



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO AUGUSTO MARQUES DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DE SUB-BACIAS COMO BASE
PARA PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE LAJES/RN**

ANGICOS/RN

2024

JOÃO AUGUSTO MARQUES DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DE SUB-BACIAS COMO BASE
PARA PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE LAJES/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Osvaldo Nogueira de Sousa Neto,
Prof. Dr.

ANGICOS/RN

2024

JOÃO AUGUSTO MARQUES DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DE SUB-BACIAS COMO BASE
PARA PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS NO
MUNICÍPIO DE LAJES/RN**

Trabalho Final de Graduação apresentado a
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Defendida em: 19 / 04 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **OSVALDO NOGUEIRA DE SOUSA NETO**
Data: 25/04/2024 20:29:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Osvaldo Nogueira de Sousa Neto, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ARTHUR GOMES DANTAS DE ARAUJO**
Data: 25/04/2024 20:05:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Arthur Gomes Dantas de Araujo, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **IGOR JOSE NASCIMENTO DE MEDEIROS**
Data: 25/04/2024 17:24:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Igor José Nascimento de Medeiros, Prof. Me. (UFERSA)
Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

SS586 Silva, João Augusto Marques da.
c CARACTERIZAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA DE SUB-BACIAS
COMO BASE PARA PROJETOS DE CONSTRUÇÃO DE
BARRAGENS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE LAJES/RN /
João Augusto Marques da Silva. - 2024.
61 f. : il.

Orientador: Osvaldo Nogueira de Sousa Neto.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia Civil,
2024.

1. Análises Hidrológicas. 2. Geoprocessamento.
3. Caracterização Geomorfométrica. 4.
Caracterização Fisiográfica. 5. Bacia
Hidrográfica. I. Neto, Osvaldo Nogueira de Sousa,
orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a).

Biblioteca Campus Angicos
Bibliotecário: Helder Romero Maia Duarte
CRB: 15/673

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gratidão a DEUS, onde sempre encontro forças, inspiração e desejo de vencer quaisquer que sejam as dificuldades.

Aos meus pais Maria Mariana Marques da Silva e João Maria da Silva pela paciência e apoio que sempre me deram para que eu seja capaz de desenvolver tudo aquilo que me traz crescimento, principalmente como ser humano, minha gratidão eterna, sentimento indescritível.

À minha avó, Severina Nunes da Silva, analfabeta e que mesmo enfrentando o Alzheimer à sua maneira jamais deixou de demonstrar o quanto me ama e me apoia sempre.

Aos meu tio Raimundo e a minha tia Nena pelo acolhimento em seu lar, onde de fato eu me senti em casa sempre que estive lá.

Ao meu amigo e professor orientador Osvaldo Nogueira de Sousa Neto por toda a dedicação, suporte acadêmico e nos incentivos que sempre me fizeram e fazem acreditar que posso ir além.

Aos todos os meus amigos e amigas, Rivaelton Silva e em especial ao seu irmão Ricarte Silva “*in memoriam*”, Wesley Thiago, Jefferson Teófilo, Maylla Martins, Jéssica Barros e Graziela Cunha, colegas e conhecidos que participaram e contribuíram para esta etapa da minha vida, muitas vezes vocês foram a minha família.

Ao meu amigo Júnior Barbosa, a minha gratidão pela grande ajuda, por de prontidão ter me disponibilizado um computador que pudesse suportar os programas aos quais necessitei nessa pesquisa, no momento em que o que eu utilizava havia apresentado defeito.

Aos meus professores por todos os ensinamentos de vida e conhecimentos compartilhados e em especial àqueles aos quais foi possível cultivar uma relação de amizade e cordialidade.

Aos técnicos Cleber e Felipe Wagner da EMATER-RN Lajes, pelos dados geográficos fornecidos para esta pesquisa.

Minha imensa gratidão àqueles que compõem a Universidade Federal Rural do Semiárido – UFERSA Campus Angicos, desde as “tias” da limpeza, como carinhosamente as considero, técnicos administrativos e de laboratório, motoristas, coordenação de curso e direção do campus.

Quando a chuva toca o solo do sertão
O sertanejo se completa de alegria
Tudo o que ver se transforma em poesia
De felicidade enche o próprio coração
É grato a DEUS, pois sabe da precisão,
Da água boa que espanta a estiagem
Mudando assim por completa a paisagem
Pela colheita no roçado em abundância
O nordestino sabe bem da importância
Que é poder ver sangrar cada barragem.

J.A.M.

RESUMO

As aplicações através da utilização do sensoriamento remoto por parte do Sistema de Informação Geográfica (SIG) cada vez mais se tornam indispensáveis às análises, na engenharia e em estudos relacionados aos recursos hídricos. A utilização de ferramentas de geoprocessamento na concepção de projetos desenvolvidos nesta área contribui para a inserção de novas tecnologias, em suma, em regiões semiáridas, dentre elas, as barragens subterrâneas (BS). A partir da identificação da problemática, que trata em sua grande parte da ausência de estudos prévios para obtenção de dados que justifiquem a escolha de locais apresentem condições mínimas viáveis para construção das barragens subterrâneas, esta pesquisa tem por objetivo a obtenção de dados através da caracterização geomorfométrica e fisiográfica de sub-bacias referentes a área de estudo que compreende a região do município de Lajes/RN, situada ao extremo oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim. Os *softwares* utilizados na pesquisa foram o QGIS versão 3.28.11 Firenze e o HEC-HMS versão 4.11. As informações de dados geográficos de terreno foram obtidas a partir do projeto FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) da Universidade de Bristol. Com base nos parâmetros obtidos das sub-bacias analisadas, foi possível identificar que o relevo da região de estudo é classificado como plano e suave-ondulado em aproximadamente 68,9% da área, o que demonstra que o relevo é pouco acidentado e favorece para o lento escoamento superficial, e por meio dos parâmetros como K_f , K_c e I_c , fator de forma, coeficiente de compacidade e índice de circularidade, respectivamente, resultando em um indicativo de que as sub-bacias apresentam baixa capacidade de produzirem enchentes. As BS analisadas se mostram eficientes quanto a sua construção em canais de ordem (proposto por Strahler) 4, 5 e 6, sendo apenas uma delas construída em um canal de ordem 1, limitando assim a sua área de acumulação de água no subsolo. A construção de BS se mostra como uma alternativa viável para a região de estudo, devido ser uma tecnologia de relativo baixo custo e que traz benefícios para os pequenos produtores por um longo período de tempo, incluindo o que compreende o período de estiagem que se estende por cerca de 8 meses, característico da região semiárida.

Palavras-chave: Análises Hidrológicas. Geoprocessamento. Caracterização Geomorfométrica. Caracterização Fisiográfica. Bacia Hidrográfica.

ABSTRACT (OPCIONAL)

Applications through the use of remote sensing by the Geographic Information System (GIS) are increasingly becoming indispensable for analysis, engineering and studies related to water resources. The use of geoprocessing tools in the design of projects developed in this area contributes to the insertion of new technologies, in short, in semi-arid regions, among them, such as underground dams (BS). From the identification of the problem, which largely deals with the lack of studies to obtain data that justify the choice of locations presenting minimum viable conditions for the construction of underground dams, this research aims to obtain data through geomorphometric and physiographic characterization of sub-basins referring to the study area that comprises the region of the municipality of Lajes/RN, located at the western end of the Ceará-Mirim River Basin. The software used in the research was Qgis version 3.28.11 Firenze and HEC-HMS version 4.11. Geographic terrain data information was obtained from the FABDEM (Forest And Buildings Remove Copernicus DEM) project at the University of Bristol. Based on the analyzes obtained from the proven sub-basins, it was possible to identify that the relief of the study region is classified as flat and gently wavy in approximately 68.9% of the area, which demonstrates that the relief is not very rugged and favors for slow surface runoff, and through parameters such as K_f , K_c and I_c , shape factor, compactness coefficient and circularity index, respectively, resulting in an indication that the sub-basins have a low capacity to produce in floods. The BS demonstrate that they are efficient in terms of their construction in channels of order (proposed by Strahler) 4, 5 and 6, with only one of them being built in a channel of order 1, thus limiting its area of water accumulation underground. The construction of BS appears to be a viable alternative for the study region, as it is a relatively low-cost technology that brings benefits to small producers over a long period of time, including the estimated period that extends for about 8 months, characteristic of the semi-arid region.

Keywords: Hydrological Analysis. Geoprocessing. Physiographic Characterization. Hydrographic basin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Elementos de uma barragem subterrânea.....	18
Figura 2 - Abertura de vala para colocação da lona para barramento do fluxo subterrâneo do lençol freático	19
Figura 3 - Barragem subterrânea modelo CAATINGA.....	20
Figura 4 - Barragem subterrânea modelo Costa-Melo.....	21
Figura 5 - Barragem subterrânea modelo CPATSA/EMBRAPA	21
Figura 6 - Barragem subterrânea submersível no período de chuvas	22
Figura 7 - Poço instalado dentro da área de plantio da barragem subterrânea (A); piezômetro instalado dentro da área de plantio da barragem subterrânea (B)	23
Figura 8 - Plantio em curva de nível (A) e preparo do solo à tração animal (B)	24
Figura 9 - Mapa de Localização da área de estudo	27
Figura 10 - Em a, proposta de Horton (1945) e em b, proposta de Strahler (1952)	37
Figura 11 - Mapa de delimitação automática WBT e delimitação IBGE - BHRCM	38
Figura 12 - Mapa de Localização da área de estudo	39
Figura 13 - Mapa de localização das sub-bacias e barragens subterrâneas.....	40
Figura 14 - Mapa hipsométrico de Lajes/RN.....	41
Figura 15 - Mapa de declividade do relevo	43
Figura 16 - Mapa de uso e cobertura do solo.....	45
Figura 17 - Mapa de declividade – Sub-bacia B.....	46
Figura 18 - Mapa de declividade – Sub-bacia D.....	46
Figura 19 - Mapa de declividade – Sub-bacia H.....	47
Figura 20 - Mapa de declividade – Sub-bacia L.....	47
Figura 21 – Curva Hipsométrica – Sub-bacias H, B, D e L.....	48
Figura 22 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia B	53
Figura 23 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia D.	53
Figura 24 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia H.	54
Figura 25 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia L.	54

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características fisiográficas analisadas nas sub-bacias estudadas	33
Quadro 2 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia H.	49
Quadro 3 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia B	49
Quadro 4 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia L.....	50
Quadro 5 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia D.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Definição de limiar para obtenção de rede de drenagem.....	30
Tabela 2 - Nomenclaturas das barragens subterrâneas e suas respectivas sub-bacias	32
Tabela 3 - Altitudes características do relevo de Lajes/RN.	41
Tabela 4 - Quantificação de área das classes de altimetria de hipsometria.....	42
Tabela 5 - Quantificação de área das classes de altimetria das declividades.	43
Tabela 6 - Caracterização fisiográfica das sub-bacias hidrográficas	51
Tabela 7 - Barragens subterrâneas e suas respectivas posições quanto a ordem dos canais de drenagem onde foram construídas.	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BS	Barragem Subterrânea
BHRCM	Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim
CPATSA	Centro de Pesquisa Agropecuária do Trópico Semiárido
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EMATER	Instituto de Inovação para o Desenvolvimento Rural Sustentável
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FABDEM	Forest And Buildings Removed Copernicus DEM
HEC-HMS	Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital de Terreno
Qgis	Quantum Gis
RN	Rio Grande do Norte
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semiárido
UTM	Universal Transversa de Mercator
WBT	Whitebox Tools

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
\$	Cifrão
h	Hora
Km	Quilômetro
Kg	Quilograma
m	Metro
min	minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo geral	17
1.1.2 Objetivos específicos.....	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. Barragens subterrâneas	18
2.2. Tipos e modelos de barragens subterrâneas	20
2.2.1 Barragens subterrâneas	20
2.2.2 Barragem subterrânea submersível.....	21
2.3. Manejo da água.....	22
2.4. Manejo do solo	23
2.5 Impactos econômicos atrelados às barragens subterrâneas	24
2.6 Caracterização morfométrica e fisiográfica de bacias e sub-bacias.....	25
2.7. Ferramentas de geoprocessamento e SIG's como auxílio para a delimitação de bacias e sub-bacias.....	26
3. METODOLOGIA.....	27
3.1 ÁREA DE ESTUDO	27
3.1.1 Clima	27
3.1.2 Vegetação	28
3.1.3 Geologia.....	28
3.1.4 Hidrogeologia.....	28
3.1.5 Pedologia	28
3.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS	29
3.3 OBTENÇÃO DE DADOS DAS BARRAGENS SUBTERRÂNEAS.....	31
3.4 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DE SUB-BACIAS	32
3.4.1 Fator de forma (Kf)	33
3.4.2 Coeficiente de compactidade (Kc).....	33
3.4.3 Densidade de drenagem (Dd)	34
3.4.4 Índice de circularidade (Ic)	35
3.4.5 Tempo de concentração (Tc)	36
3.4.6 Modelo de hierarquia hídrica proposto por Strahler.....	36
4. RESULTADOS	37

4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DE SUB-BACIAS	37
4.1.1 Delimitação automática da BHRCM em comparação com a delimitação da base de dados do IBGE	38
4.1.2 Localização das BS na área de estudo e definição das barragens a serem caracterizadas quanto a sua geomorfometria e de forma fisiográfica.	39
4.2 Características morfométricas de Lajes/RN	40
4.3 Análise dos parâmetros morfométricos e fisiográficos das sub-bacias caracterizadas.	45
4.3.1 Características morfométricas das sub-bacias B, D, H e L	45
4.3.2 Parâmetros fisiográficos das sub-bacias caracterizadas	48
4.3.3 Modelo de hierarquia hídrica proposto por Strahler.....	52
4.3.4 Análise das barragens subterrâneas objeto deste estudo	55
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

A crescente busca por mecanismos e tecnologias que visam minimizar os impactos oriundos das frequentes estiagens que ocorrem no semiárido brasileiro e em partes do mundo, consiste em um fator que a cada dia evidencia e torna-se objeto de estudo nas pesquisas acadêmicas desenvolvidas em todos os níveis de ensino.

De acordo com relatórios da Organização das Nações Unidas (NAÇÕES UNIDAS, 2015), estima-se que no mundo 783 milhões de pessoas não têm acesso a uma quantidade mínima aceitável de água potável, em termos de uso, a agricultura representa a principal fonte de consumo de água doce (70%), sendo o restante direcionado ao uso doméstico (17%) e industrial (13%).

A ONU (2015) alerta que, se essa tendência de escassez hídrica continuar, as estatísticas podem ser ainda piores: até 2025 três bilhões de pessoas não terão acesso à água, em razão do mau uso dos recursos naturais. Ao todo, 20% dos aquíferos do mundo são explorados além do limite, o que pode comprometer o abastecimento no futuro.

O semiárido brasileiro é caracterizado por longos períodos de escassez hídrica em virtude das irregularidades climáticas. Essa má distribuição das chuvas termina sendo um fator preponderante na realidade social e econômica dessa região, onde ficam os piores indicadores sócias do Brasil (FERREIRA, 2009).

Dentre as alternativas para a minimização dos impactos e melhoria na convivência do homem do campo em regiões de semiárido estão as obras de instalações de barragens subterrâneas (BS), uma obra de custo relativamente baixo e que atinge níveis de eficiência consideravelmente altos, porém, o que muitas vezes ocorre é a ausência de estudos prévios que permitam que a eficiência desta tecnologia de fato seja obtida.

