnica numérica que permite resolver problemas de valores de contorno (PVC) e equações diferenciais, não entraremos em detalhes sobre o método, pois foge do objetivo do nosso estudo. Durante esse estudo consideramos os dados hidrológicos favorável a uma parte urbana do Rio Itapecuru entre a cidade de Caxias e Timbiras.

O restante do trabalho está organizado da seguinte forma, na seção 3 abordará a formulação matemática utilizada para o desenvolvimento do trabalho. Na seção 4, nos mostra a metodologia computacional baseada na ferramenta software Matlab. Na seção 5, abordará os resultados e discussões com base na metodologia aplicada, e também ampliação desse modelo para realidade local da cidade de Codó-MA. Na seção 6, temos a parte da conclusão, na qual aborda a importância dessa pesquisa para o município de Codó.

2 Fundamentação Teórica

A modelagem matemática é um processo de desenvolvimento utilizado para a aquisição e validação de modelos matemáticos. Ademais, é uma forma de abstração e generalização com o propósito de previsão de tendências. Bassanezi (2002). Esses modelos matemáticos são utilizados para fazerem simulações, ter previsões de comportamentos das ondas de enchentes. Com isso, usaremos equações matemáticas que vão ajudar a descrever o escoamento da água em rios, córregos e áreas inundadas, além de auxiliar na previsão de extensão, e na intensidade das inundações através de simulações matemáticas.

No decorrer do tempo, a amplificação dos modelos teóricos, em bloco com a análise de medidas, foi possível encontrar resultados hipotéticos para casos relacionados a enchentes de rios e assoreamento. Por exemplo, Eckardt (2008), utilizou modelos matemáticos, onde foi desenvolvido um modelo cartográfico para se obter tal previsão e simulação de uma área inundável na cidade de Lajeado. Além do mais, os modelos numéricos surgiram com o objetivo de solucionar o problema e também para complementar o assunto.

Uma outra situação que pode ser observada no meio aquático é a dispersão de poluentes, enchentes e assoreamentos que estão associada as características do escoamento dos corpos hídricos. Dessa maneira, para se fazer toda uma avaliação desse corpo hídrico, necessita-se de modelos matemáticos para realizar toda essa simulação em sua hidrodinâmica. Na maioria dos casos, esta simulação é realizada através de métodos numéricos que visam resultados aproximados para formulações resultantes de análises de processos químicos, físicos e biológicos que acontecem no meio aquático Garcia (1997)

No ano de 2015, um tufão provocou várias inundações com transporte de sedimentos no norte do Japão, com base nisso foi utilizado um modelo hidrodinâmico e dos métodos das Diferenças finitas, Niroshinie et al. (2015), essas enchentes para áreas localizadas à jusante e também analisaram a interferência do Rio Hachikenbori em uma planície que foi inundada por 40 km^2 . Obtendo resultados das ondas de enchentes percorrendo toda a extensão da região modelada que foi atingida pela inundações, essa extensão recebeu um grande volume de água e sedimentos em um pequeno intervalo de tempo, ultrapassando a capacidade de escoamento dos canais dependentes e atingidos as cidades próximas.

Para Tucci (2005), a previsão das inundações que ocorrem em tempo real pode ser classificada de acordo com sua antecedência e com as características da bacia hidrográfica desejada. Segundo o autor, as bacias pequenas podem ser utilizadas para prever com base na precipitação ocorrida. Já em relação as grandes bacias hidrográficas pode ser utilizada

na previsão com base na observação do nível do montante. O autor também afirma que os estudos feitos com antecedência são suficientes para minimizar os prejuízos causados pelas enchentes, atuando sobre seus efeitos

Outro fator importante é a previsão de vazões de rios que representa uma ferramenta muito importante na minimização nos impactos das inundações Silva (2006). Os modelos de chuva- vazões que são utilizados na precipitação conhecida para estimar as vazões vêm se mostrando bastante eficientes para previsão de enchentes, apresentando na maioria dos casos, uma elevada antecedência para previsão de enchentes, Cheng et al. (2006). Ademais, esses modelos matemáticos são importante para ser utilizados em pequenas bacias, onde a concentração é baixa, já para bacias maiores o autor recomenda o uso de modelos de propagação de escoamento.

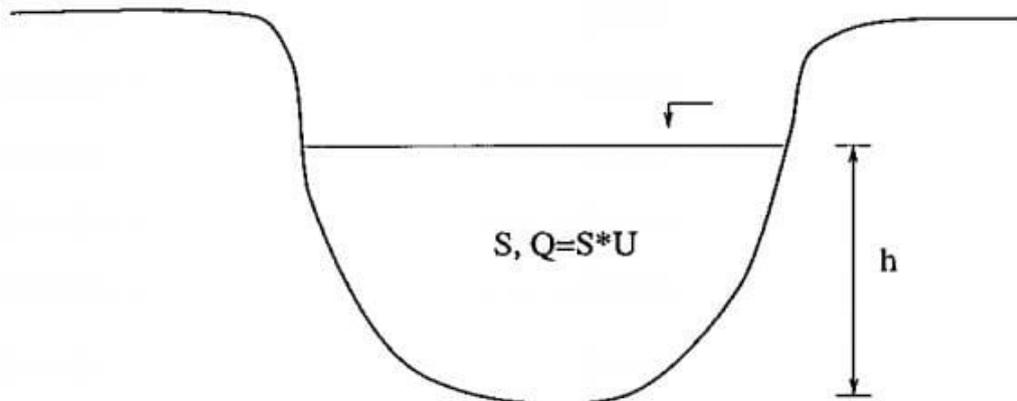
Para Fragoso Júnior (2004), advir uma definição que a previsão de vazão em tempo real que pode ser usada em épocas bem definidas no regime hidrológico como em cheias ou períodos de secas, em que as condições são muito críticas para o usuário da água, na previsão do volume afluente para regularizar o nível do reservatório e maximizar a produção de energia, para se ter um conhecimento antecipado dos níveis dos rio no período de estiagens, quando se tem o risco do curso de água não ter o suficiente de embarcações, e no risco de inundações.

3 Formulação matemática

Modelo Contínuo

Nesta seção apresentaremos um modelo matemático para ondas de enchentes, para isso, vamos usar a forma simplificada da equação de Burgers a equação matemática que modela ondas de enchentes, tal equação é conhecida na literatura como solução Burgers, veja Nachbin e Tabak (1997). Para isso, iremos considerar as seguintes grandezas de interesse que serão trabalhadas no modelo de enchentes que são a área de seção transversal, que é representada por $S(x, t)$, e a vazão, $Q(x, t)$; as duas são funções do espaço x e do tempo t . A seção transversal $S(x, t)$ que é definida como a área molhada ao cortar o rio transversalmente por um plano. Já a velocidade do escoamento que passa nessa área $Q(x, t)$ é a taxa de variação do volume no tempo, na qual U é a velocidade do escoamento e h é a altura do escoamento Figura 1

Figura 1 – Corte da área Transversal do Rio



Fonte: Nachbin e Tabak (1997)

A velocidade média do escoamento U pode ser encontrada a partir da relação de Q e S já que

$$U(x, t) = \frac{Q(x, t)}{S(x, t)} \quad (3.1)$$

Em um trecho do rio reduzido por duas seções no espaço x_1 e x_2 , usando o método da conservação da massa, qualquer aumento no volume água entre dois intervalos t_1 e t_2 é dado pela diferença do volume da seção em x_1 e x_2 . Assim, com base na equação 3.2:

$$V(t_2) - V(t_1) = \int_{t_1}^{t_2} [Q(x_1, T) - Q(x_2, T)] dt \quad (3.2)$$

O volume $V(t)$ representa o valor total que estamos calculando em função do tempo, dado pela integral da seção transversal $S(x, t)$ que representa uma função que depende de uma variável x e do tempo t , entre os pontos x_1 e x_2 , segundo a Equação 3.3;

$$V(t) = \int_{x_1}^{x_2} S(x, T) dx. \quad (3.3)$$

Substituindo a Equação 3.3 na equação 3.2, vamos obter a expressão dada pela equação 3.4

$$\int_{x_1}^{x_2} (S(x, t_2) - S(x, t_1)) dx + \int_{t_1}^{t_2} [Q(x_2, T) - Q(x_1, T)] dt = 0 \quad (3.4)$$

Com base no Teorema Fundamental do Cálculo, podemos reescrever a Equação 3.4 na forma da Equação 3.5

$$\int_{x_1}^{x_2} \int_{t_1}^{t_2} [S_t(x, t) + Q_x(x, t)] dt dx = 0. \quad (3.5)$$

Assim, com a combinação das equações fundamentais, chegamos a uma equação governante do problema de enchentes, dado pela equação 3.5. Nessa equação, ela nos mostra como as variações do escoamento médio de água (*i.e* Q_x) influenciam a evolução temporal da altura da água no rio $h(x, t)$, baseada na variação temporal da área da seção transversal (área molhada) $S(x, t)$.

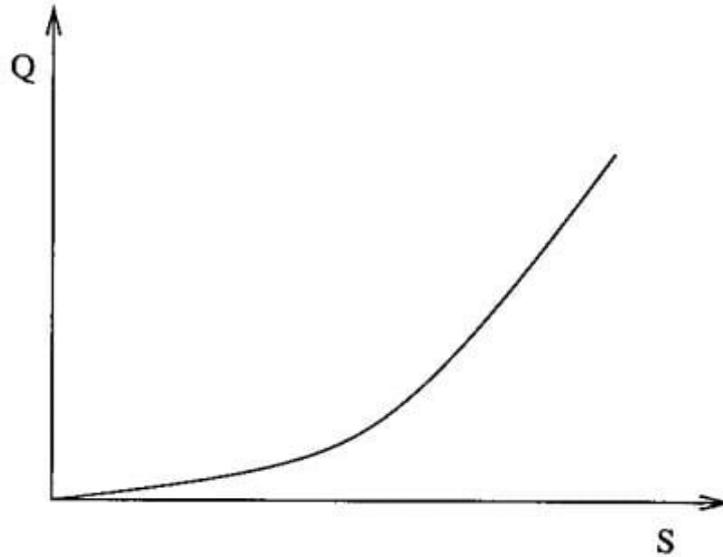
$$S_t(x, t) + Q_x(x, t) = 0 \quad (3.6)$$

Para o facilitar nosso entendimento, podemos representar equação 3.6

$$S_t(x, t) = -Q_x(x, t) \quad (3.7)$$

Nessa equação 3.7, deixa bastante claro que a vazão diminuirá ao descermos ao longo do rio (na direção x), então Q_x é negativa e S_t é positivo. Com base nisso, a altura da água está aumentando. Ademais, ela possui duas variáveis dependentes, S e Q , porém, para solucionamos esse sistema, faz-se mais uma relação entre essas duas incógnitas. Utilizando uma curva conhecida como lei hidrológica Figura 3.3 relacionando a altura da água e a velocidade média de um escoamento em vários instantes de tempo. Pois, essa é a maneira mais simples que engenheiros hidráulicos vem utilizando durante anos para fechar o sistema de equações, fazendo essas relação entre duas incógnitas. Ademais, eles medem nas estações ao longo do rio, a altura da água e as velocidades médias em vários instantes do tempo, ao decorrer de muito anos.

Figura 2 – Lei hidrológica da seção



Fonte: Nachbin e Tabak (1997)

Analisando o gráfico da lei hidrológica Figura 2, cujo o comportamento da curva pode ser representado aproximadamente pela função:

$$Q = \frac{S^2}{2} \quad (3.8)$$

Assim, derivando a equação da lei hidrológica, vamos obter equação 3.9:

$$S_t(x, t) + Q_x(S(x, t)) = S_t(x, t) + Q'(S)S_x(x, t) = 0 \quad (3.9)$$

Em seguida, após isolar os valores e substituir os termos na equação Lei Hidrológica, chegamos a equação Burgers

$$S_t(x, t) = \frac{1}{2}S^2(x, t)x = S_t(x, t) + SS_x(x, t) = 0. \quad (3.10)$$

A equação 3.10 é bem definida em um espaço de função adequada, possui existência e unidade para as unidade para as soluções. Como mencionado anteriormente, o nosso objetivo não é fazer um estudo analítico das soluções, mas utilizar o modelo em si para fazer a projeção das ondas. Para isso, iremos usar um código computacional que foi utilizado Nachbin e Tabak (1997).

Modelo Numérico

Neste contexto, o esquema numérico é apresentado na seguinte forma:

$$S_j^{n+1} = S_j^n - S_j^n \frac{\Delta t}{\Delta x} (S_j^n - S_{j-1}^n) \quad (3.11)$$

essa equação de diferenças foi obtida a partir do modelo contínuo avaliado nos pontos x_j e t_n para isso foi feita aproximação das variações da seção transversal no espaço e no

tempo, ou seja, S_x e S_t respectivamente. Para que o modelo numérico seja consistente e nos retorne uma solução estável, precisamos fazer $S_j^n \frac{\Delta t}{\Delta x} < 1$ para todos os valores de j e n . A condição de estabilidade mencionada é uma forma simplificada da condição de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) Courant, Friedrichs e Lewy (1928), amplamente utilizada em esquemas numéricos para equações diferenciais parciais (EDPs). Essa condição assegura que a solução numérica do esquema de diferenças finitas não sofra instabilidades ao longo do tempo.

4 Metodologia computacional

Para realizar a simulação do modelo hidrodinâmico, utilizamos um ambiente computacional robusto e especializado, baseado na ferramenta MATLAB[®]. Essa escolha se deve às suas capacidades de cálculo numérico, processamento de dados e visualização de resultados de forma eficiente e intuitiva.

4.1 Por que *MATLAB*[®]?

O MATLAB[®] é amplamente utilizado em engenharia e ciências naturais para resolver problemas complexos que envolvem:

- Resolução de equações diferenciais: Uma ferramenta essencial para modelar fenômenos dinâmicos, como ondas de enchentes.
- Visualização gráfica: Permite criar gráficos 2D e 3D para melhor análise dos resultados.
- Automatização de cálculos: Reduzindo o tempo necessário para processar grandes volumes de dados.

Com esses recursos, o MATLAB[®] fornece uma base ideal para modelar e simular o comportamento de sistemas dinâmicos associados a eventos de enchentes.