A fundamentação técnica se faz necessária para a consolidação de um embasamento adequado e que se torne amplamente utilizado e divulgado para toda a comunidade, como um dos pilares principais da ciência, neste caso, para o que diz respeito aos parâmetros como, escolha do local para instalação das barragens subterrâneas, profundidade da vala, necessidade ou não de sangradouro, necessidade ou não de barramento que se eleve acima do nível do terreno, instalação adequada de poço, dentre outros.

Cirilo et al. (2003) que entrevistaram famílias beneficiadas pela instalação de 151 barragens subterrâneas no semiárido pernambucano e verificaram que as BS permitiram maior acesso a alimentos e água, além de contribuir significativamente para o desenvolvimento da agricultura nas comunidades. E Barbosa et al. (2011) que relataram que as BS têm contribuído

para a transição agroecológica em comunidades na Paraíba.

Tendo em vista cada parâmetro necessário à instalação deste equipamento nas propriedades rurais, as famílias beneficiadas passam a contar com melhores condições de produção de alimentos a partir da agricultura de subsistência, por um intervalo de tempo mais longo, frente a períodos de estiagem comuns à região Nordeste, salvo exceções em que as médias de precipitação é alta onde as taxas pluviométricas são consideradas baixas, em suma, na região de semiárido, podendo assim produzir durante praticamente todo o ano, com as mais variadas culturas, gerando condições de renda extra.

Diante disso, é indispensável que haja a necessidade de medir a eficiência obtida a partir do pleno funcionamento deste tipo de tecnologia construtiva instalada em regiões de semiárido, e por consequência, tornar esta técnica comum nas propriedades rurais, tendo em vista, ser uma obra de baixo custo e que traz inúmeros benefícios para o pequeno produtor no campo.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Obter dados, por meio da caracterização geomorfométrica e fisiográfica de sub-bacias localizadas no município de Lajes/RN na Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim, usando ferramentas de geoprocessamento, que possam auxiliar em projetos de barragens subterrâneas por meio de informações de informações geográficas de terreno obtidas a partir do projeto FABDEM.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analisar mapas com o auxílio do *software* QGIS versão 3.28.11 Firenze por meio da ferramenta Whitebox Tools, para tratamento dos dados geográficos das imagens obtidas a partir do projeto FABDEM;
- Proceder uma caracterização fisiográfica das sub-bacias nas quais as BS estão locadas através do *software* HEC-HMS versão 4.11;
- Caracterizar áreas propícias para a instalação de BS a partir de modelos de ordem e hierarquia das bacias hidrográficas proposto por Strahler;
- Apontar através de parâmetros geomorfológicos e fisiográficos, um paralelo entre as BS que obtiveram “sucesso” e “fracasso” em termos de eficiência a partir da parametrização dos elementos com a sua posição nas respectivas sub-bacias a que pertencem.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. BARRAGENS SUBTERRÂNEAS

A escassez de água é uma problemática frequente no semiárido nordestino a décadas, diante deste fator preponderante de irregularidades dos índices pluviométricos, é viável que haja uma abordagem voltada a busca por alternativas que minimizem os impactos ocasionados pela estiagem que perdura por meses, dentre estas alternativas, podemos citar os projetos de incentivo a construção de cisternas e de barragens subterrâneas nas propriedades rurais.

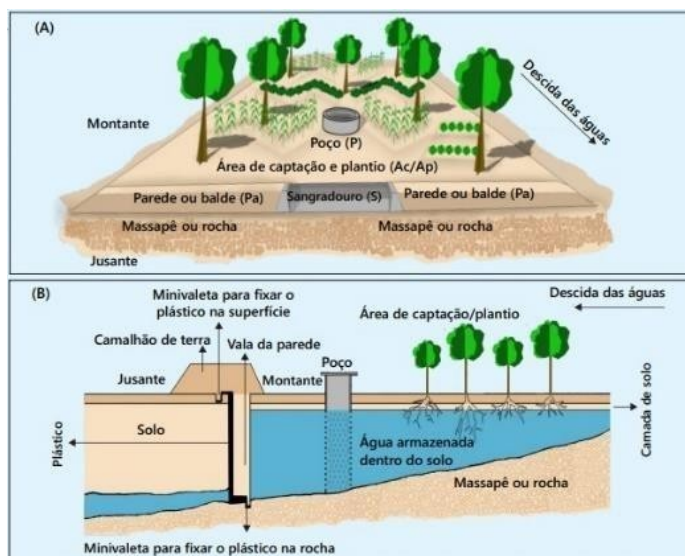
Os agricultores do semiárido estão sempre enfrentando riscos de perdas totais ou parciais de suas safras. Para vencer essas limitações, é imprescindível que se aumente a eficiência do aproveitamento de água das chuvas que caem nas unidades de produção agrícola. Este aumento da eficiência pode ser conseguido pela combinação do uso de técnicas de captação de água de chuva com a escolha de cultivos apropriados à baixa exigência hídrica (Porto et al., 1999).

A segunda metade do século 20 foi caracterizada pelo desenvolvimento de sistemas para explorar águas subterrâneas e garantir o aporte adequado para fornecer alimentos e água potável, principalmente em regiões áridas e semiáridas (LLAMAS, 1999).

Segundo Costa et al. (1998), o barramento subterrâneo consiste em construir um septo impermeável no aluvião com a finalidade de impedir que a água nele acumulada continue a escoar durante o período de estiagem.

A barragem subterrânea consiste em construir um septo - cut off no depósito aluvial de um rio ou riacho, com a finalidade de impedir que a água, nele acumulada, continue a escoar durante o período de estiagem. (Figura 1). Como resultado, tem-se, à montante, um substrato úmido para cultivo e suporte para o consumo (OLIVEIRA, 2001).

Figura 1 - Elementos de uma barragem subterrânea.



Fonte: Lopes (2021)

Esta tecnologia consiste basicamente em um barramento de direção transversal em referência ao leito do rio, se dá a partir da instalação de uma manta de composição plástica flexível que visa criar uma barreira impermeável que tem por finalidade criar ou elevar o lençol freático de modo em que aumente a umidade do solo, e por sua vez, consequentemente eleve a sua capacidade produtiva. Este barramento (Figura 2) ocorre por meio da escavação de uma vala de profundidade que varia do nível do terreno até a camada impermeável rochosa, que é uma característica comum a maioria dos tipos de solo do semiárido nordestino.

Figura 2 - Abertura de vala para colocação da lona para barramento do fluxo subterrâneo do lençol freático.



Fonte: Melo (2013)

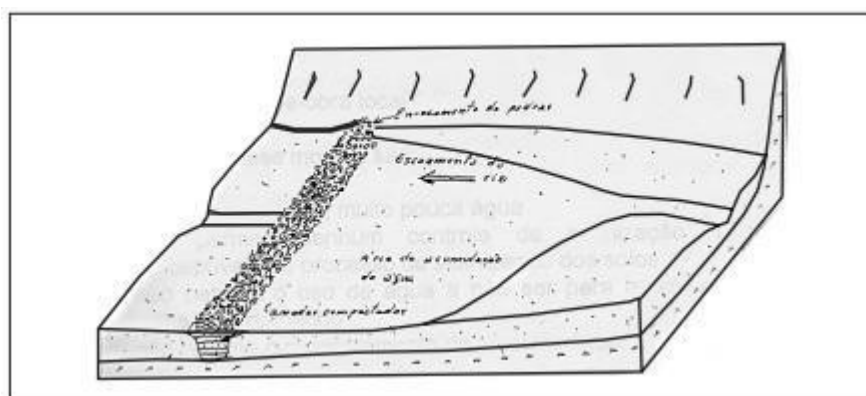
2.2. TIPOS E MODELOS DE BARRAGENS SUBTERRÂNEAS

2.2.1 Barragens subterrâneas

Segundo Oliveira (2001), a barragem subterrânea pode ser construída de várias modalidades, porém apresenta três modelos pela ordem decrescente de complexidade e diferentes custos operacionais de construção. Dentre estes modelos destacam-se três, o modelo Caatinga, o modelo Costa e Melo e o modelo CPATSA/EMBRAPA.

Segundo a Cartilha temáticas tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o Semiárido, em seu volume 3, o modelo CAATINGA se originou de experiências bem sucedidas na construção e manejo de pequenas barragens subterrâneas, implantadas pela organização não-governamental CAATINGA, no município de Ouricuri-PE, dando suporte à agricultura familiar na região há mais de 15 anos. O modelo CAATINGA com suas características construtivas (Figura 3).

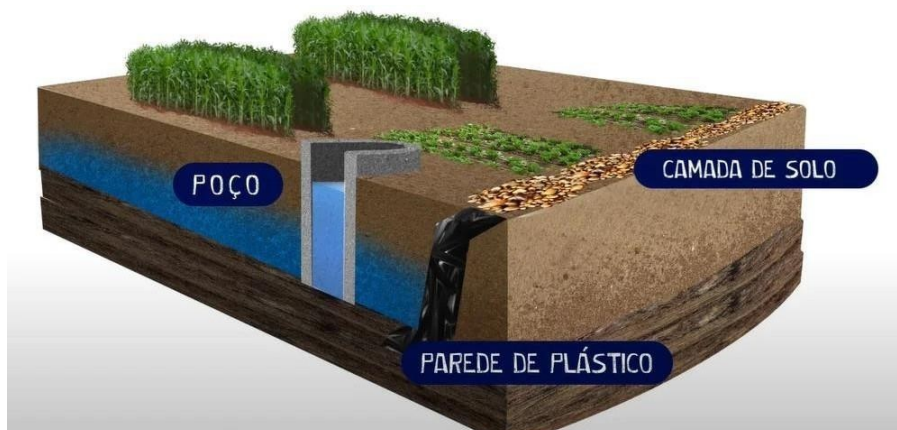
Figura 3 - Barragem subterrânea modelo CAATINGA.



Fonte: Costa (1997).

No início da década 80, pesquisadores da Universidade Federal de Pernambuco, sob a coordenação do Prof. Waldir D. Costa, desenvolveram um tipo de barragem subterrânea que foi aprimorada paulatinamente, sendo o modelo patenteado com a denominação de Costa e Melo (Figura 4), pelos seus principais autores. (CIRILO; COSTA, 1997).

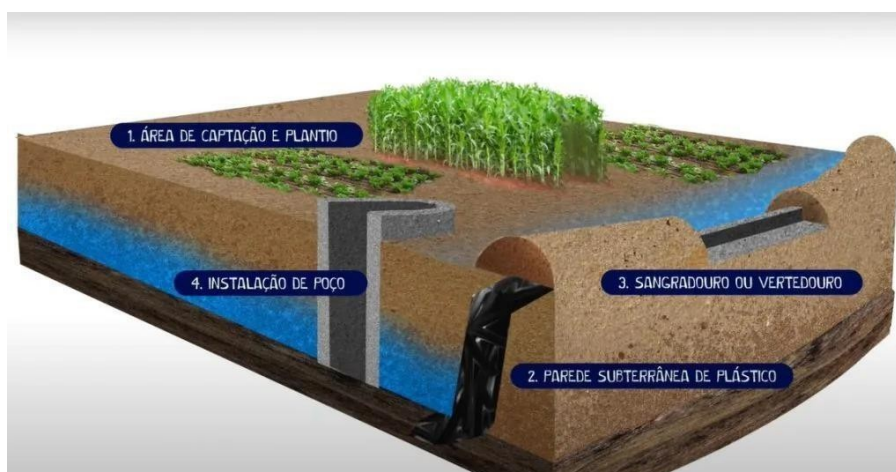
Figura 4 - Barragem subterrânea modelo Costa-Melo.



Fonte: Ciclovivo (2022)

O Modelo CPATSA/EMBRAPA (Figura 5) foi desenvolvido a partir de um conjunto de tecnologias vocacionadas para o nordeste semiárido na década de 80, sendo uma delas a barragem subterrânea para captação, e armazenamento de água para exploração da agricultura de subsistência.

Figura 5 - Barragem subterrânea modelo CPATSA/EMBRAPA.



Fonte: Ciclovivo (2022)

2.2.2 Barragem subterrânea submersível

Os modelos CAATINGA e CPATSA/EMBRAPA (submersível) são indicados para atender a demanda familiar em situações restritivas do potencial de oferta de água. Segundo a EMBRAPA (2021) barragem subterrânea submersível (Figura 6).

É aquela formada por uma parede que parte da camada impermeável ou rocha até uma certa altura acima da superfície do terreno, objetivando barrar, além da água subterrânea, a superficial também. Isso permite que, na época das chuvas, seja formada uma pequena vazante na área de captação/plantio (bacia de acumulação).

Essa água acumulada vai se infiltrando lentamente, proporcionando um maior armazenamento dentro do solo e, conseqüentemente, uma maior quantidade de água disponível às culturas por um maior período de tempo, após as chuvas. Esse tipo de barragem subterrânea pode ser implantado em leito de rio e riacho de média vazão, córregos e em linhas de água/caminhos d'água/linhas de drenagem. A sua parede pode ser de alvenaria, concreto, argila compactada (barro batido) ou de plástico. A escolha do material vai depender da sua disponibilidade na região e da localização da barragem.

Figura 6 - Barragem subterrânea submersível no período de chuvas.



Fonte: Melo (2021)

2.3. MANEJO DA ÁGUA

É necessário que exista uma preocupação voltada ao manejo da água, para que se mantenham pelo maior tempo possível as condições adequadas a sua utilização, seja para o plantio ou para o uso animal, e partindo dessa realidade, a qualidade da água que é um elemento indispensável no cultivo, pois não havendo o controle de manejo adequado, pode acarretar em problemas que irão refletir no solo, assim, segundo a EMBRAPA (2021)

O manejo da água deve ser realizado, devido à alta evapotranspiração anual e à grande variabilidade das chuvas no Semiárido brasileiro, é indispensável que se faça: Monitoramento da qualidade do solo e da água, por meio de uma análise conhecida como condutividade elétrica (CE), no mínimo a cada 2 anos, e por meio de sintomas visuais no solo (branqueamento), de sabor na água e da inibição do desenvolvimento dos cultivos. Instalação de poço na área de plantio, quando possível. Na ausência do poço, é recomendado instalar, no mínimo, três piezômetros (poços de observação), que são canos de PVC de 4 polegadas, até a camada impermeável, ao longo da barragem subterrânea, para acompanhamento do nível do lençol freático e coleta da água para análise (Figura 7). Recomenda-se manter esse cano tampado.

Figura 7 - Poço instalado dentro da área de plantio da barragem subterrânea (A); piezômetro instalado dentro da área de plantio da barragem subterrânea (B).



Fonte: Silva (2021)

Como visto, existem formas de manejo adequado da água em termos de qualidade em uma barragem subterrânea, diante disso, parâmetros específicos devem ser levados em consideração, para que dessa forma, as barragens se tornem efetivas não apenas em sua concepção de construção, mas também em suas condições de pleno funcionamento, rendendo para o pequeno produtor em sua máxima capacidade.