4.2 Ambiente computacional

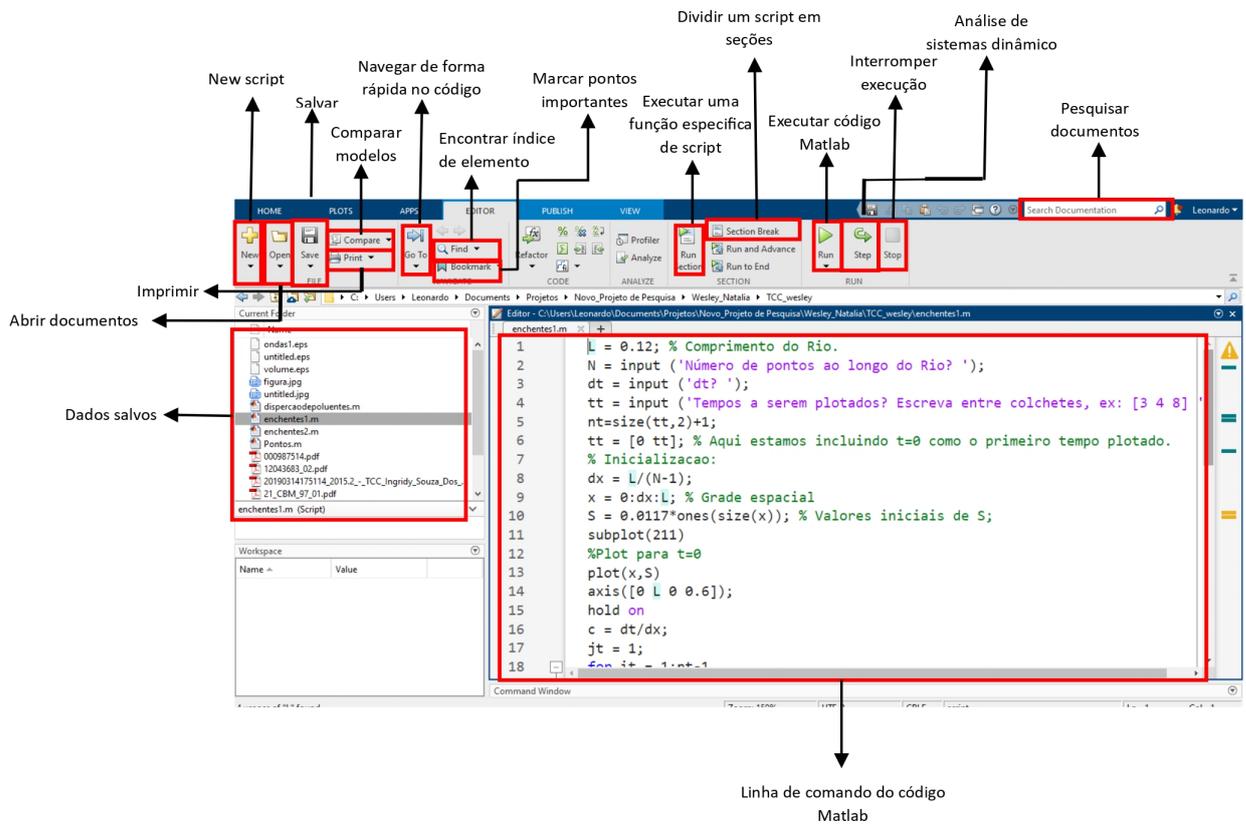
Nesta seção iremos apresentar alguns pontos importantes para o manuseio do MATLAB[®]. Apesar de ser um software sofisticado, iremos nos concentrar no básico para gerar os códigos e fazer as simulações necessárias.

O software utilizado para realização da simulação possui a interface mostrada na figura 3. A interface principal é chamada Command Window. Esse espaço é o local principal onde os comandos são inseridos e executados. Por exemplo, é possível calcular diretamente expressões matemáticas, veja na figura 4

4.3 Primeiros Passos no *MATLAB*[®]

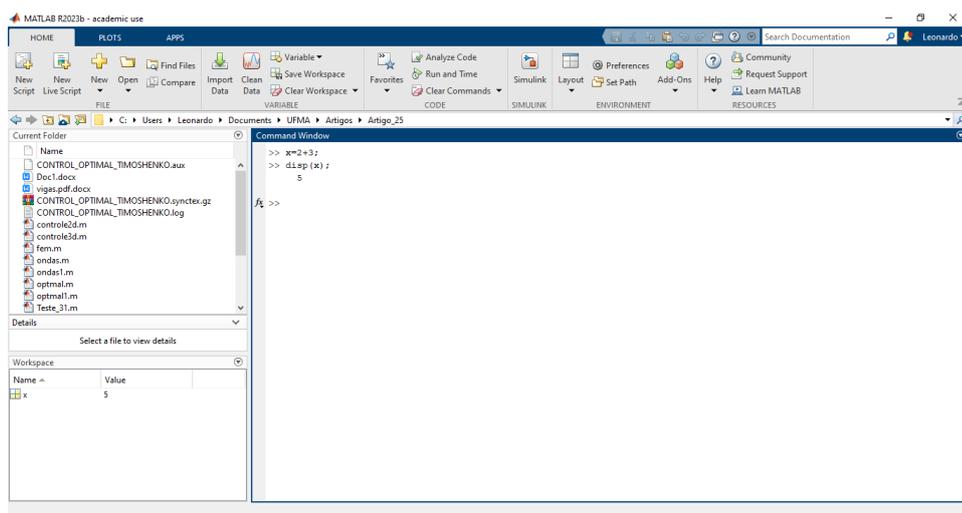
Antes de mergulhar no modelo de ondas de enchentes, é essencial compreender a estrutura básica do MATLAB[®]. Abaixo, apresentamos os elementos principais:

Figura 3 – Interface do software Matlab, versão: 2023



Fonte: Software Matlab, 2024

Figura 4 – Interface do software Matlab, versão: 2023



Fonte: Software Matlab, 2024

Editor de Scripts

Permite criar códigos mais elaborados, salvos em arquivos com extensão .m. Por exemplo, um script para calcular a solução de uma equação diferencial ordinária pode ser escrito como:

```
% Solução de uma EDO simples
tspan = [0 10];
y0 = 1;
[t, y] = ode45(@(t, y) -2*y, tspan, y0);
plot(t, y);
xlabel('Tempo');
ylabel('Solução y');
```

Workspace

Exibe as variáveis ativas durante uma sessão. Isso ajuda a monitorar os dados utilizados e produzidos no MATLAB®.

Figures

Gráficos e visualizações gerados pelos comandos são exibidos nessa seção.

4.4 Configurando o Ambiente para Simulações Hidrodinâmicas

Para implementar a simulação da propagação de ondas de enchentes em um rio utilizando o MATLAB®, é necessário configurar o ambiente de trabalho. Essa configuração envolve os seguintes passos:

1. Definição dos Parâmetros do Modelo

Os parâmetros básicos do modelo devem ser definidos inicialmente, incluindo:

- Comprimento do Rio (**L**): Define a extensão total do domínio.
- Número de Pontos (**N**): Controla a discretização espacial. Deve ser maior ou igual a 2.
- Intervalo de Tempo (**dt**): Define o passo temporal da simulação. Deve ser um valor positivo.

Exemplo de código:

```
L = 0.12; % Comprimento do rio (em metros)
N = input('Número de pontos ao longo do Rio? ');
if N < 2
    error('0 número de pontos deve ser maior ou igual a 2.');
```

end

```
dt = input('dt (intervalo de tempo)? ');
if dt <= 0
    error('dt deve ser maior que 0.');
```

2. Configuração Temporal

Os tempos a serem plotados são especificados pelo usuário, e o tempo inicial $t = 0$ é incluído automaticamente:

```
tt = input('Tempos a serem plotados? Escreva entre colchetes, ex: [2 3 4] ');
nt = size(tt, 2) + 1; % Número de intervalos de tempo
tt = [0 tt]; % Inclui t = 0
```

3. Configuração Espacial

O domínio espacial é dividido em uma grade uniforme. O espaçamento entre os pontos (dx) é calculado, e a grade espacial é definida como:

```
dx = L / (N - 1);
x = 0:dx:L; % Grade espacial
```

4. Condição Inicial

A altura inicial da onda (S) é definida como um valor constante ao longo de toda a extensão do rio:

```
S = 0.0117 * ones(size(x)); % Altura inicial da onda
```

5. Parâmetro de Courant

O parâmetro c , que relaciona os passos temporal e espacial, é calculado para garantir estabilidade numérica:

```
c = dt / dx;
```

6. Preparação para Gráficos

Os gráficos para visualizar os resultados são configurados antes do início da simulação:

```
figure;
subplot(2, 1, 1); % Primeiro gráfico: Propagação das ondas
hold on;
```

7. Loop Temporal

A evolução das ondas é calculada por meio de dois loops:

- Loop Externo (**it**): Itera sobre os tempos especificados em **tt**.
- Loop Interno (**t**): Calcula a evolução temporal entre dois tempos consecutivos.

Dentro do loop, o esquema numérico de diferenças finitas é usado para atualizar **S**, e a condição de contorno é aplicada na montante do rio:

```
for it = 1:nt-1
    for t = tt(it):dt:tt(it+1)
        S(2:N) = S(2:N) - c * S(2:N) .* (S(2:N) - S(1:N-1));
        S(1) = 0.0117 + 0.1 * (t < 7) * (1 - cos(2 * pi * t / 7));

        % Armazenamento de resultados
        ts(jt) = t;
        Ssum(jt) = dx * sum(S); % Volume total no rio
        jt = jt + 1;
    end

    % Gráfico da propagação da onda
    plot(x, S, 'DisplayName', ['t = ' num2str(tt(it+1)) 's']);
end
```

8. Gráfico do Volume Total

O volume total de água no rio ao longo do tempo é calculado e exibido em um segundo gráfico:

```
subplot(2, 1, 2);
plot(ts, Ssum, 'LineWidth', 1.5);
xlabel('Tempo (t)');
ylabel('Volume total no rio');
title('Volume total da água no rio');
grid on;
```

9. Resultados Esperados

- Gráfico 1: Mostra a propagação das ondas ao longo do rio em diferentes tempos especificados.

- Gráfico 2: Representa a evolução do volume total de água no rio ao longo do tempo.

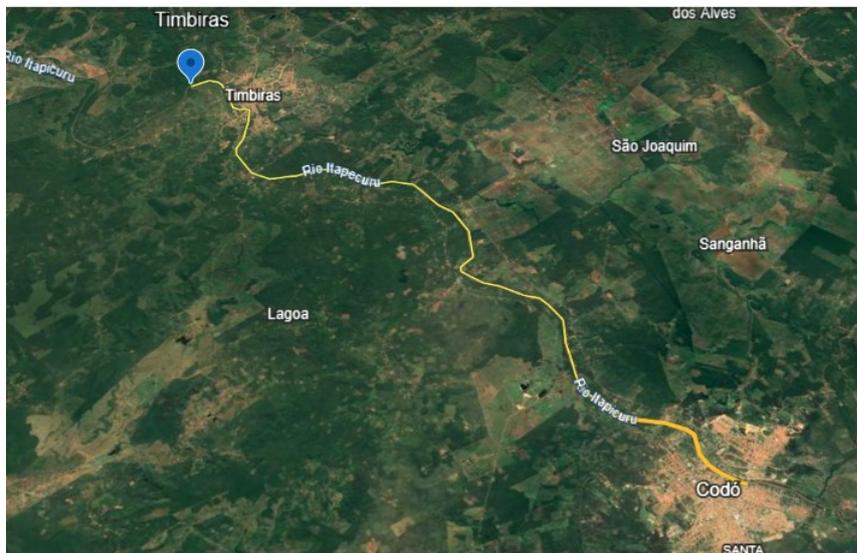
4.5 Aplicando o Modelo de Ondas de Enchentes no *MATLAB*[®]

Compreendida a interface e configurado o ambiente, o próximo passo é implementar o modelo matemático das ondas de enchentes. Este modelo já foi detalhado acima, incluindo as equações diferenciais utilizadas, métodos numéricos aplicados. Para fazer a simulação de ocorrência de uma enchente em um trecho de um rio, foi analisada a evolução temporal da área da seção transversal do rio, dada pela função S , através das variações do escoamento médio de água. Essa simulação foi feita a partir da equação de Burgers invíscida:

$$S_t(x, t) + \frac{1}{2}(S^2(x, t))_x = S_t(x, t) + SS_x(x, t) = 0 \quad (4.1)$$

Como essa equação Burgers não possui uma solução analítica, faz-se necessário uma aplicação de um método numérico para encontrar uma solução aproximada. O código computacional utilizado neste trabalho é uma adaptação do proposto por Nachbin e Tabak (1997), na qual utiliza o métodos das diferenças finitas para resolução do conjunto de equações do modelo apresentado. Esse código foi reproduzido no software *MATLAB*[®] para realizar os cálculos e obter os resultados das variações das áreas de seção do rio. O

Figura 5 – Trecho do Rio Itapecuru analisado para o problema de enchentes



Fonte: Google Earth, 2024.

código computacional reproduziu as ondas de enchentes em um trecho do alto curso do Rio Itapecuru, definido entre montante ($4^{\circ}52'56''S - 43^{\circ}21'46''W$) na cidade de Caxias, no Maranhão, e a cidade de Timbiras ($14^{\circ}14'23''S - 43^{\circ}57'03''W$), no Maranhão, conforme a Figura 5. Os dados e parâmetros de entrada foram estabelecidos de acordo com a região da cidade de Caxias.

A fim de complementarmos esse modelo, é necessário especificar os dados iniciais e de contorno. Para isso, iremos considerar o comprimento do rio a ser simulado, que corresponde à distância entre as cidades de Caxias e Timbiras. Essa medição foi realizada por meio de um mapeamento utilizando o Google Earth, e o comprimento do trecho foi determinado como $L = 120 \text{ Km}$, por questão de simplicidade iremos usar $L = 0,12$, medido em centenas de quilômetros. Além disso, dados como vazão, largura e profundidade foram obtidos em documentos específicos. Porto, Motta e Souza (2019). Observa-se o trecho analisado destacado na Figura 5.

Na simulação de enchentes nesse trecho do Rio Itapecuru, considerou-se uma seção transversal retangular constante, com a largura de 45 m e profundidade máxima de $2,60 \text{ m}$, que nos dar uma área de 117 m^2 , com a vazão média total de $267,1 \text{ m}^3/\text{s}$. Logo o nosso dado inicial é

$$S(x, 0) = 0,0117$$

medido em centenas de metros quadrado, isto significa que a superfície do rio é inicialmente plana e livre de ondas. Para realizarmos a simulação vamos considerar a ocorrência de uma grande pancada de chuva durante 7 dias. Por exemplo, na ordem de $290,4 \text{ mm}$ (Correia Filho et al., 2011), como sendo a única responsável pelo aumento de nível do rio, sem afluência de fatores externos e somada ao nível normal de $S = 0,0117$, assim resultando em um aumento rápido do volume de água. Consideramos o município de Caxias como a montante ($x = 0$) e o município de Timbiras como a jusante ($x = 0,12$). A função que descreve essa configuração a montante é:

$$S(0, t) = \begin{cases} 0,0117 & \text{para } t < 0 \\ 0,0117 + 0,1(1 - \cos(\frac{2\pi}{7}t)) & \text{para } 0 < t < 7 \\ 0,0117 & \text{para } t > 7 \end{cases} \quad (4.2)$$

Ademais, este aumento pode exceder a capacidade do leito do rio, especialmente se a capacidade de infiltração do solo for baixa, levando a transbordamento e enchentes nas áreas a jusante. Abaixo apresentamos uma tabela com os valores dos parâmetros utilizados para ser processado no Software Matlab. O código que foi apresentado na seção anterior

| Símbolo | Definição | Valor |
|------------|-----------------------------------|----------|
| t | Tempo em dias | 7 |
| L | Comprimento do rio | 0,12 |
| dt | Discretização do tempo na malha | 0,001 |
| Δx | Discretização do espaço na malha | 0,0012 |
| $S(0)$ | Área de seção transversal inicial | 0,0117 |
| N | Números de pontos ao longo do rio | Variável |

Tabela 1 – Valores do Parâmetros.