2.4. MANEJO DO SOLO

Bem como a preocupação com a qualidade da água, o solo também requer a mesma atenção, tendo em vista, ser um elemento de fundamental importância no que diz respeito ao quesito produção de culturas de cultivo, é necessário que o solo apresente condições satisfatórias para que o desenvolvimento do plantio atinja os níveis esperados, e segundo a EMBRAPA (2021)

No manejo da barragem subterrânea é recomendado o uso de práticas agroecológicas. O preparo da área de plantio deve ser feito à semelhança da agricultura de vazante, no começo das chuvas, em curva de nível e, preferencialmente, com a utilização de implemento à tração animal. A cada dez linhas de plantio é recomendado abrir um sulco de contenção ou colocar um cordão de pedra para diminuir a força das enxurradas, em casos de chuvas fortes e de longa duração (Figura 8). Outras práticas culturais e de manejo do solo que também devem ser utilizadas são: rotação de cultura; cultivo consorciado; adubação com utilização de esterco, biofertilizantes, compostos orgânicos, tortas vegetais, adubação verde, cobertura morta, em quantidades conforme necessidade do solo e controle de pragas e doenças com utilização de macerados de plantas, a exemplo do nim e da urtiga.

Figura 8 - Plantio em curva de nível (A) e preparo do solo à tração animal (B).



Fonte: Silva (2021)

Com o tratamento adequado do solo à montante da BS, na área de cultivo, os números de produção e qualidade dos alimentos produzidos irá crescer em proporção aos cuidados tomados, sendo assim, se torna indispensável o uso das técnicas destacadas anteriormente, esse fator irá resultar em um ganho econômico expressivo para os pequenos produtores, o que acarreta em uma melhor condição de vida para os agricultores.

2.5 IMPACTOS ECONÔMICOS ATRELADOS ÀS BARRAGENS SUBTERRÂNEAS

Segundo a Embrapa Solos (2024) avaliou os impactos econômicos para agricultores que possuem uma barragem subterrânea instalada em suas propriedades no Semiárido brasileiro. Levando em conta o período de 18 anos analisado, entre 2006 e 2023, foi verificado um incremento anual médio de 375 Kg na produção, que gerou uma renda excedente de R\$ 7.361,10 por hectare para os adotantes da tecnologia social em relação aos agricultores que não a possuem em suas terras.

Já o estudo de avaliação de impactos econômicos, sociais, ambientais e institucionais da barragem subterrânea realizado pela Embrapa há muitos anos, e cujos resultados são apresentados anualmente no seu Balanço Social, apontou que a relação dos Benefícios e Custos (B/C) em 2023 foi de 2,27, o que significa que cada R\$ 1,00 investido pela Empresa nessa tecnologia social gerou um retorno R\$ 2,27 para a sociedade.

O estudo da EMBRAPA (2024) acrescenta ainda que o preço médio da produção por quilograma estimado foi calculado a partir de pesquisas realizadas em mercados locais, verificando-se o comportamento de 78 itens de consumo possivelmente produzidos pelos agricultores. “O estudo resultou na estimativa de R\$ 19,65 por quilograma, que multiplicados pela produção anual excedente, de 375 Kg, resulta num benefício ou incremento anual médio

de renda no valor de R\$ 7.361,10 por hectare para quem possui uma barragem subterrânea em sua propriedade”.

2.6 CARACTERIZAÇÃO MORFOMÉTRICA E FISIOGRÁFICA DE BACIAS E SUB-BACIAS

Com relação aos aspectos morfométricos, de acordo com (Tonello et al. 2006) a declividade do terreno pode ser expressa a partir da variação de altitude entre dois pontos do terreno quando e relação à distância que os separa. Ainda, de acordo com EMBRAPA (1979), as classes de declividades foram hierarquizadas, onde existem intervalos distintos que vão de relevo plano à forte montanhoso.

Quanto aos parâmetros abordados em uma caracterização fisiográfica

Características fisiográficas de bacias hidrográficas são todos os dados que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélites com auxílio de sistemas de informações geográficas (SIGs). Essa caracterização é o primeiro e mais comum procedimento executado em análises hidrológicas ou ambientais, e tem como propósito analisar diversas questões relacionadas com a dinâmica ambiental local e regional. (TEODORO et al., 2007)

Quanto a densidade de drenagem de uma bacia hidrográfica, é possível afirmar que:

A densidade de drenagem é reconhecidamente, uma das variáveis mais importantes para a análise morfométrica das bacias de drenagem, representando o grau de dissecação topográfica, em paisagens elaboradas pela atuação fluvial, ou expressando a quantidade disponível de canais para o escoamento e o controle exercido pelas estruturas geológicas (CHRISTOFOLETTI, 1981).

Com base nessas definições é possível correlacionar as variáveis necessárias para que haja uma fonte de dados que auxiliam diretamente na escolha do local de construção das BS, e assim, se obtenha a sua efetividade máxima, em termos de utilização, sempre atentando para aspectos como, limites das propriedades, as taxas de salinidade do solo e da água pós instalação, e também, por consequência, os benefícios que esta obra de recurso hídrico traz para as comunidades que delas necessitam, em suma, para produção agrícola de subsistência durante um maior intervalo de tempo, no período de estiagem fora da quadra chuvosa característica da região.

2.7. FERRAMENTAS DE GEOPROCESSAMENTO E SIG'S COMO AUXILIO PARA A DELIMITAÇÃO DE BACIAS E SUB-BACIAS.

O uso de ferramentas tecnológicas, por meio de softwares de geoprocessamento, como por exemplo, o QGIS, para elaboração de Modelos Digitais de Elevação - MDE, o HEC-HMS para determinação de características fisiográficas das bacias, e a partir da obtenção de imagens de satélite, Modelos Digitais de Terreno (MDT) referente a área de estudo disponíveis no site da University of Bristol, com o projeto FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM).

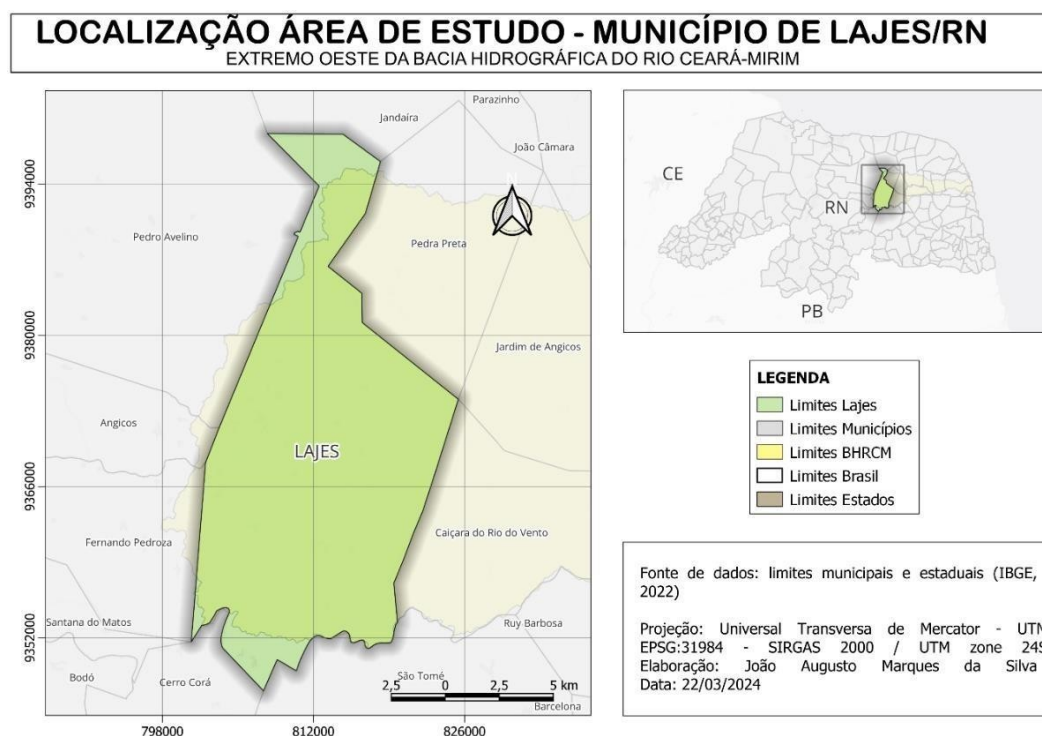
No MDE, as informações do relevo são representadas por meio de uma estrutura numérica de dados que corresponde à distribuição espacial da altitude e da superfície do terreno (Oliveira et al., 2010). Para Lopes et al. (2018), a introdução de informações de relevo em ambiente SIG permite o conhecimento de características em qualquer bacia hidrográfica. Essas informações do terreno podem ser obtidas, dentre outros, pelo Modelo Digital de Elevação (MDE).

3. METODOLOGIA

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A presente pesquisa foi realizada em uma porção da Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim, dentro dos limites políticos geográficos do município de Lajes/RN (extremo oeste da bacia), na Mesorregião Central Potiguar e Microrregião de Angicos, com uma área total de 676,625 km², com população estimada pelo censo de 2022 de 9.866 pessoas, densidade demográfica 14,58 habitantes por quilômetro quadrado e altitude média em torno de 199 m, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2022), como vemos na (Figura 9).

Figura 9 - Mapa de Localização da área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor.

3.1.1 Clima

O município de Lajes/RN possui um clima do tipo muito quente e semiárido, com estação chuvosa atrasando-se para o outono, com período chuvoso compreendendo entre os meses de fevereiro a abril (quadra chuvosa), com temperaturas médias anuais máximas girando em torno 33,0 °C, as médias 27,2°C e as mínimas em torno de 21,0 °C, a umidade

relativa média anual é de 70%, e no que diz respeito a insolação, os números são de 2.400 horas. (CPRM, 2005).

3.1.2 Vegetação

Vegetação predominantemente no município de Lajes/RN, como um todo, é caracterizada por Caatinga Hipoxerófila – vegetação de clima semiárido, apresenta arbustos e árvores com espinhos e de aspecto menos agressivo do que a Caatinga Hiperxerófila. (Silva et al. 2018). Constitui-se ainda por plantas xerófilas e mesófilas, da caatinga ou cerrado, são facilmente encontrados o mandacaru (cardeiro) e macambira, gramíneas, juremas, mufumbos, angicos, juazeiros, algarobas, como também umburana (CAVALCANTI, 2008).

3.1.3 Geologia

O Município de Lajes, geologicamente inserido na Província Borborema, está constituído por litótipos do Complexo Caicó, rochas do Grupo Seridó, representado pelas formações Seridó e Jucurutu, pelos granitóides das suítes Poço da Cruz e Itaporanga e pelos sedimentos das formações Açú e Jandaíra. (CPRM, 2005).

3.1.4 Hidrogeologia

O município de Lajes está inserido no Domínio Hidrogeológico Intersticial, Domínio Hidrogeológico Kárstico-fissural e no Domínio Hidrogeológico Fissural. O Domínio Intersticial é composto de rochas sedimentares da Formação Açú. O Domínio Kárstico-fissural é constituído pelos calcários da Formação Jandaíra. O Domínio Fissural é formado de rochas do embasamento cristalino que englobam o sub-domínio rochas metamórficas constituído da Formação Seridó, Formação Jucurutu, Formação Equador e do Complexo Caicó, e o sub-domínio rochas ígneas da Suíte calcialcalina Itaporanga e da Suíte Poço da Cruz. (CPRM, 2005).

3.1.5 Pedologia

Quanto ao tipo de solo é possível afirmar que o clima, hidrografia, geomorfologia e geologia levam a formação de luvisolos apresentando uma variável de 10 a 50 cm. Existe enorme presença de argila avermelhada a bruno-avermelhada, tipo de solo com ph entre 6,0 e 7,0. São vulneráveis a erosão e salinização, rasos e pedregosos sendo utilizados mais para agriculturas de ciclos curtos. São considerados ainda como solos frágeis (SZILAGYI, 2007). No entanto, a prevalência é de solos litólicos eutróficos arenosos, tem fase arenosa e rochosa,

eles são favoráveis as culturas do algodão arbóreo, feijão, milho e para pastagem em determinadas áreas, na criação animal se destacam as criações de ovinos e caprinos (CAVALCANTI, 2008).

3.2 ASPECTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada nesta pesquisa possui caráter qualitativo, quantitativo, através da pesquisa de fontes bibliográficas que dão suporte e fundamentam os conceitos abordados. O desenvolvimento da pesquisa, se constitui a partir de investigações em barragens subterrâneas construídas no município de Lajes/RN, em plena utilização, onde foram analisados aspectos inerentes ao tipo de construção realizado, seu detalhamento, posição na sub-bacia, até a sua concepção e funcionamento, sendo possível assim, estimar a sua eficiência a partir de uma metodologia com fundamentação técnica.

O trabalho foi desenvolvido a partir da produção de mapas de apresentação da localização das barragens subterrâneas, por meio da elaboração de mapas de Modelo Digital de Terreno (MDT), mapas de divisão das sub-bacias, dentre outros, visando assim, criar um vasto campo de dados que possam contribuir para um resultado tangível e mais próximo da realidade encontrada, e que por sua vez, auxiliem em projetos futuros de construção dessa tecnologia na região estudada.

Através da utilização da base de dados geográficos do FABDEM (Forest And Buildings Removed Copernicus DEM), que é produto de pesquisa da University of Bristol voltado a estudos referentes ao relevo terrestre, consiste em um modelo que tem como resultado um mapa onde são removidos os edifícios e árvores que por sua vez causam distorção na leitura da superfície do terreno, estes foram removidos a partir da base de dados do Copernicus GLO 30.

A pesquisa contou com o uso do *software* livre de geoprocessamento QGIS na versão 3.28.11 Firenze como ferramenta primordial para auxílio na elaboração de um Modelo Digital de Terreno (MDT), bem como, a delimitação automática de bacias a partir SIG Whitebox Tools, com o objetivo de obter as informações de terreno necessárias da área de estudo, situada no extremo oeste da Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim, mais precisamente, nos limites políticos geográficos do município de Lajes/RN.

Com o uso do plugin Whitebox Tools, foi possível delimitar de forma completa e automática a Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim a partir da determinação de um exutório, e com isso, fazer uma comparação entre o produto obtido de forma automática no software Qgis, e a encontrada na base de dados espaciais do IBGE.

Para esta pesquisa, foi definida por convenção a utilização do MDT da delimitação automática, considerando dessa forma o trabalho realizado no software QGIS com o auxílio do plugin Whitebox Tools, ou simplesmente WBT como também pode ser referenciado. Sendo a comparação realizada apenas como fundamentação para fins acadêmicos de modo a comprovar que existe diferenciação entre os dois tipos de arquivos/produtos produzidos.

Posteriormente ao trabalho de delimitação automática da BHRCM, foi realizado os recortes das camadas a serem utilizadas na área de estudo, Para a obtenção das redes de drenagem com a representação dos rios, foi necessária a realização de um cálculo que relaciona um limiar que define a partir de quantas células com base na resolução espacial de 30 m, começa a surgir os canais de drenagem, para isto, foi levado em consideração parâmetros como por exemplo a área da bacia, a área das células, resolução espacial do MDT, dentre outros, como expresso na (Tabela 1).

Tabela 1 - Definição de limiar para obtenção de rede de drenagem.

DX (m)	30
DY (m)	30
ÁREA CÉLULA (m ²)	900
ÁREA DA CÉLULA (km ²)	0,0009
ÁREA THRESHOLD (km ²)	0,027
THRESHOLD (células)	30
NÚMERO DE SEGMENTOS	71,1639
ÁREA DA BACIA (km ²)	2635,7

Fonte: elaborado pelo autor.