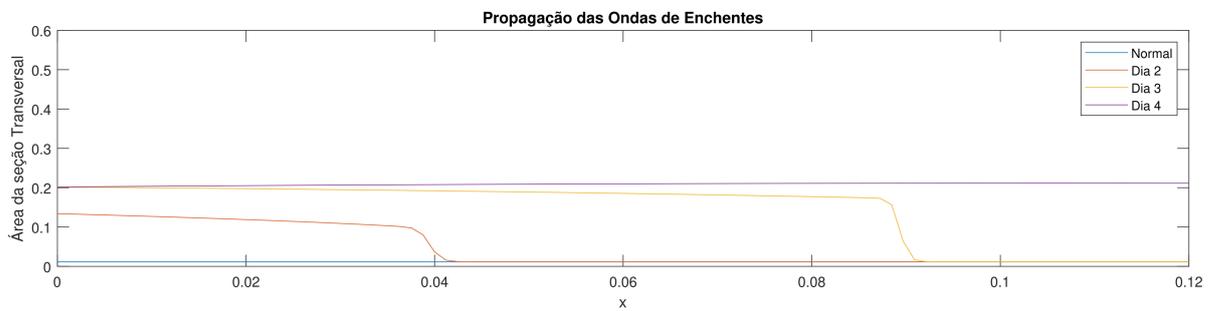
usar o algoritmo 4.1 para calcular a evolução dessa onda de enchente.

5 Resultados e Discussões

Após ser feito a implementação dos dados no software Matlab, chegamos uma solução numérica satisfatória que pode ser visualizada a seguir:

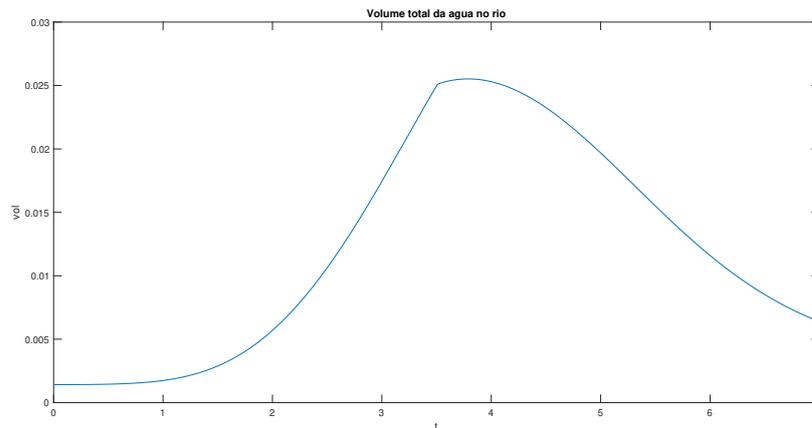
Solução numérica nos tempos $t = 2, 3, 4$. foram usados 96 pontos no espaço, ou seja, ao longo do rio e volume de água na ordem de grandeza de $10^7 m^3$. Agora vejamos a simulações de ondas de enchentes para o período de 7 dias.

Figura 6 – Ondas de enchentes



Fonte: Software Matlab, 2024

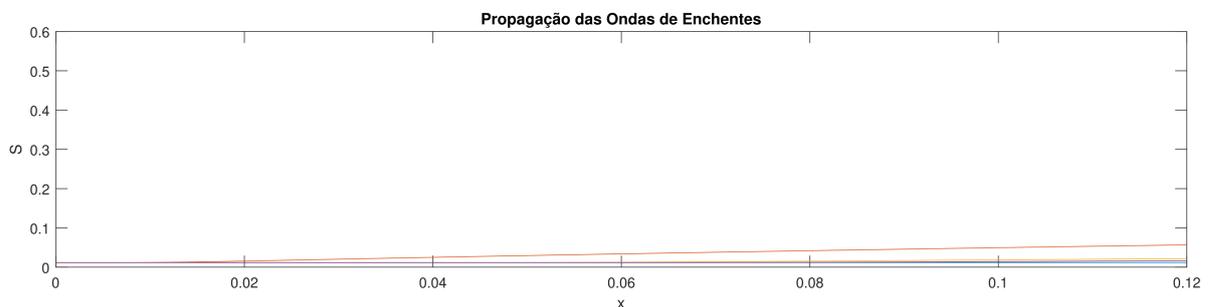
Figura 7 – Variação do volume de água em relação ao tempo



Fonte: Software Matlab, 2024

Agora vejamos a simulações de ondas de enchentes para o período após 7 dias. Os dias utilizado na simulação numérica foi no dia $t = 8, 10, 14$. foram usados 96 pontos no espaço, ou seja, ao longo do rio e volume de água na ordem de grandeza de $10^7 m^3$.

Figura 8 – Ondas de enchentes após 7 dias



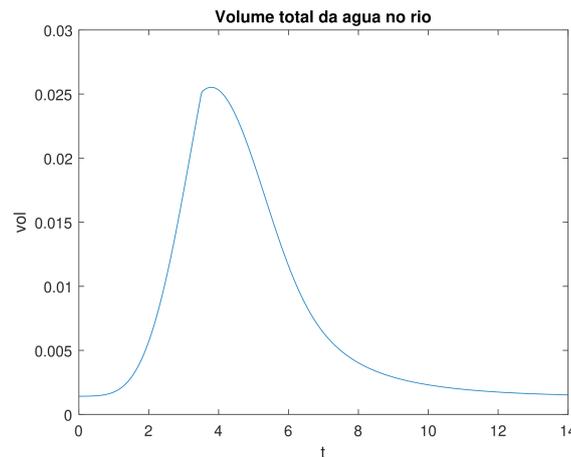
Fonte: Software Matlab, 2024

Diante do exposto, toda essa análise será feita a partir dos gráficos gerados na simulação matemática pelo software matlab.

Para realizamos essa análise iremos considerar a cidade de Caxias como sendo o ponto 0 no eixo da horizontal, veja a figura 6, como o curso do rio segue no sentido Caxias à Timbiras. Será considerado longo períodos de chuvas no município de Caxias, essas chuvas irá influenciar gradualmente o nível de água durante todo o trecho do Rio Itapecuru de Caxias a Timbiras.

A cidade de Codó está localizada no ponto $0,096m$ em centenas de quilômetros na figura 6, pois está localizado entre Caxias e Timbiras. Ademais, Codó vai ser responsável por receber as ondas de enchentes de Caxias antes que cheguem em Timbiras, assim ocasionando enchentes em um estágio intermediário.

Figura 9 – Variação do volume de água após 7 dias



Fonte: Software Matlab, 2024

Para uma melhor análise dos gráficos gerados, consideraremos, na Figura 6, que o eixo y representa a área da seção transversal do rio em unidades de centenas de m^2 , enquanto o eixo x (distância em centenas de km) indica a distância ao longo do rio, do trecho de Caxias a Timbiras. Cada linha colorida (normal, dia 2, dia 3, dia 4) representa a área da seção transversal em relação ao trecho do rio. Já na Figura 7, o eixo y representa o volume total de água no rio, em m^3 , e o eixo x (tempo em dias) mostra o tempo desde o início do evento de chuva que resultou nas enchentes.