Foram definidos valores de 1000, 500, 100 e 50 e 30 células de limiar (Threshold), sendo que quanto menor for a entrada deste dado na planilha, mais detalhada será a rede de drenagem de uma determinada região, sendo assim, para o estudo, foi adotado o valor de entrada 30 células, que remete que os trechos de rios começam a surgir no relevo a partir de 27 metros, esse fator é resultado da relação que gera o produto entre o thershold (células) e a área do thershold expressa em quilômetros quadrados (km²) convertidos para metros (m).

Esta escolha se justifica pelo fato do objeto de estudo (BS) possuir dimensões que necessitam que a rede de drenagem apresente um maior nível de detalhamento, surgindo trechos de rios e canais menores, tendo em vista a hipótese de que algumas das barragens subterrâneas construídas estão locadas em trechos de rios de menor ordem a partir de sua classificação, e também por limitações físicas e territoriais das propriedades.

Todas as camadas utilizadas no *software* QGIS foram reprojetadas para o sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zone 24S, que é o sistema de coordenadas UTM recomendado para se trabalhar com dados geoespaciais no território brasileiro, mais precisamente em relação a área específica de estudo, isso se deve para que não ocorra divergência de posição entre os pixels das imagens, assegurando assim que não exista erros nas leituras na fase de processamento destas imagens a partir de sistemas de coordenadas diferentes, o que pode causar pseudo informações nas representações do produto final gerado.

A partir da obtenção dos dados geográficos de superfície terrestre (MDT), com o auxílio da ferramenta de geoprocessamento especificamente voltada a estudos de análises hidrológicas, HEC-HMS Versão 4.11, foi possível obter a caracterização fisiográfica dos elementos das sub-bacias, sendo estas geradas com dimensões aproximadas a partir de 3,5 km.

Por conseguinte, foi definida uma estimativa de base para medir a eficiência das barragens subterrâneas de acordo com as suas respectivas posições dentro de suas respectivas sub-bacias, levando em consideração toda a caracterização fisiográfica realizada. Lembrando que para a utilização dos dados do MDT no HEC-HMS foi necessário reprojetar as camadas para o sistema de coordenadas WGS 84 / UTM zone 24S, pois o software não trabalha com a opção do sistema de coordenadas SIRGAS 2000 / UTM zone 24S em sua configuração.

3.3 OBTENÇÃO DE DADOS DAS BARRAGENS SUBTERRÂNEAS

O fornecimento dos dados contendo as coordenadas geográficas de localização das barragens subterrâneas da região se deu mediante contato com os técnicos da EMATER-RN na unidade localizada no município de Lajes/RN, onde através do “Sistema Ceres v 2.0” ao qual possuem acesso foi possível obter tais informações. Para evitar exposição de informações particulares, foram modificadas por convenção algumas informações, sendo estas, nome das comunidades e nome dos proprietários, substituídos por nomenclaturas definidas pelo autor, como observadas na (Tabela 2) abaixo.

Tabela 2 - Nomenclaturas das barragens subterrâneas e suas respectivas sub-bacias.

Sub-bacias	Barragens Subterrâneas (BS)
SUB - BACIA A	BS - 08
SUB - BACIA B	BS - 13
SUB - BACIA C	BS - 14
SUB - BACIA D	BS - 01
SUB - BACIA E	BS - 03; BS - 04; BS - 05 e BS - 10
SUB - BACIA F	BS - 07 e BS - 16
SUB - BACIA G	BS - 18 e BS - 19
SUB - BACIA H	BS - 15
SUB - BACIA I	BS - 09 e BS - 17
SUB - BACIA J	BS - 06 e BS - 11
SUB - BACIA K	BS - 20
SUB - BACIA L	BS - 02
SUB - BACIA M	BS - 12

Fonte: elaborado pelo autor.

Inicialmente foram obtidas informações que correspondiam a um número de 38 barragens subterrâneas construídas a partir do convenio denominado “Segunda água”. Foi realizado em seguida o trabalho de geoprocessamento no Qgis para a criação de uma camada de pontos para que assim de forma visual fosse possível identificar a locação de cada BS no território que compreende a área de estudo.

3.4 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DE SUB-BACIAS

Para esta pesquisa foram caracterizadas as variáveis fisiográficas de área de drenagem (A), expressa em (km^2); perímetro (P), expresso em (km); fator de forma (K_f); coeficiente de compactidade (K_c); densidade de drenagem (D_d) expressa em (km km^2); índice de circularidade (I_c); tempo de concentração (T_c) calculada pela equação de Kirpich; características morfométricas: declividade mínima, máxima, média e a amplitude altimétrica máxima das sub-bacias, e por fim, o modelo de ordem de bacias hidrográficas proposto por Strahler. Para uma compreensão detalhada, a caracterização foi dividida em três partes, quanto ao relevo, quanto aos parâmetros geométricos, e por fim, quanto a rede de drenagem, como mostrado no (Quadro 1).

Quadro 1 - Características fisiográficas analisadas nas sub-bacias estudadas.

Característica	Parâmetro	Unidade
Relevo	Altitude mínima	m
	Altitude máxima	m
	Altitude média	m
	Amplitude altimétrica máxima da sub-bacia	m
Geométrica	Área (A)	km^2
	Perímetro (P)	km
	Fator forma da bacia (K_f)	Adimensional
	Coeficiente de compacidade (K_c)	Adimensional
	Índice de circularidade (I_c)	Adimensional
Rede de drenagem	Comprimento do maior fluxo (km)	km
	Densidade de drenagem (D_d)	$km\ km^{-2}$
	Ordem dos cursos d'água	-
	Tempo de concentração	h
	Tempo de pico	h

Fonte: elaborado pelo autor.

3.4.1 Fator de forma (K_f)

Segundo Villela & Mattos (1975), o K_f é responsável por fornecer um parâmetro que indica a tendência a enchentes de uma bacia. Este fator é obtido a partir da relação entre a largura média e o L_{axial} da bacia (ALVES & BARROS, 2021), como expresso na Equação 1.

$$K_f = \frac{A}{L^2} \quad (1)$$

K_f = o fator de forma (adimensional);

A = a área de drenagem (km^2);

L = o comprimento axial da bacia (km).

$I_c = 1,00$ a $0,75$ - sujeita a enchentes.

$I_c = 0,75$ a $0,50$ - tendência mediana.

$I_c < 0,50$ - não sujeita a enchentes.

3.4.2 Coeficiente de compacidade (K_c)

O Coeficiente de Compacidade é determinado a partir das variáveis área (A) e perímetro (P), sendo estes obtidos após a delimitação automática das sub-bacias. Desse modo,

foi determinado o K_c por meio da relação entre o P e a A (WENZEL et al., 2017), conforme a Equação 2.

$$K_c = 0,28 * \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (2)$$

K_c = o coeficiente de compacidade (adimensional);

P = o perímetro da bacia (km);

A = a área de drenagem (km²).

$K_c - 1,00$ a $1,25$ – bacia com alta propensão a grandes enchentes.
 $K_c - 1,25$ a $1,50$ – bacia com tendência mediana a grandes enchentes.
 $K_c > 1,50$ – bacia não sujeita a grandes enchentes.

3.4.3 Densidade de drenagem (D_d)

A densidade de drenagem (D_d) indica o nível de desenvolvimento do sistema de drenagem de uma bacia hidrográfica, e desse modo fornece uma indicação em termos de sua eficiência. O cálculo de D_d é expresso pela relação entre o somatório do comprimento total dos canais com a área da bacia de drenagem (CARDOSO et al., 2006). Conforme a Equação 3.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad (3)$$

D_d - densidade de drenagem, $km\ km^{-2}$

L_t - comprimento total de todos os canais, km

A - área de drenagem, km²

$D_d < 0,5\ km/km^2$ Bacias com drenagem pobre.
 $0,5 \leq D_d < 1,5\ km/km^2$ Bacias com drenagem regular.
 $1,5 \leq D_d < 2,5\ km/km^2$ Bacias com drenagem boa.
 $2,5 \leq D_d < 3,5\ km/km^2$ Bacias com drenagem muito boa.
 $D_d \geq 3,5\ km/km^2$ Bacias excepcionalmente bem drenadas.

3.4.4 Índice de circularidade (I_c)

Segundo Cardoso et al. (2006), o I_c apresenta certa semelhança com o K_c e tende a unidade à medida que a bacia se desenha semelhante a uma forma circular. Esse índice é calculado pela relação entre a área da bacia e a área de um círculo de P igual ao da bacia, conforme abaixo na Equação 4.

$$I_c = \frac{12,57 * A}{P^2} \quad (4)$$

I_c = o índice de circularidade (adimensional);

A = a área de drenagem (km²);

P = o perímetro (km).

De acordo com a literatura, de maneira geral, bacias que apresentam aspecto de forma estreita e alongada com índice de circularidade que mais se distancia da unidade, tendo em vista que os resultados obtidos assumem valores de 0 a 1, sendo que os tributários atingem o curso d'água principal em vários pontos afastando-se da condição da bacia de forma circular, em que a concentração total do deflúvio ocorre num só ponto, com possibilidades de cheias mais violentas.

Desse modo, um $I_c < 0,5$ representa um nível de certa forma moderado de escoamento, o que por sua vez acaba não contribuindo na concentração de águas que possibilitem cheias rápidas. Para valores entre 0,50 e 0,75 demonstram que a bacia tende a apresentar um formato mais circular, com tendência mediana para os processos de inundação. Já para os valores entre 0,75 e 1,0, sugerem que a bacia tende a ser mais circular favorecendo as enchentes. Para ilustrar de forma mais objetiva, é mostrado abaixo os valores de I_c e suas respectivas atribuições.

$I_c = 1,00$ a $0,75$ - sujeita a enchentes.

$I_c = 0,75$ a $0,50$ - tendência mediana.

$I_c < 0,50$ - não sujeita a enchentes.

3.4.5 Tempo de concentração (T_c)

O tempo de concentração é importante para a análise hidrológica em bacias hidrográficas, sendo essencial na estimativa de vazões máximas. Dentre todos parâmetros de tempo, o tempo de concentração é o mais utilizado (Mc Cuen et al., 1984; Wong 2009).

Para esta caracterização foi utilizada a fórmula de Kirpich, Equação 5.

$$T_c = 0,0663 * L^{0,77} * S^{-0,385} \quad (5)$$

T_c = tempo de concentração (h);

L = comprimento do talvegue (km);

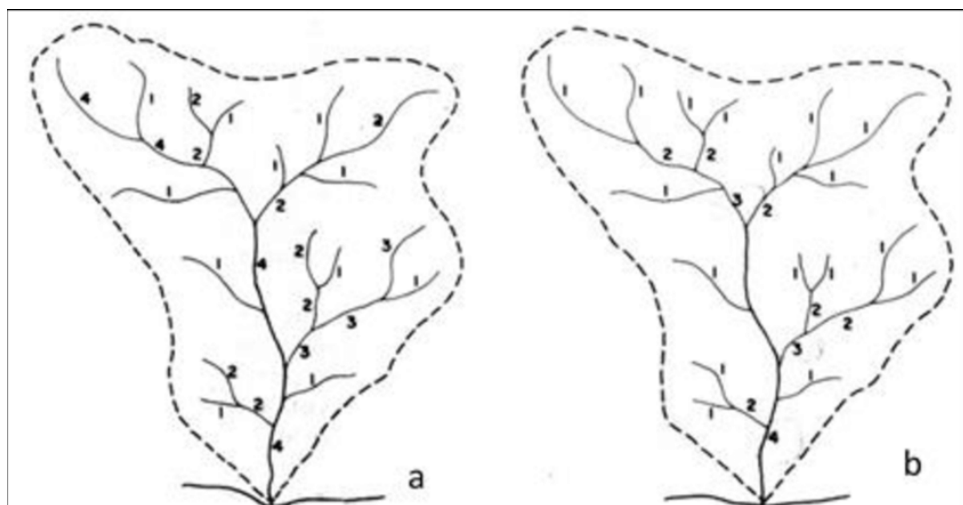
S = declividade (m/m).

Vale salientar que para estimar o tempo de concentração existem inúmeras outras formulações, como por exemplo, C. Eng.; Chow; Dooge; Izzard; Kerby; Giandotti; Picking, dentre outras. A utilização de formas empíricas se dá ao modo a qual cada uma se adequa de acordo com cada necessidade, em suma, por fatores particulares de cada área. Nesta pesquisa a formulação de Kirpich atendeu a alguns requisitos, como número de bacias recomendável de 6/7, como também pela declividade S em % situar-se no intervalo entre 3/10%, sendo que para esta pesquisa essa inclinação foi e média de 8%, bem como a utilização em áreas rurais, que é o caso de onde estão situadas as sub-bacias desta pesquisa.

3.4.6 Modelo de hierarquia hídrica proposto por Strahler.

Para esta pesquisa, foi adotada a classificação dos rios proposta por Horton (1945) e posteriormente modificada por Strahler (1952). Esta elimina o conceito do primeiro de que o rio principal deva ter o mesmo número de ordem em toda sua extensão, necessitando-se refazer a numeração dos rios a cada confluência (CHRISTOFOLETTI, 1980), como é ilustrado na (Figura 10).

Figura 10 - Em a, proposta de Horton (1945) e em b, proposta de Strahler (1952).



Fonte: Alex de Carvalho (2019, pg. 39).

Como citado anteriormente, para realizar a hierarquização hídrica dos cursos d'água das sub-bacias analisadas foi utilizado o método de ordem proposto por Strahler (1952), que diz que:

os menores canais sem tributários são considerados como de primeira ordem, estendendo-se desde a nascente até a confluência; os canais de segunda ordem surgem da confluência de dois canais de primeira ordem e só recebem afluentes de primeira ordem; os canais de terceira ordem surgem da confluência de dois canais de segunda ordem, podendo receber afluentes de segunda e primeira ordens; os canais de quarta ordem surgem da confluência de dois canais de terceira ordem podendo receber tributários das ordens inferiores e assim sucessivamente, até a última ordem que corresponde à ordem geral da bacia considerada, refletindo o grau de desenvolvimento do sistema de drenagem. (Strahler, 1952, p. 1117-1142).

Após a determinação do modelo de hierarquização hídrica, foi possível classificar as ordens dos canais que compõem toda a rede de drenagem das sub-bacias, e por sua vez, identificar a partir da ordem dos cursos as posições das respectivas barragens subterrâneas, obtendo assim um parâmetro inicial acerca da eficiência quanto principalmente a área de contribuição dos canais para com a BS.

4. RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO FISIAGRÁFICA DE SUB-BACIAS

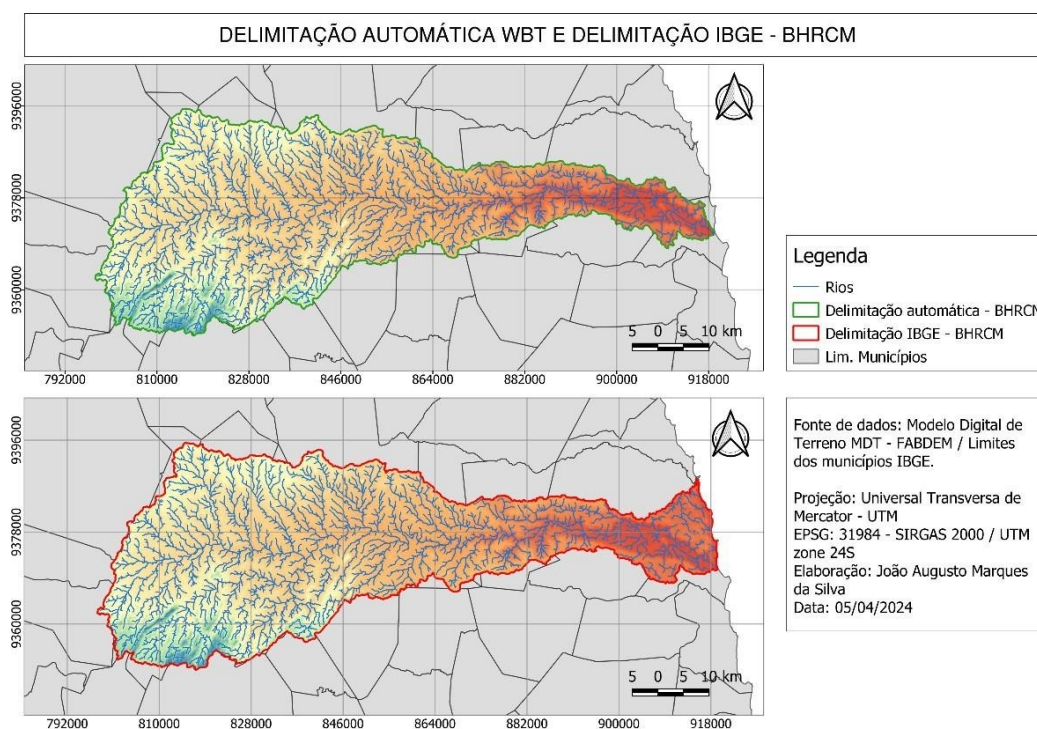
Como um dos elementos geomorfométricos de análise desta pesquisa, a caracterização fisiográfica foi realizada em um contexto inicial a partir de uma delimitação automática da

Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim, para que por meio disso, os resultados fossem obtidos.

4.1.1 Delimitação automática da BHRCM em comparação com a delimitação da base de dados do IBGE.

Existe uma diferença mínima entre os traçados limites da Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim na delimitação automática WBT, realizada no *software* QGIS e no arquivo encontrado na base de dados do IBGE, obtido a partir do download, o que não compromete a o estudo, pois esta diferença entre os traçados obtidos está em maior evidência distante da área desta pesquisa (Figura 11).

Figura 11 - Mapa de delimitação automática WBT e delimitação IBGE - BHRCM.



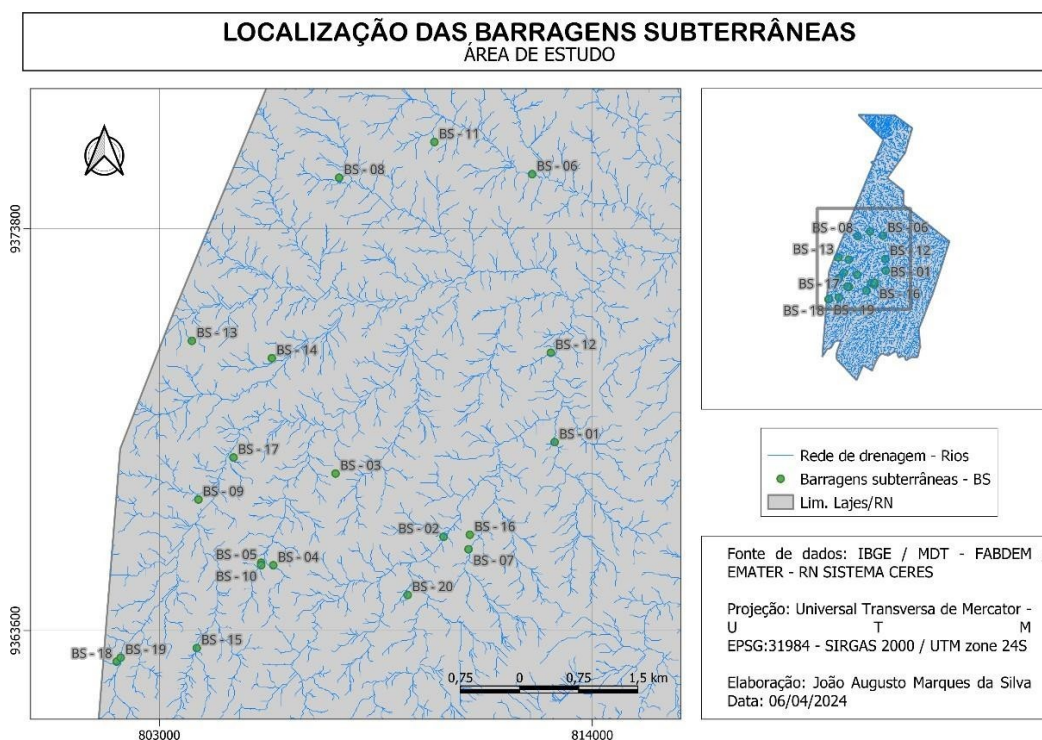
Fonte: elaborado pelo autor.

Essa diferença se deve basicamente à adoção da posição do exutório ou foz, tendo em vista que o software leva em consideração parâmetros como posição dos pixels e consequentemente a direção de fluxo acumulado (D8 Pointer) a partir do relevo que faz com que os limites da bacia sejam definidos e gerados de forma distinta no produto final, porém, mesmo diante dessa distinção entre ambas delimitações, os traçados se assemelham em quase toda sua totalidade.

4.1.2 Localização das BS na área de estudo e definição das barragens a serem caracterizadas quanto a sua geomorfometria e de forma fisiográfica.

Neste tópico da pesquisa, é representado no mapa a posição das barragens subterrâneas na área de estudo, foi possível constatar que algumas das BS estavam localizadas fora da área de interesse, sendo assim o seu número reduzido para 20 barragens, como é mostrado na (Figura 12) a seguir.

Figura 12 - Mapa de Localização da área de estudo.



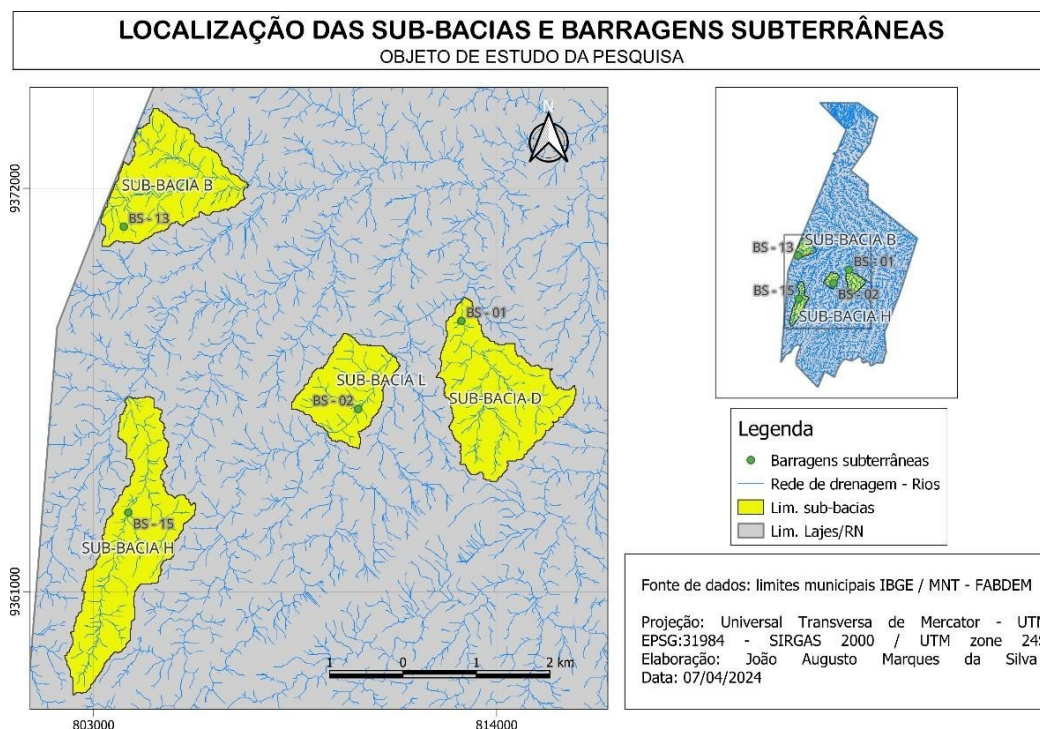
Fonte: elaborado pelo autor.

Seguindo, a partir do refinamento das informações, outro filtro foi realizado. Neste caso, em relação ao número de barragens e sub-bacias que serão objeto para os estudos referentes aos parâmetros de caracterização fisiográfica, este filtro é justificado devido a vasta gama de informações que se obtém em uma caracterização desta natureza, sendo deste modo recomendado uma redução ainda maior com relação ao número de barragens e sub-bacias estudadas, tendo em vista a objetividade da pesquisa.

Este filtro levou em consideração alguns aspectos como, posição das barragens nas sub-bacias, barragens que possuem as informações mais detalhadas em termo de tipo de barramento, dimensão do barramento, profundidade do poço, bem como, aspectos fisiográficos, mais precisamente, fator de forma da sub-bacia, ordem do rio no qual a barragem

está localizada, características geométricas, aspectos morfológicos, dentre outros. Partindo disso, serão analisadas quatro barragens localizadas nas suas respectivas sub-bacias, como mostradas no mapa da (Figura 13), abaixo.

Figura 13 - Mapa de localização das sub-bacias e barragens subterrâneas.



Fonte: elaborado pelo autor.

A partir da definição dos elementos a serem estudados, desse modo foi possível caracterizar de forma fisiográfica as sub-bacias e respectivamente sintetizar uma análise detalhada por meio dos parâmetros obtidos das barragens subterrâneas, através de sua posição dentro de cada sub-bacia, levando em consideração aspectos como área de contribuição, acumulação, declividade do curso d'água, taxa de infiltração relacionado ao tipo de solo, dentre outros.

4.2 CARACTERÍSTICAS MORFOMÉTRICAS DE LAJES/RN

Os dados de altitudes mínimas, máximas, médias e amplitude altimétrica para o município de Lajes/RN podem ser observadas em forma de dados numéricos na (Tabela 3). E os dados numéricos referentes a quantificação das áreas de altimetria do mapa hipsométrico, estão apresentados na (Tabela 4).

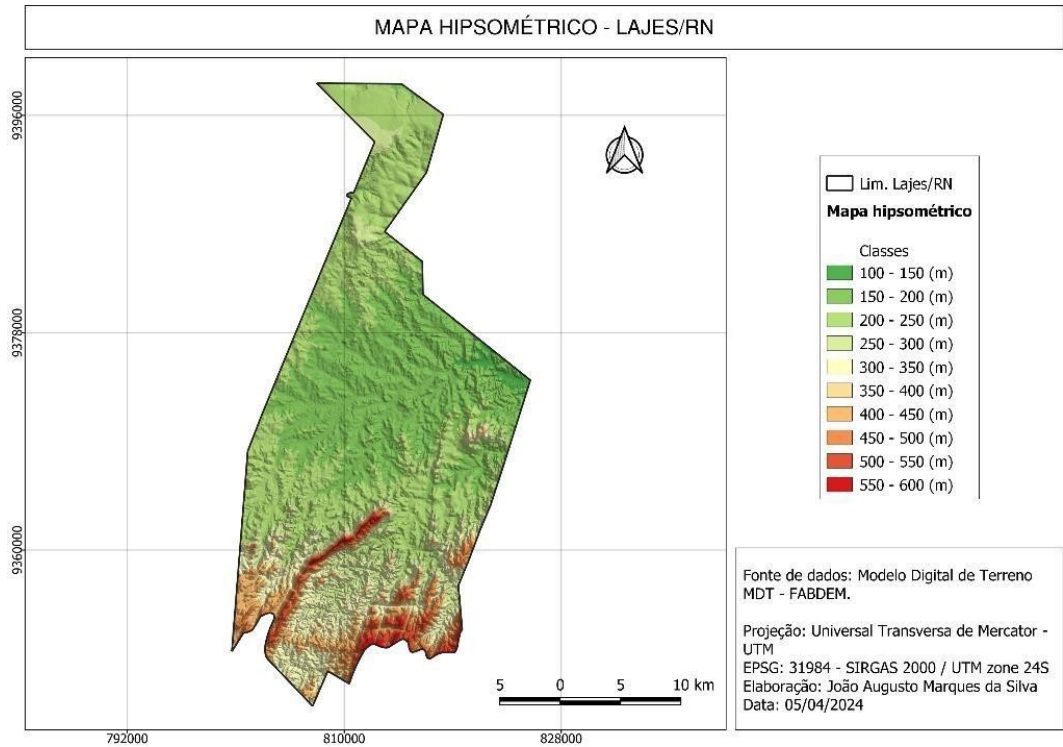
Tabela 3 - Altitudes características do relevo de Lajes/RN.

Altitudes características (m)			
Mínima	Máxima	Média	Amplitude altimétrica máxima
135,65	560,14	347,89	424,49

Fonte: elaborado pelo autor.

O relevo da região apresenta uma variação de altitude que compreende de 100 m a 600 m, com intervalos de classes com valor médio de 50 m. No mapa hipsométrico (Figura 14) também é possível observar alguns aspectos, onde o relevo com maiores altitudes representadas situam-se na porção sul do município, e as menores altitudes se encontram na região norte, tendo na porção central altitudes que decrescem no sentido oeste/leste, o que caracteriza a direção da foz da Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim, como também no sentido sul/norte se dirigindo a partir da região que compreende a depressão sertaneja até as áreas que se caracterizam como planície litorânea.

Figura 14 - Mapa hipsométrico de Lajes/RN.



Fonte: elaborado pelo autor.

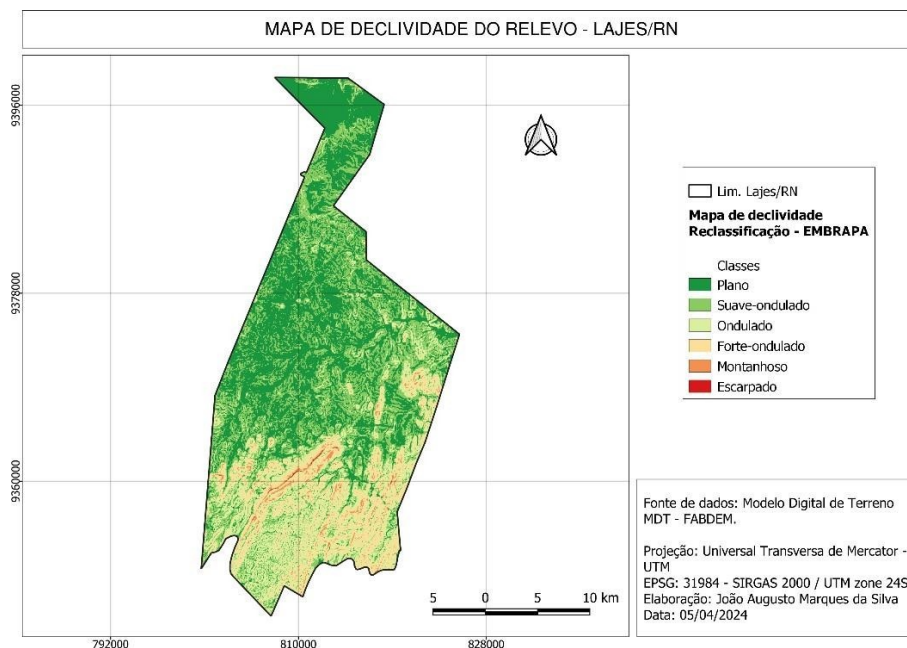
Tabela 4 - Quantificação de área das classes de altimetria de hipsometria.