Nesta simulação, consideramos o rio Itapecuru em um nível normal de água que passa a receber chuvas intensas durante um período de 7 dias, sofrendo variações em sua área de seção transversal, conforme a figura 6. Nessas condições, as ondas percorrem todo o trecho do rio. Essas ondas são representadas pela variação da seção transversal do rio, sendo possível observar saltos hidráulicos formados ao longo do percurso de Caxias a Timbiras, devido ao grande volume de água recebido nesse intervalo de tempo, como ilustrado na Figura 7. À medida que a água percorre o trecho do rio, as ondas se propagam na mesma direção, caracterizando um mecanismo de transporte por advecção.

O volume de água na Figura 7 foi calculado somando todas as áreas S_j com espaçamento Δx . Nos primeiros dias, observa-se a formação de um salto hidráulico até o 4º dia, devido ao volume de água recebido pelas chuvas intensas. Após o 4º dia, esse salto apresenta um decréscimo significativo, refletindo a precisão de primeira ordem do modelo adotado.

Nas Figuras 6 e 7, observa-se uma relação entre a área da seção transversal e o volume total de água que entra no rio. As chuvas intensas aumentam o volume de água no rio Itapecuru, e, quanto maior a quantidade de água recebida, maior será o aumento na área da seção transversal. Com base nisso, verifica-se que o trecho de Caxias até Timbiras

está recebendo um grande volume de água em um curto período de tempo, tornando-se suscetível a enchentes.

No primeiro dia (linha azul), na Figura 6, o rio está em seu estado de normalidade, com a área da seção transversal nos parâmetros normais. No segundo dia (linha marrom), o gráfico indica uma leve elevação na área da seção transversal, sinalizando o início da enchente. Nesse dia, a área da seção transversal alcança aproximadamente $0,13 \text{ m}^2$, ultrapassando a capacidade normal do rio devido às chuvas intensas dos dias anteriores. No entanto, esse salto hidráulico não atinge Codó, pois ocorre uma queda brusca na seção transversal antes de chegar à cidade. Todo o trecho entre Caxias e Codó entra em estado de alerta, com o rio demonstrando indícios de transbordamento e risco de inundação de áreas residenciais, agrícolas e comerciais.

No terceiro dia (linha amarela), o gráfico da Figura 6 mostra que a seção transversal atinge aproximadamente $0,201 \text{ m}^2$. O salto hidráulico se propaga até o ponto $0,087$ (centenas de quilômetros), demonstrando o crescimento contínuo do volume de água e a propagação das ondas com maior energia cinética.

No quarto dia (linha roxa), conforme a Figura 7, o volume de água atinge seu ponto máximo, refletindo o acúmulo significativo dos dias anteriores devido às chuvas intensas e contínuas. Nesse período, a área da seção transversal alcança aproximadamente $0,2115 \text{ m}^2$, abrangendo o trecho do rio que inclui a cidade de Codó. Após o quarto dia, observa-se um declínio no volume de água, indicando melhorias nas condições de drenagem e escoamento.

Portanto, no quarto dia (linha roxa), as Figuras 6 e 7 mostram que o volume de água começa a diminuir, e a área da seção transversal atinge seu pico máximo de cheia constante em comparação aos outros dias. Esse comportamento sugere que as ondas de enchente se estabilizaram, com o volume de água bem distribuído ao longo do trecho. Todo o percurso entre Caxias e Timbiras permanece em estado de alerta para enchentes.

É possível observar que com a redução no volume de água, Figura 9 a área da seção transversal do rio também diminui. As ondas de enchente, representadas por variações na seção transversal, perdem intensidade à medida que a quantidade de água se estabiliza. Após o sétimo dia, a Figura 8 sugere que as ondas de enchente começam a se dissipar ao longo do curso do rio no trecho de Codó e Timbiras, embora o risco de enchente diminua, podem persistir bolsões de água em regiões planas ou com drenagem ineficaz.

Após o pico observado no quarto dia, o volume total de água no rio começa a diminuir de forma exponencial. Essa diminuição ocorre devido ao escoamento da água, infiltração no solo e drenagem natural. O rio tende a retornar ao seu estado normal, mas isso pode levar alguns dias ou semanas, dependendo da eficiência do sistema de drenagem e das condições do solo. Caxias, sendo o ponto a montante, será o primeiro a apresentar melhora significativa no volume de água. Codó, por estar em um trecho

intermediário, experimentará uma redução progressiva, mas ainda poderá enfrentar alagamentos localizados, especialmente em áreas de baixa altitude. Timbiras, sendo o trecho jusante, será o último a se recuperar, já que recebe o escoamento acumulado da cidade de Caxias e Codó.

5.1 Cenários de enchentes em um trecho da área urbana de Codó

Nesta seção iremos utilizar os resultados apresentados das simulações para projetar possíveis cenários de enchentes na zona urbana de Codó.

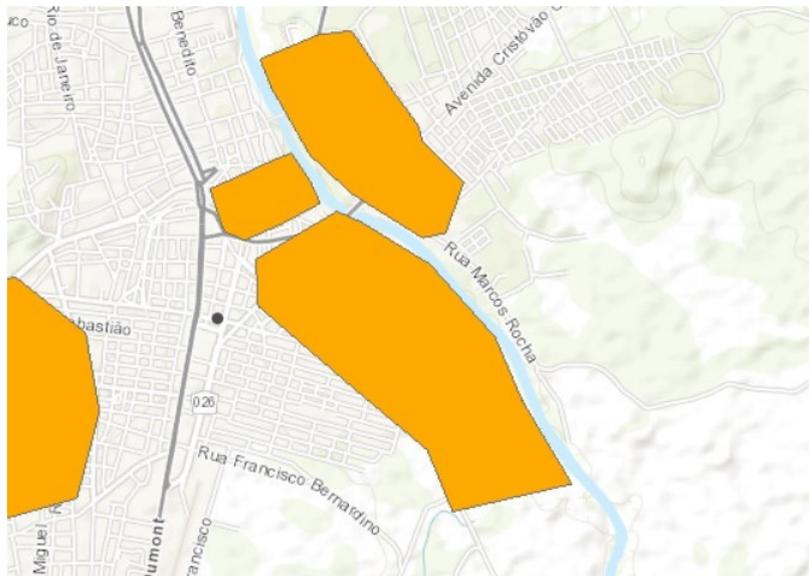
As projeções de cenários de enchentes em um perímetro urbano, são responsáveis por simular o comportamento da natureza através de modelos computacionais que utilizam equações matemática para descrever fenômenos físicos como enchentes e inundações. Logo, ao conectar conhecimento científico matemático com a realidade de Codó, é possível analisar, prevê cenários de riscos e ter um bom planejamento. Devido a isso, é iminente aplicar essa simulação matemática nas margens do Rio Itapecuru para podemos ter uma noção de quantos metros a margem vai ser atingida e identificar quais áreas são suscetível a inundação em período chuvoso.

Segundo a defesa civil de Codó, o nível aceitável de água do Rio Itapecuru que passa por dentro da cidade de Codó é de até $6,8m$ de altura, porém esse nível de água já foi ultrapassado, chegando alcançar mais de 7 metros de altura, como consequência colocando muitas famílias em estado de alerta para enchentes, principalmente em áreas situadas as margens do Rio Itapecuru. As análises dos dados da áreas de risco sucestíveis a enchentes na cidade de Codó é essencial para compreender e mitigar os impactos de enchentes, principalmente em áreas de baixo relevo que são sucestível as inundações. Logo, essa análise é importante para reduzir a vulnerabilidade dessas comunidades localizadas nessas áreas.

No município de Codó, a defesa civil realizou um monitoramento das áreas de risco suscetível as enchentes, como pode-se observar na figura 10. Além disso, temos também trabalhos de pesquisa cujo o interesse consistiu em mapear as zonas de risco de enchentes no município de Codó, por exemplo em Pinheiro (2024), figura 11. Ademais, foram analisados 3 bairros nas margens do Rio Itapecuru, como o bairro Santo Antônio, Trizidela e Santa filomena, pois esses bairros são representado por uma cor laranja na figura 10. pois, esses estudos realizado pela defesa civil esta envolvendo análise de fatores como relevo, proximidades de rios ou canais, históricos de enchentes e a capacidade de drenagem do solo.

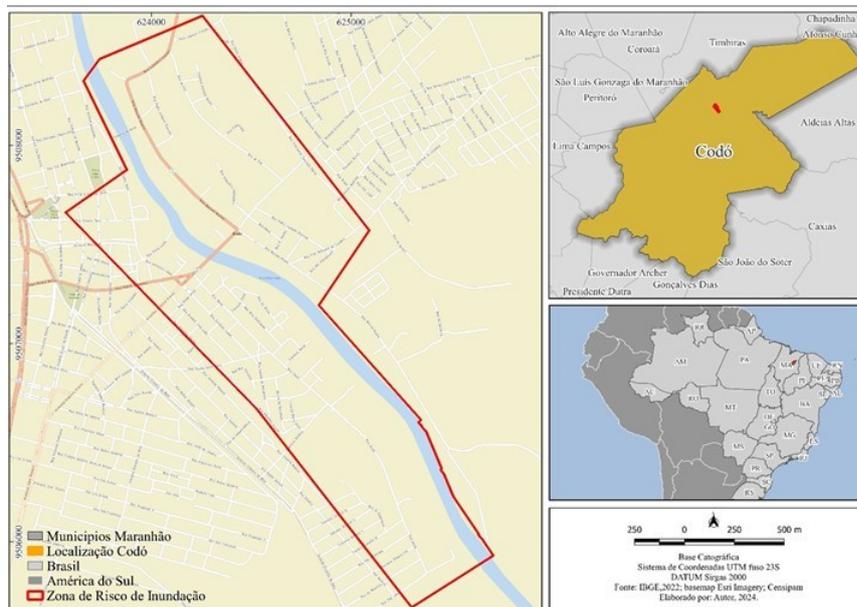
Como destacado anteriormente, por questões de simplicidade, estamos considerando em nossas simulações que o formato da área da seção transversal do rio é retangular. Pode-se observar que, no quarto dia, o rio atinge sua capacidade máxima de

Figura 10 – Mapeamento da Defesa Cível



Fonte: Pinheiro (2024)

Figura 11 – Zonas de riscos de inundação



Fonte: Pinheiro (2024)

água, com a área de sua seção transversal chegando a aproximadamente 2.115 m^2 . Dado que a área da seção transversal do rio é retangular, podemos considerar, sem perda de generalidade, que a altura da área corresponde ao nível da água do rio, enquanto sua base corresponde à largura do rio.

Logo, em nossa análise de cenários de propagação da onda de enchentes, iremos considerar o maior nível de água registrado pela defesa civil, que é de aproximadamente 7 m, limite considerado como estado de alerta pelas autoridades. Assim, ao determinar a

base (largura do rio), poderemos estimar quantos metros a água atinge às margens do rio em seu estado de cheia. Assim, considerando 7 m como a altura, e sabendo que a área total da seção transversal é 2.115 m^2 , a largura do rio será de aproximadamente 302,14 m. Portanto, esses valores serão utilizados como estimativas para realizarmos as análises de propagação das enchentes e determinarmos o alcance das águas nas margens do rio em seu estado de cheia.

5.2 Curvas de Nível

Para um melhor detalhamento das áreas suscetível a enchentes, utilizamos as curvas de nível para representar a altitude das áreas próximas as margens do Rio Itapecuru. Essas curvas de nível se conectam em pontos de mesma elevação utilizando como referência o nível do mar. Outrossim, essas curvas são muito utilizadas para analisar áreas de riscos a enchentes. Logo, essas curvas são responsáveis por fornecer informações iminentes sobre a topografia do terreno.

Figura 12 – Curvas de Nível ao longo do rio no tecido Urbano de Codó



Fonte: Google Earth, 2024

Na imagem 12, mostra áreas próximas as margens do rio Itapecuru, observa-se as de curvas nível de cor amarelada delimitando todo trecho ao longo do curso do Rio. Porém, essas curvas de nível não são muito precisa, é apenas para termos uma noção da variação do relevo as margens do Rio Itapecuru, logo ela está destacando uma área no parâmetro de 300m. Ademais, essas curvas de nível está mostrando a variação do terreno em diferentes altitudes em relação ao nível do mar.

De acordo com as análises do gráfico, na parte inferior da imagem, toda área abaixo de 40 metros de altitude em relação ao nível do mar está suscetível a inundações. Além do mais, essas áreas de risco estão sendo delimitada pelas curvas de nível, e todo esse terreno que está dentro dessas curvas de nível está abaixo de 40m de altitude. Nesse sentido, pode-se afirmar que em períodos chuvosos essas áreas abaixo de 40m será facilmente inundadas. Portanto, esse mapeamento é essencial para identificar as áreas de baixa altitude que pode ser inundadas em períodos chuvosos, assim, podendo ser utilizados no auxílio em planos de prevenção contra inundações.

5.3 Bairro Trizidela

Figura 13 – Bairro Trizidela



Fonte: Google Earth, 2024.

Conforme a Defesa Civil classificou, esta região é considerada uma área de risco, como mostrado na Figura 10. Contudo, ao analisar a realidade local do bairro da Trizidela, tal classificação parece inconsistente, pois não há indícios de que essa área tenha sido alagada anteriormente. Essa avaliação pode ser questionada ao se levar em consideração fatores históricos e o relevo específico da área, que apresenta uma elevação significativa.

O relevo desta área atua como uma barreira natural, prevenindo inundações nas áreas mais próximas. O perfil altimétrico da área, conforme indicado pelas curvas de nível, está acima de 41m, caracterizando-a como uma zona de baixo risco de inundação. Apesar de estar localizada dentro de um raio de aproximadamente 150m a partir do centro do rio, a margem direita, no sentido montante a jusante, apresenta uma elevação maior. Isso faz com que o escoamento das águas seja direcionado para área de menor altitude, situadas a aproximadamente 36m de elevação. Conseqüentemente, o volume de água da seção transversal nesta área tende a escoar para essas áreas mais deprimidas.

5.4 Bairro Santa Filomena

Como podemos observar na Figura 14, o bairro Santa Filomena está localizado na margem oposta ao bairro Trizidela. Conforme ilustrado na Figura 12, parte do bairro encontra-se dentro das curvas de nível com baixa elevação, em torno de $36m$. Como analisado anteriormente, essa área é classificada como de risco, tendo como referência a Rua da Estrela, situada próxima às margens do rio Itapecuru, como evidenciado no mapa.