Classes	Área	
	(Km ²)	(%)
100 - 150 (m)	239.420	35.326
150 - 200 (m)	220.780	32.576
200 - 250 (m)	68.014	10.035
250 - 300 (m)	58.658	8.655
300 - 350 (m)	45.276	6.680
350 - 400 (m)	20.421	3.013
400 - 450 (m)	14.354	2.117
450 - 500 (m)	7.001	1.033
500 - 550 (m)	3.779	0.557
550 - 600 (m)	0.022	0.003
Total	677.729	100

Fonte: elaborado pelo autor.

Foi elaborado um mapa de declividade do relevo para o município de Lajes/RN (Figura 15), região esta que compreende a área total de estudo onde estão localizadas as sub-bacias e as barragens subterrâneas, objeto principal desta pesquisa, no mapa reclassificado de acordo com a classificação de relevo da EMBRAPA (1999) é possível identificar um relevo menos ondulado na direção norte e mais ondulado na direção sul, isso se caracteriza pelo fato do município estar inserido na região definida como depressão sertaneja, que situa-se entre a planície litorânea (norte) e as escarpas do planalto da Borborema (sul).

Figura 15 - Mapa de declividade do relevo.



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 5 - Quantificação de área das classes de altimetria das declividades.

Classes de relevo	Área	
	(Km ²)	(%)
Plano (0 – 3%)	250.461	37.272
Suave-ondulado (3 – 8%)	212.525	31.627
Ondulado (8 – 20%)	119.207	17.740
Forte-ondulado (20 – 45%)	81.006	12.055
Montanhoso (45 – 75 %)	8.361	1.244
Escarpado (Acima de 75 %)	0.399	0.059
Total	671.966	100

Fonte: elaborado pelo autor.

A altimetria da região, quantificada na (Tabela 5), demonstra que a maior porção do território do município de Lajes/RN se caracteriza segundo a classificação de relevo da EMBRAPA como plano, suave-ondulado, quando somados representam 68,9 % do território, o que mostra que essa área atinge valores de elevação no relevo de no máximo 8% e esta se distribui predominantemente na direção centro/sul do município em partindo para a planície

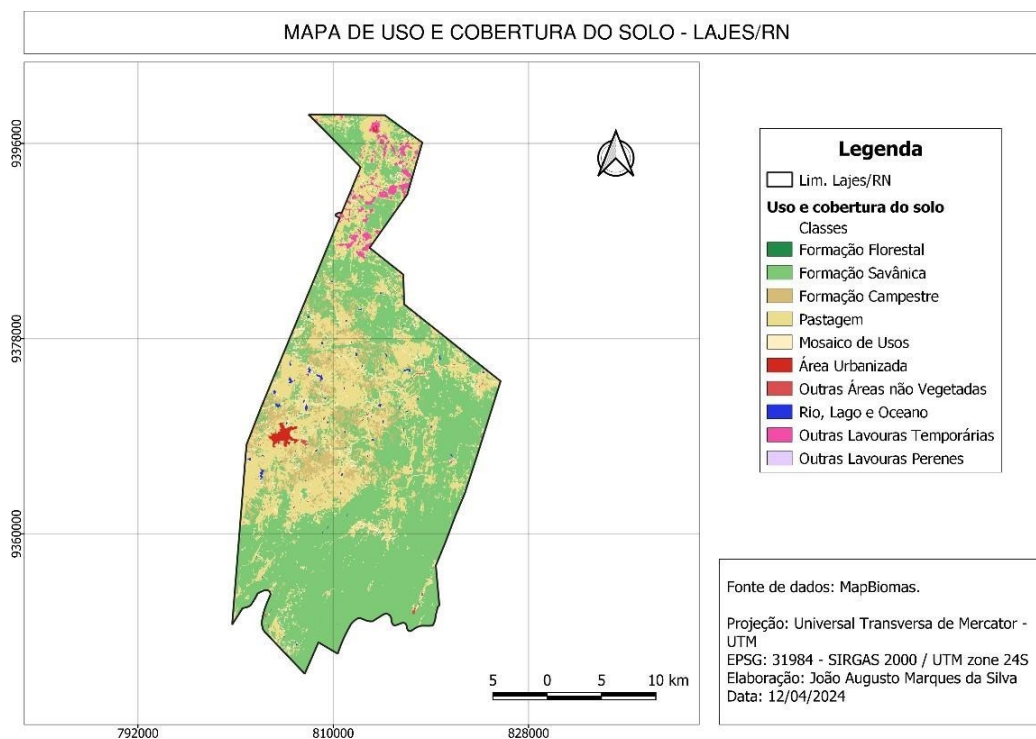
litorânea, bem como, parte na direção centro/leste seguindo para a foz da BHRCM como já descrito anteriormente.

A declividade afeta a velocidade do escoamento superficial e a infiltração da água no solo. Se a declividade da região for acentuada, a água precipitada concentra-se mais rapidamente nos cursos dos rios aumentando as chances de ocorrer picos de enchentes (Lorenzon et al., 2015). A partir do que pode ser observado, o relevo da região é predominantemente plano (37.272%) e suave ondulado (31.627%), declividades acentuadas se mostram pouco expressivas na região de estudo, concentrando-se apenas na porção centro/sul e na região da Serra do Feiticeiro onde são encontradas as maiores elevações no relevo.

Apresentando essas características, é possível afirmar que o relevo da região possui uma topografia pouco movimentada com moderada velocidade de escoamento superficial, podendo ser aferido a baixa capacidade de erosão do solo além de um favorecimento da infiltração da água no solo.

Com relação ao uso e cobertura do solo, é perceptível no mapa da (Figura 16) que a faixa central do município apresenta uma forte presença de solo com vegetação rasteira, pouco arbustiva e em muitas dessas áreas até mesmo solo exposto, esse fato ocorre pelo intensificado processo de desertificação que assola a região a décadas, sendo esta, uma região em que ao longo dos anos sofreu pela ação antrópica, principalmente pela agricultura de subsistência com a ausência de rodízio de culturas, ausência esta que empobrece o solo pela perda de nutrientes, o que faz com que a cobertura vegetal não prospere nessas áreas, resultando assim em grandes áreas improdutivas e por consequência disso o abandono das mesmas.

Figura 16 - Mapa de uso e cobertura do solo.



Fonte: elaborado pelo autor.

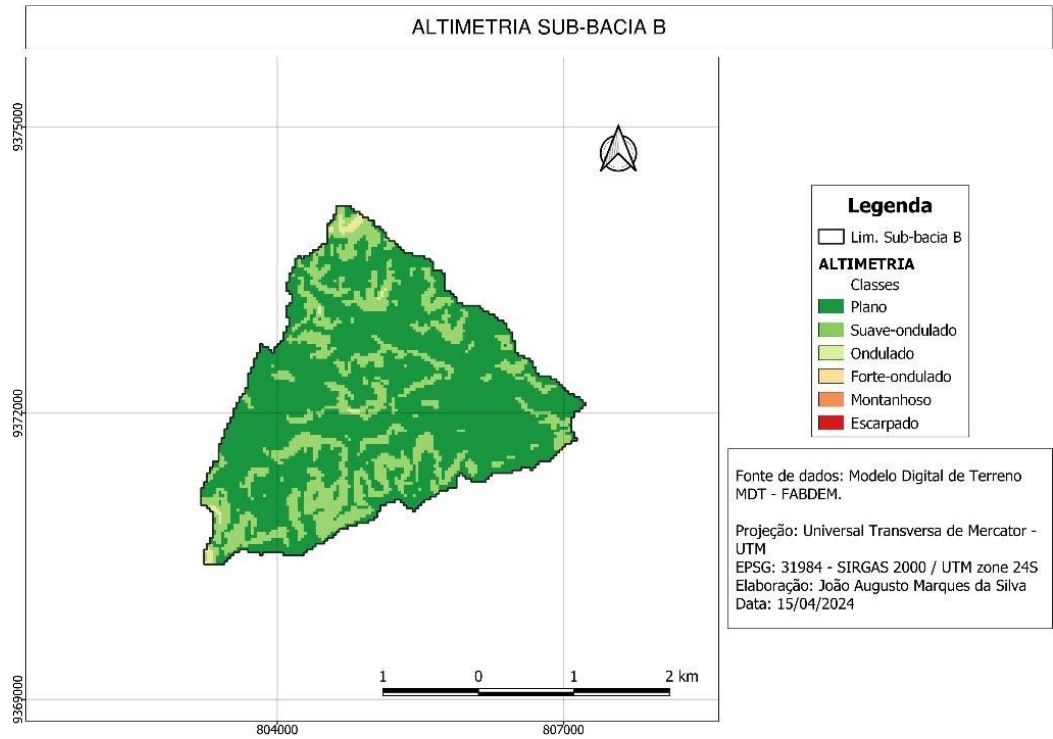
Outro motivo que explica a ausência de cobertura vegetal no solo da região, dá-se pela extração acentuada da vegetação, em suma, madeira de espécie em sua predominância “algaroba”, para a produção do carvão vegetal, bem como, para alimentar os fornos de produção da indústria cerâmica nas regiões vizinhas, sendo esta muitas vezes a fonte de renda principal do pequeno produtor rural, o que se evidencia ainda mais nos longos períodos de estiagem frequentes nos semiárido onde a agricultura de subsistência se torna impraticável em condições normais.

4.3 ANÁLISE DOS PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS E FIOGRÁFICOS DAS SUB-BACIAS CARACTERIZADAS.

4.3.1 Características morfométricas das sub-bacias B, D, H e L.

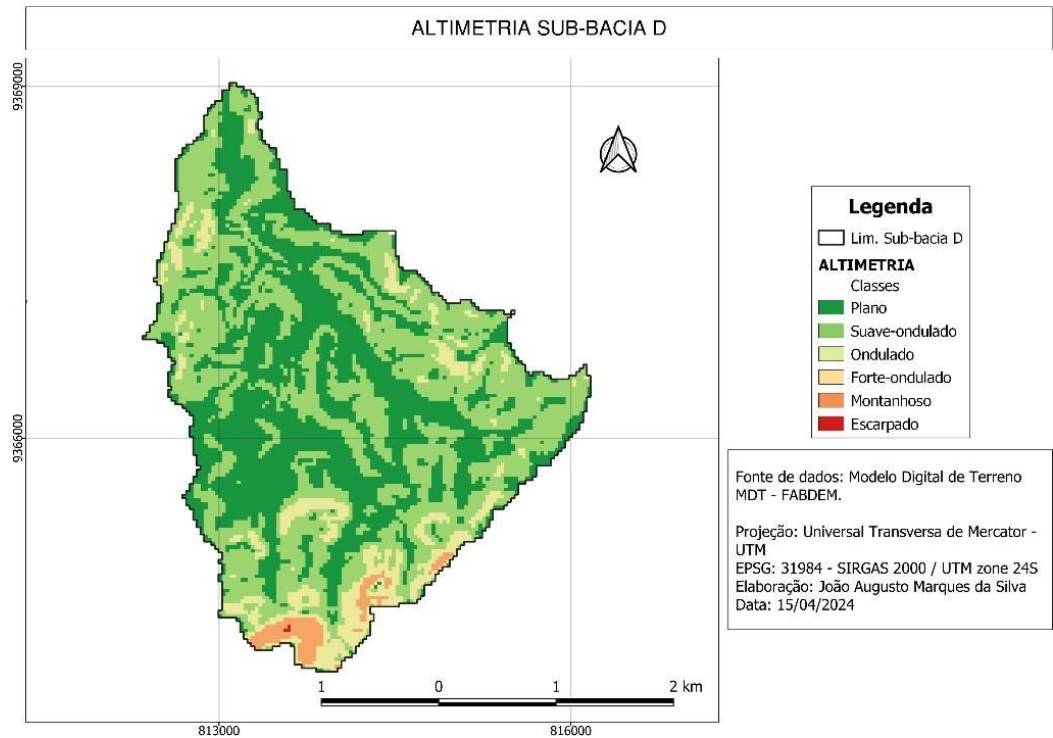
Para caracterizar de maneira detalhada cada sub-bacia analisada, foram elaborados mapas com características morfométricas de declividade, como também as curvas de declividade contendo as áreas de drenagem em (%) e as altitudes em (m). (Figura 17, Figura 18, Figura 19 e Figura 20).

Figura 17 - Mapa de declividade – Sub-bacia B.



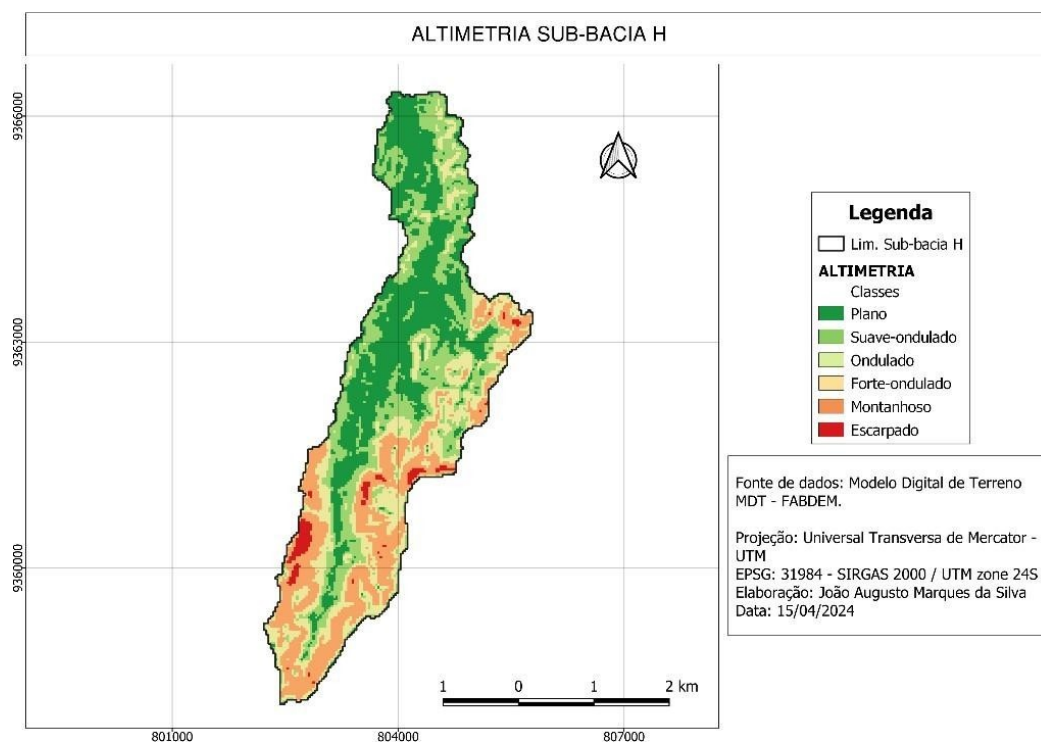
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 18 - Mapa de declividade – Sub-bacia D.



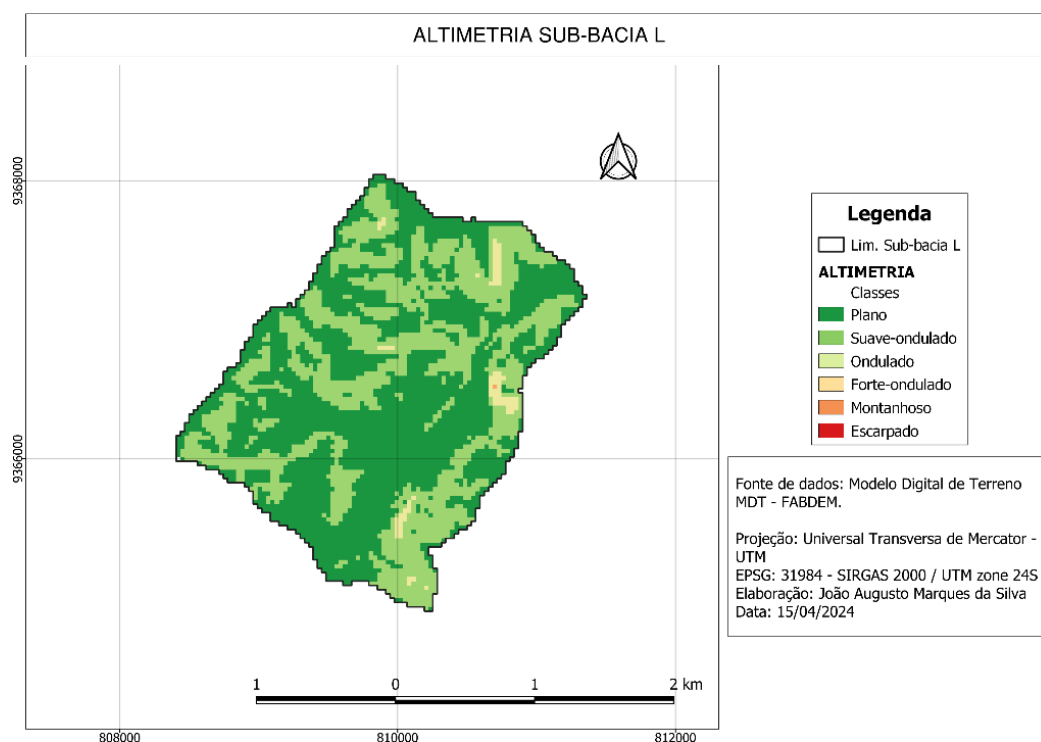
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 19 - Mapa de declividade – Sub-bacia H.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 20 - Mapa de declividade – Sub-bacia L.



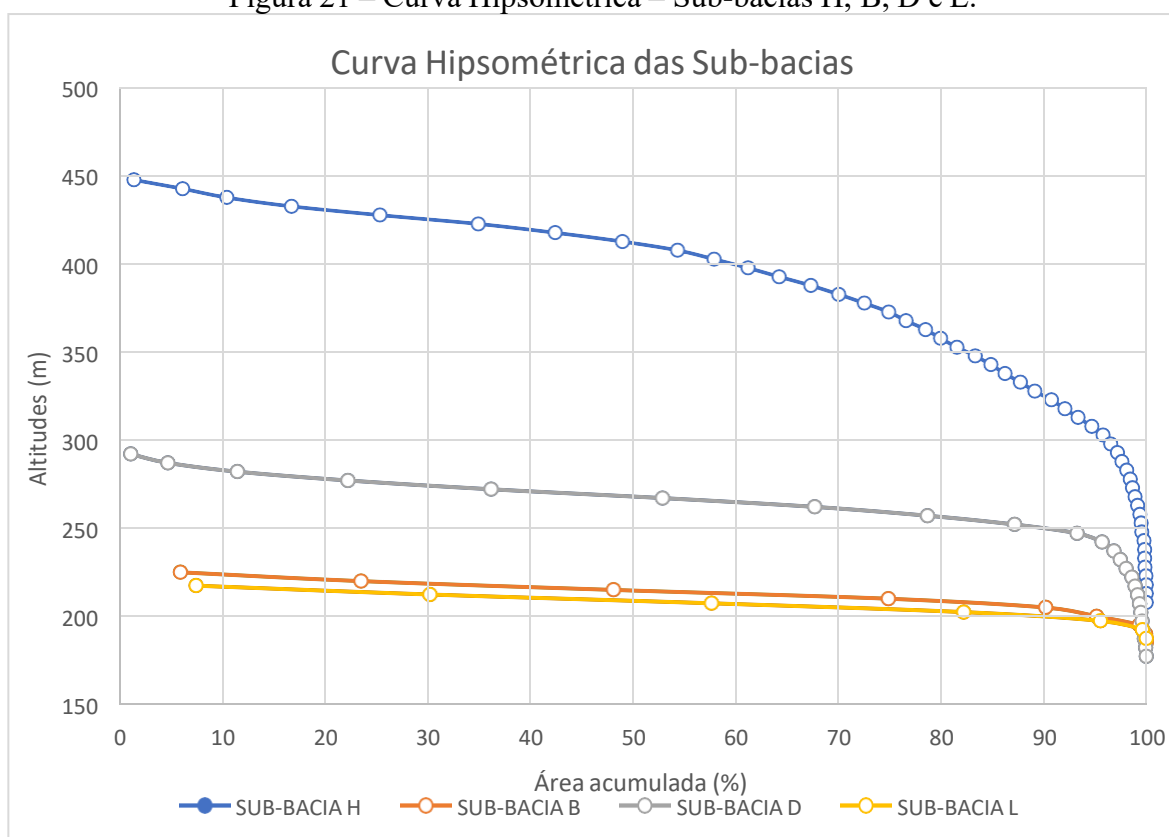
Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto aos aspectos morfométricos das sub-bacias, diferem em alguns pontos dos aspectos morfométricos do município de Lajes/RN, apesar de estarem situados dentro da

mesma classificação, isso se deve ao fato dos limites das sub-bacias estarem inseridos em uma visão menos global.

Com relação as áreas das sub-bacias B, D e L, é possível identificar que as regiões quase que em sua totalidade apresentam altitudes médias semelhantes, 201,3 m; 231,8 m e 199,4 m respectivamente, o que demonstra que existe pouca variação no relevo. Já para a sub-bacia H, tem-se um valor médio de altitude correspondente a 322,9 m, isso ocorre pelo fato dessa sub-bacia em seu extremo sul apresentar elevações de aspecto montanhoso. Para ilustrar de forma gráfica as curvas hipsométricas das sub-bacias, na (Figura 21), é possível identificar estas curvas que mostram as altitudes em relação as áreas de drenagem representadas em porcentagem.

Figura 21 – Curva Hipsométrica – Sub-bacias H, B, D e L.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3.2 Parâmetros fisiográficos das sub-bacias caracterizadas.

Os resultados detalhados da caracterização fisiográfica das quatro sub-bacias hidrográficas analisadas, definidas pelas seguintes nomenclaturas adotadas, tem-se: Sub-bacia H, Sub-bacia B, Sub-bacia L e Sub-bacia D, nas quais estão respectivamente localizadas as barragens subterrâneas: BS - 15, BS - 13, BS - 02 e BS - 01, resultados representados nos (Quadro 2; Quadro 3; Quadro 4 e Quadro 5) e (Tabela 6) após os quadros.

Quadro 2 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia H.

Característica	Sub-bacia	Parâmetro	Resultado
Relevo	Sub-bacia H	Altitude mínima (m)	202,6
		Altitude máxima (m)	443,3
		Altitude média (m)	322,9
		Amplitude altimétrica máxima da sub-bacia (m)	240,7
Geométrica		Área (A) (km^2)	11,359
		Perímetro (P) (km)	26,734
		Fator de forma da bacia (K_f) (Adimensional)	0,1175
		Coefficiente de compacidade (K_c) (Adimensional)	2,2210
		Índice de circularidade (I_c) (Adimensional)	0,1998
Rede de drenagem		Comprimento do maior fluxo (km)	9,8322
		Densidade de drenagem (D_d) ($km\ km^{-2}$)	0,5375
		Ordem dos cursos d'água	5ª
		Tempo de concentração (h) (T_c)	1,73
		Tempo de pico (h) (T_p)	1,04

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 3 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia B.

Característica	Sub-bacia	Parâmetro	Resultado
Relevo	Sub-bacia B	Altitude mínima (m)	179,8
		Altitude máxima (m)	222,8
		Altitude média (m)	201,3
		Amplitude altimétrica máxima da sub-bacia (m)	43,0
Geométrica		Área (A) (km^2)	8,1835
		Perímetro (P) (km)	17,001
		Fator de forma da bacia (K_f) (Adimensional)	0,2130
		Coefficiente de compacidade (K_c) (Adimensional)	1,6640
		Índice de circularidade (I_c) (Adimensional)	0,3559
Rede de drenagem		Comprimento do maior fluxo (km)	6,1986
		Densidade de drenagem (D_d) ($km\ km^{-2}$)	0,2875
		Ordem dos cursos d'água	5ª
		Tempo de concentração (h) (T_c)	1,83
		Tempo de pico (h) (T_p)	1,10

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 4 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia L.

Característica	Sub-bacia	Parâmetro	Resultado
Relevo	Sub-bacia L	Altitude mínima (m)	182,1
		Altitude máxima (m)	216,7
		Altitude média (m)	199,4
		Amplitude altimétrica máxima da sub-bacia (m)	34,6
Geométrica		Área (A) (km^2)	4,9962
		Perímetro (P) (km)	12,566
		Fator de forma da bacia (K_f) (Adimensional)	0,2953
		Coefficiente de compacidade (K_c) (Adimensional)	1,5741
		Índice de circularidade (I_c) (Adimensional)	0,3977
Rede de drenagem		Comprimento do maior fluxo (km)	4,1135
		Densidade de drenagem (D_d) ($km\ km^{-2}$)	0,6565
		Ordem dos cursos d'água	6 ^a
		Tempo de concentração (h) (T_c)	1,26
		Tempo de pico (h) (T_p)	0,76

Fonte: elaborado pelo autor.

Quadro 5 - Caracterização fisiográfica da sub-bacia D.

Característica	Sub-bacia	Parâmetro	Resultado
Relevo	Sub-bacia D	Altitude mínima (m)	171,9
		Altitude máxima (m)	291,7
		Altitude média (m)	231,8
		Amplitude altimétrica máxima da sub-bacia (m)	119,8
Geométrica		Área (A) (km^2)	9,8994
		Perímetro (P) (km)	19,588
		Fator de forma da bacia (K_f) (Adimensional)	0,2278
		Coefficiente de compacidade (K_c) (Adimensional)	1,7432
		Índice de circularidade (I_c) (Adimensional)	0,3243
Rede de drenagem		Comprimento do maior fluxo (km)	6,5917
		Densidade de drenagem (D_d) ($km\ km^{-2}$)	0,3323
		Ordem dos cursos d'água	6 ^a
		Tempo de concentração (h) (T_c)	1,37
		Tempo de pico (h) (T_p)	0,82

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Caracterização fisiográfica das sub-bacias hidrográficas.

Sub - bacia	<i>A</i> (<i>km</i> ²)	<i>P</i> (<i>km</i>)	Ordem - Strahler	Compr imento do maior fluxo (<i>km</i>)	(<i>K_f</i>)	(<i>K_c</i>)	(<i>I_c</i>)	<i>D_d</i> (<i>km</i> / <i>km</i> ²)	<i>T_c</i> (<i>h</i>)	<i>T_p</i> (<i>h</i>)
SUB - BACIA H	11,359	26,734	5 ^a	9,8322	0,1175	2,2210	0,1998	0,5375	1,73	1,04
SUB - BACIA B	8,1835	17,001	5 ^a	6,1986	0,2130	1,6640	0,3559	0,2875	1,83	1,10
SUB - BACIA L	4,9962	12,566	6 ^a	4,1135	0,2953	1,5741	0,3977	0,6565	1,26	0,76
SUB - BACIA D	9,8994	19,588	6 ^a	6,5917	0,2278	1,7432	0,3243	0,3323	1,37	0,82

Fonte: elaborado pelo autor.

Com relação aos parâmetros geométricos da caracterização fisiográfica, quanto as áreas das sub-bacias, Tucci (2009), a área da bacia expressa relevantemente sua potencialidade hídrica e resposta hidrológica, uma vez que, quanto maior a área, menor a chance de ocorrer picos de enchentes, pois maior será o tempo para que toda a bacia contribua para a saída da água após a ocorrência de precipitações.

O que de fato se comprova na análise realizada para as sub-bacias analisadas com relação as suas áreas, em ordem decrescente, tem-se a respectiva sequência: Sub-bacia H; Sub-bacia D; Sub-bacia B e Sub-bacia L, que quando relaciona-se com o tempo de concentração (*T_c*) obtido para cada sub-bacia, demonstra que o tempo que a precipitação leva para atingir o exutório é relativamente alto para o tamanho das áreas, esse fato corrobora com os parâmetros obtidos para o relevo, que em sua maior parte é classificado como sendo de declividade plano e suave-ondulado, declividades mais acentuadas não apresentam expressiva relevância para a área de estudo, o que contribui diretamente para um escoamento superficial mais lento, favorecendo ao aumento da taxa de infiltração da água no solo.

Por consequência da pouca elevação no relevo na região, atrelado aos aspectos como fator de forma (*K_f*), coeficiente de compacidade (*K_c*) e índice de circularidade (*I_c*), é possível afirmar que as sub-bacias analisadas possuem baixa propensão a enchentes, por exemplo a sub-bacia H apresenta um formato alongado, onde a água não contribui ao mesmo tempo para o exutório, e isto corrobora com o que já foi dito anteriormente, ou seja, se torna pouco propícia a ocorrência de enchentes.

Com relação a densidade de drenagem (D_d), as D_d obtidas para as sub-bacias B e D respectivamente de 0,2875 (km/km^2) e 0,3323 (km/km^2) são considerados bacias com drenagem pobre, pois possuem valores $< 0,5$ (km/km^2), já para as sub-bacias H e L, os valores obtidos para D_d foram de respectivamente 0,5375 (km/km^2) e 0,6565 (km/km^2), sendo assim consideradas bacias com drenagem regular, pois encontram-se no intervalo $0,5 \leq D_d < 1,5$ (km/km^2), isso demonstra que existe baixa capacidade para formação de novos canais de drenagem devido a degradação pelo escoamento superficial ser menos agressivo no relevo.