De acordo com análises da Defesa Civil e o contexto histórico, essa área já foi afetada em período chuvoso, um fenômeno comum em áreas próximas ao curso d'água do rio Itapecuru. Outrossim, quando o rio acumula grande volumes de água, transborda e invade as áreas mais baixas. Essa análise corrobora a hipótese de que, caso o nível do rio atinja $7m$, é provável que ocorra inundação das margens em uma faixa de aproximadamente $300m$, ou seja, $150m$ para cada lado.

Figura 14 – Bairro Santa Filomena



Fonte: Goolge Earth, 2024.

5.5 Santo Antônio

Nesta seção, será analisada a área do bairro Santo Antônio, conforme mostrado na Figura 15. Observa-se que grande parte do bairro está dentro das curvas de nível com baixa elevação, o que o torna suscetível a enchentes, como também ilustrado na Figura 12. Com base nas análises da Defesa Civil e no contexto histórico local, esta área sofre anualmente com enchentes durante os períodos de chuvas intensas, sendo uma das regiões mais afetadas do município.

Nesse contexto, foram realizadas medições no bairro Santo Antônio, e a área de risco está representada no mapa por uma cor amarelada, indicando sua vulnerabilidade às enchentes durante os períodos chuvosos.

Figura 15 – Bairro Santo Antônio



Fonte: Google Earth, 2024

Ademais, quando o nível da água do rio Itapecuru atinge ou ultrapassa 7m de altura, considerado pelas autoridades como um estado de alerta para inundações, a água transborda e se espalha pelas margens, invadindo áreas urbanas próximas. Isso obriga muitos moradores a deixarem suas residências e enfrentarem a perda de bens pessoais, além de danos permanentes à infraestrutura de suas casas.

Observa-se que a margem oposta ao bairro Santo Antônio não está dentro das curvas de nível mais baixas, pois essa área apresenta um relevo elevado, acima de 41m. Esse relevo mais elevado atua como uma barreira natural, direcionando o volume de água para a margem esquerda do rio, o que provoca inundações no bairro Santo Antônio em um raio superior a 150m.

6 Conclusão

De acordo com a simulação matemática realizada no software Matlab, foi obtida uma largura de aproximadamente $302m$, assim distribuindo $150m$ para cada lado da margem. Com base nesses resultados, foram realizadas medições no Google Earth para identificar áreas suscetíveis a enchentes dentro dos parâmetros definidos pela simulação. Essas medições permitiram mapear uma área de risco de alagamento, representada graficamente por uma cor amarelada. Essa área corresponde a regiões que poderiam ser cobertas por inundações em períodos de chuvas intensas, hipoteticamente, quando o nível do rio atingisse $7m$ de altura. Os cálculos consideraram diversos fatores, como o perfil topográfico do terreno e a expansão da largura do rio com o aumento do volume de água.

A utilização de simulações numéricas para avaliação de fenômenos hidrodinâmicos fluviais mostrou-se uma técnica indispensável na gestão de recursos hídricos, especialmente em áreas urbanas vulneráveis a enchentes. Essa abordagem possibilita a previsão temporal da evolução de eventos extremos, oferecendo subsídios para a tomada de decisões estratégicas. Neste estudo, os objetivos propostos foram plenamente alcançados, permitindo a observação e avaliação detalhada dos cenários fluviais do rio Itapecuru, com a aplicação do método de diferenças finitas no trecho compreendido entre os municípios de Caxias e Timbiras, Maranhão.

A análise numérica do problema de enchentes forneceu informações valiosas sobre a largura da seção transversal do rio, o volume de água acumulado e a formação de fenômenos como saltos hidráulicos, que influenciam diretamente as características das inundações na região.

Conclui-se que os modelos hidrodinâmicos utilizados não apenas detalham a dinâmica fluvial do rio Itapecuru, mas também oferecem aplicações práticas importantes. Entre essas, destacam-se a implementação de sistemas de alerta precoce, o planejamento de estratégias de evacuação. Assim, este estudo contribui significativamente para a mitigação dos impactos das enchentes e para a gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

Referências

- BASSANEZI, R. C. Ensino-aprendizagem com modelagem matemática: uma nova estratégia. São Paulo: Contexto, 2002. 26 p. Citado na página 14.
- BATISTA, L. M. R. O sistema ITALUIS na participação do abastecimento de água da capital do Maranhão. 1997. Degeo, UFMA. Citado na página 12.
- CASTRO, A. L. C. Manual de desastres. Brasília: Ministério da Integração Nacional/Secretaria Nacional de Defesa Civil, 2003. v.1. 173 p. Citado na página 11.
- CHENG, C. T.; ZHAO, M. Y.; CHAU, K. W.; WU, X. Y. Using genetic algorithm and topsis for xinjiang model calibration with a single procedure. *Journal of Hydrology*, v. 316, p. 129–140, jan 2006. Acesso em: 20 set. 2012. Disponível em: <<http://www.periodicos.capes.gov.br>>. Citado na página 15.
- Correia Filho, F. L.; GOMES Érico R.; NUNES, O. O.; Lopes Filho, J. B. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão: relatório diagnóstico do município de Codó. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011. 31 p.: il. Citado na página 26.
- COURANT, R.; FRIEDRICHS, K.; LEWY, H. Über die partiellen differenzgleichungen der mathematischen physik. *Mathematische Annalen*, Springer, v. 100, n. 1, p. 32–74, 1928. Citado na página 19.
- ECKARDT, E. Geração de modelo cartográfico aplicado ao mapeamento das áreas sujeitas às inundações urbanas na cidade de Lajeado RS. 117 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, 2008. Citado na página 14.
- Fragoso Júnior, C. R. Regionalização da vazão máxima instantânea com base na precipitação de projeto. *Revista Eletrônica de Recursos Hídricos*, v. 1, n. 1, 2004. Citado na página 15.
- GARCIA, C. Modelagem e Simulação. São Paulo: EDUSP, 1997. Citado na página 14.
- NACHBIN, A.; TABAK, E. Equações Diferenciais em Modelagem Matemática Computacional. Rio de Janeiro: IMPA, 1997. Citado 3 vezes nas páginas 16, 18 e 25.
- NIROSHINIE, M. A. C.; NIHEI, Y.; OHTSUKI, K.; OKADA, S. Flood inundation analysis and mitigation with a coupled 1d-2d hydraulic model: A case study in kochi, japan. *Journal of Disaster Research*, v. 10, n. 6, p. 1099–1109, 2015. Citado na página 14.
- PINHEIRO, G. L. Uso das Geotecnologias para Geração de Dados para Estudos de Riscos de Inundação. Trabalho de Conclusão de Curso — Instituto Ciberespacial, Belém, Pará, abril 2024. Orientadora: Ma. Carolina da Silva Gonçalves. Coorientador: Ma. Cairo Eduardo Carvalho Barreto. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

PORTO, L. L. M. A.; MOTTA, E. J. de O.; SOUZA, C. C. de. Plano Nascente: Itapecuru plano de preservação e recuperação de nascentes da bacia hidrográfica do rio Itapecuru. Brasília: Codevasf, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 26.

RECKZIEGEL, B. W. Levantamento dos Desastres Desencadeados por Eventos Naturais Adversos no Estado do Rio Grande do Sul no Período de 1980 a 2005. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Geografia)) — Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007. Citado na página 11.

SANTOS, R. Vulnerabilidade Ambiental Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos? [S.l.]: Brasília, 2007. 192 p. Organizado por R.F. Santos. Citado na página 11.

SILVA, A. N. Previsão de Vazões de Rios como Ferramenta na Minimização dos Impactos das Inundações. Cidade: Editora XYZ, 2006. Citado na página 15.

TUCCI, C. E. M. Previsão das Inundações em Tempo Real. Cidade: Editora XYZ, 2005. Citado na página 14.