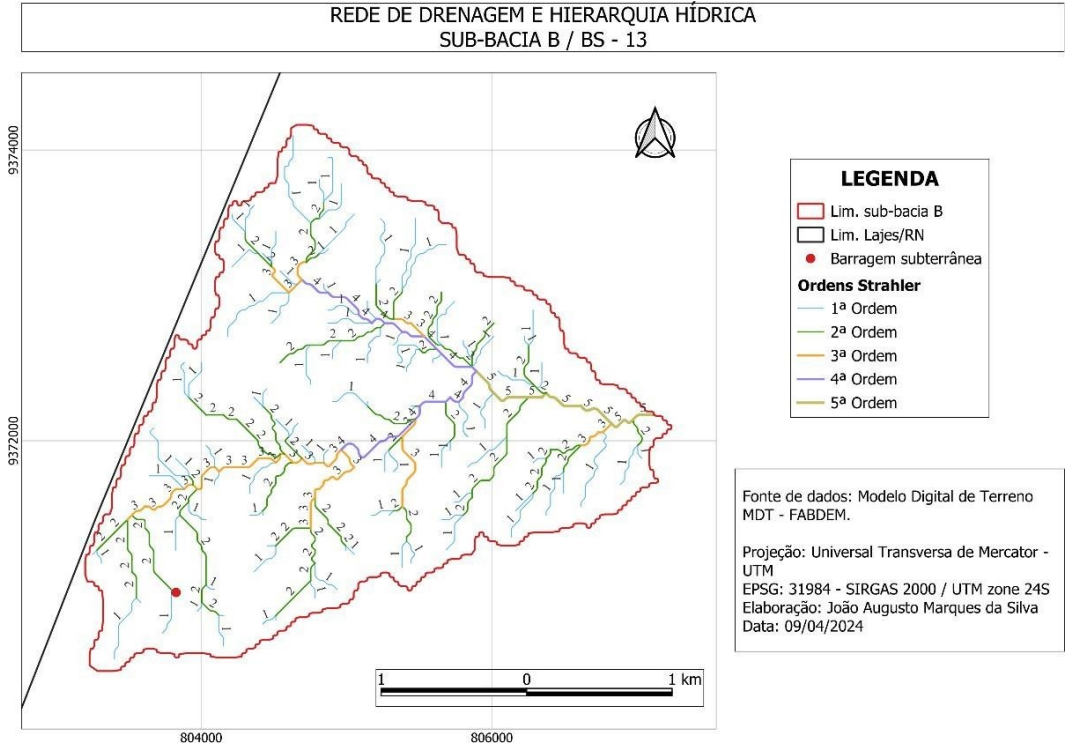
A altitude média obtida para as sub-bacias B, D, H e L foi de 201,3; 231,8; 322,9; e 199,4 m, respectivamente. Onde segundo (VILLELA & MATTOS, 1975) quanto maior a variação nos valores de altitude mais evidente será a presença de relevo montanhoso, o que, consequentemente, influenciará na precipitação, na temperatura do ar e no escoamento das sub-bacias, percebe-se nos valores obtidos que essa variação não é tão evidenciada, devido a maior parte da área de interesse apresentar aspectos de declividade pouco acentuados.

4.3.3 Modelo de hierarquia hídrica proposto por Strahler.

De acordo com o que está representado nos mapas de rede de drenagem e hierarquia hídrica das sub-bacias, é possível chegar a alguns resultados, principalmente no que diz respeito a relação da rede de drenagem para com a hierarquia dos canais, de modo em que a área de contribuição para as barragens subterrâneas neste estudo é de suma importância para sirva como um parâmetro dentre outros que possam de certa forma medir a eficiência dessas barragens, e por conseguinte, apontar mediante representação em mapas, possíveis locais para a construção de futuras barragens levando em consideração a ordem dos canais de drenagem da sub-bacia.

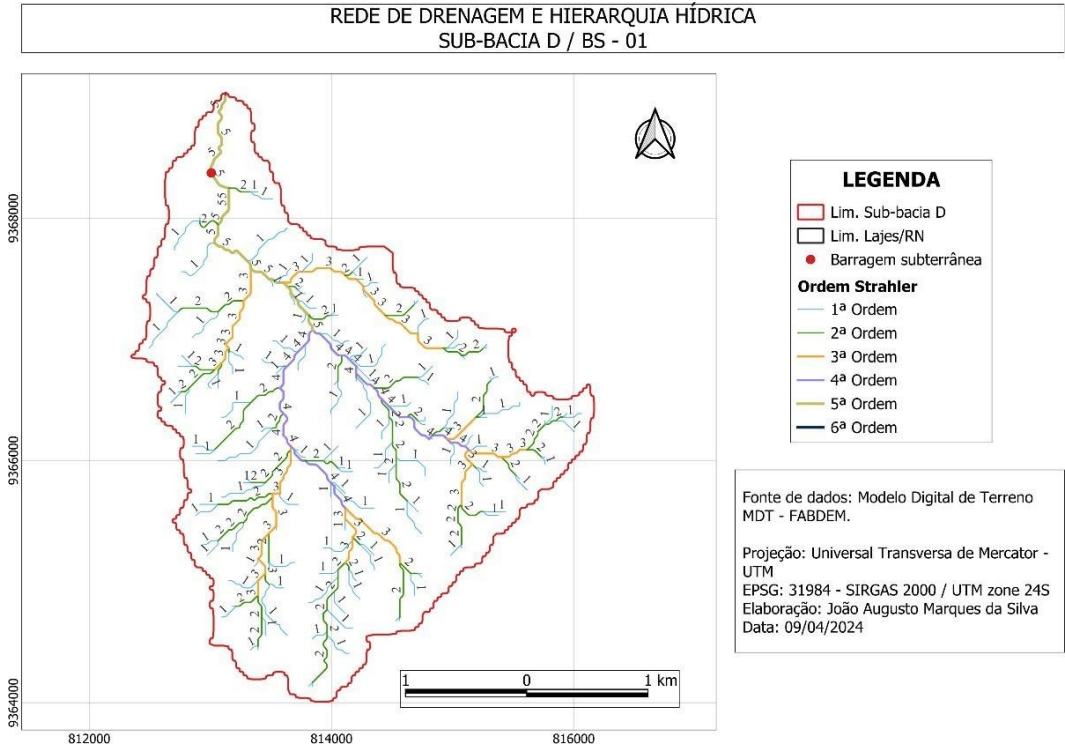
Os resultados dos modelos de hierarquia hídrica para as sub-bacias hidrográficas analisadas proposto por Strahler, estão expressos sendo representada cada ordem de canal por cores, como mostrado nas legendas, compondo dessa forma toda a rede de drenagem, é possível também identificar a posição das barragens subterrâneas (BS) dentro de cada sub-bacia delimitada (Figura 22; Figura 23; Figura 24 e Figura 25) respectivamente.

Figura 22 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia B.



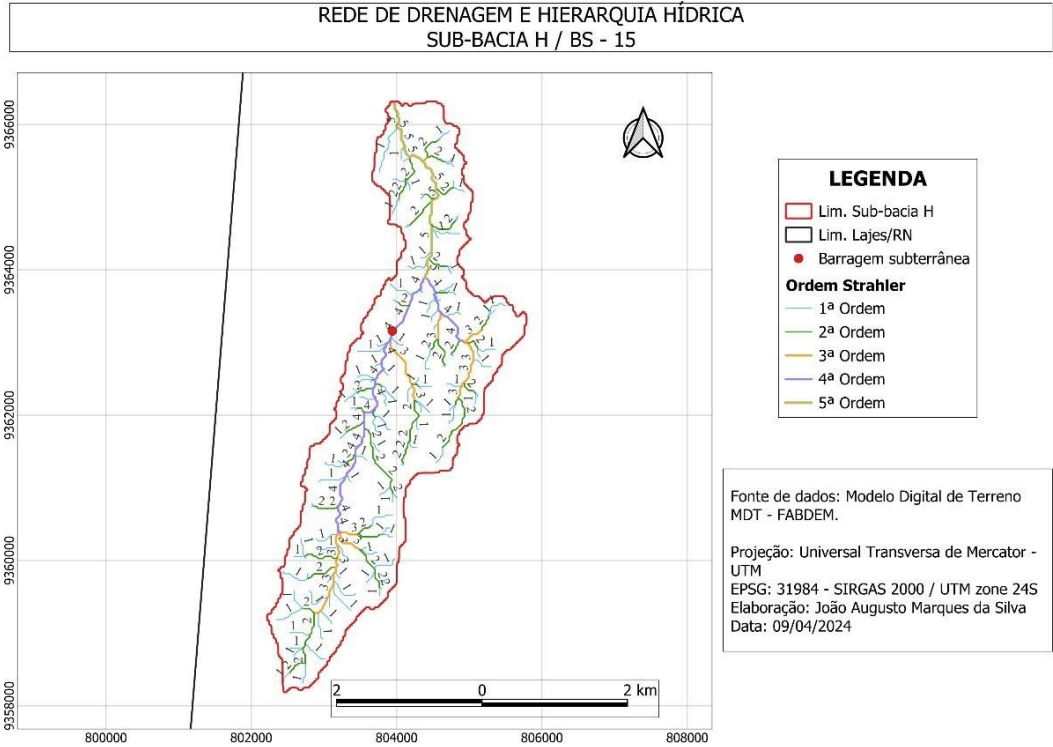
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 23 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia D.



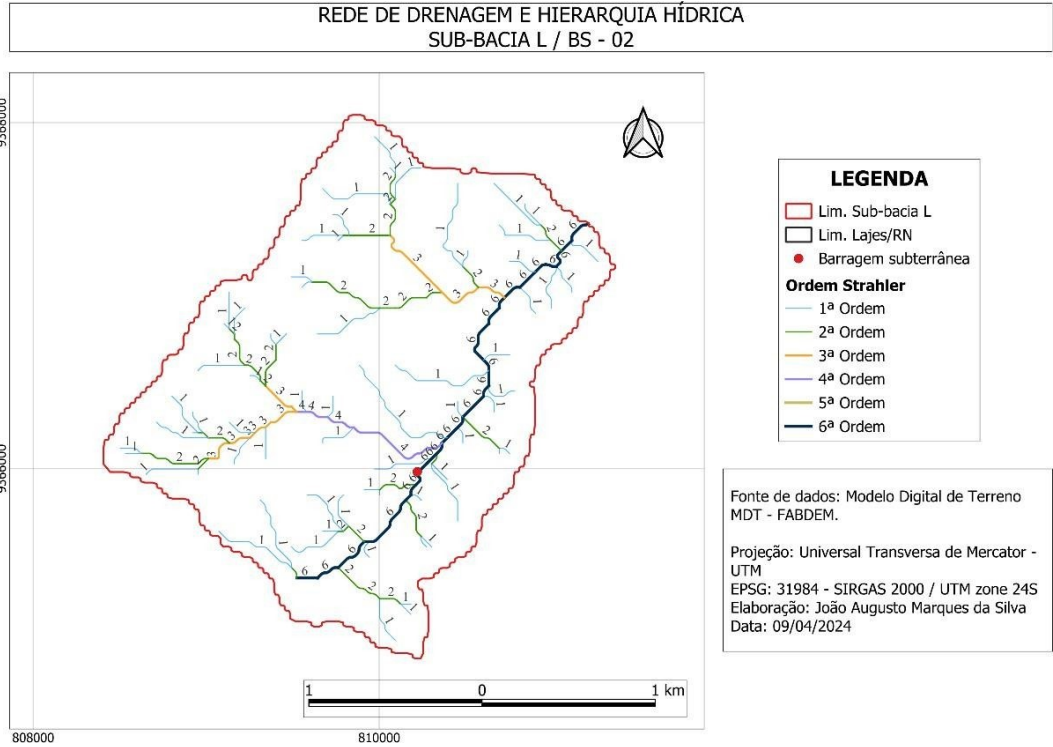
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 24 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia H.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 25 - Rede de drenagem e hierarquia hídrica da sub-bacia L.



Fonte: elaborado pelo autor.

Quanto a eficiência das barragens tomando como parâmetro a ordem dos rios, superficialmente é possível identificar pontos que possam trazer um nível de garantia de “sucesso” em termos de eficiência, porém, outros parâmetros também devem ser levados em consideração, tornando-se assim um trabalho em amplitude elevada de detalhamento, o que traz segurança para futuros projetos de construção.

4.3.4 Análise das barragens subterrâneas objeto deste estudo.

As barragens analisadas dentro da área de interesse são as seguintes: BS – 13, inserida na sub-bacia B; BS – 01, inserida na sub-bacia D; BS – 15, inserida na sub-bacia H; e por fim, BS – 02, inserida na sub-bacia L, para ilustrar de forma mais direta, na Tabela 7 estão apresentados de forma concisa os dados de posição das BS quanto a ordem do canal ao qual foi construída (Tabela 7).

Tabela 7 - Barragens subterrâneas e suas respectivas posições quanto a ordem dos canais de drenagem onde foram construídas.

Barragem subterrânea	Ordem do canal de drenagem
BS - 13	1ª ordem
BS - 01	5ª ordem
BS - 15	4ª ordem
BS - 02	6ª ordem

Fonte: elaborado pelo autor.

É possível verificar que alguns aspectos relacionados ao nível de contribuição que a rede de drenagem oferece para que se possa por meio disso, observar a área de contribuição para as barragens subterrâneas quanto ao número de canais que colaboram para tais. Seguindo uma lógica de que quanto maior for o canal de drenagem ao qual a barragem foi construída, maior será a sua capacidade de reter água no subsolo e por consequência disso, maior será a área agricultável que o pequeno produtor terá disponível para produzir durante um considerável período de tempo, seguindo para além do que compreende a quadra chuvosa.

Partindo dessa lógica, analisando de forma direta, por meio da ordem dos canais, podemos afirmar que a BS – 13 tende a estar inserida em um canal de drenagem de 1ª ordem, ou seja, canais dessa ordem não possuem outros canais visíveis que possam contribuir para dentro deles, são canais oriundos de nascentes, em suma para a região semiárida são classificados como temporários, não perenes, com pouca capacidade de apresentar uma área de acumulação de água no subsolo, o que acaba tornando a área de produção limitada.

Seguindo ainda na mesma lógica desenvolvida, para as BS – 01; 15 e 02, é possível identificar que as áreas de acumulação de água no subsolo se tornam maiores devido ao aumento de canais tributários que denotam a uma rede de drenagem mais robusta em que inúmeros canais contribuem para regiões onde se pode produzir por um período de tempo maior, isso devido a capacidade elevada de retenção de água no subsolo logo após uma precipitação, onde as declividades encontradas nas sub-bacias são consideradas baixas, o que favorece para um escoamento superficial lento e uma maior taxa de infiltração para alimentar o lençol freático.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As sub-bacias estudadas apresentam uma variação de altitude considerada baixa, com relevo plano e suave-ondulado em sua maior parte, apresentam também poucas elevações em regiões pontuais, longe das áreas em que as barragens subterrâneas estão construídas, portanto não alteram a afirmação de que as áreas são planas na região de estudo.

A análise exclusiva dos parâmetros K_f , K_c e I_c resulta em um indicativo de que as sub-bacias apresentam baixa capacidade de produzirem enchentes. Porém, diante desta consideração é preciso que se tome a devida atenção para a análise de outros parâmetros que tornam ainda mais precisas as afirmações, dentre estes parâmetros estão, como uso e ocupação do solo, dados de clima, temperatura, precipitação, que não foram abordados de forma direta nesta pesquisa.

As barragens subterrâneas analisadas se mostram eficientes quanto a sua construção em canais de ordem 4, 5 e 6, sendo apenas uma delas construída em um canal de ordem 1, limitando assim a sua área de acumulação de água no subsolo.

As barragens subterrâneas se mostram como uma alternativa muito viável na região em que foi realizado este estudo, devido ser uma tecnologia de relativo baixo custo e que traz benefícios para os pequenos produtores por um longo período de tempo, incluindo o que compreende o período de estiagem que se estende por cerca de 8 meses, característico da região semiárida.

REFERÊNCIAS

ADRIANA THAYS ARAÚJO ALVES; VITOR HUGO DE OLIVEIRA BARROS. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Riacho das Garças, Pernambuco, Brasil. **Revista Semiárido De Visu**, [S. l.], v. 9, n. 2, p. 131–142, 2021. DOI: 10.31416/rsdv.v9i2.236. Disponível em: <https://semiaridodevisu.ifsertao-pe.edu.br/index.php/rsdv/article/view/236>. Acesso em: 14 abr. 2024.

BARBOSA, G. et al. Sustentabilidade de agroecossistemas com barragens subterrâneas no semiárido brasileiro: a percepção dos agricultores na Paraíba 1 Sustainability of agroecosystems with subsurface dams in Brazilian semiarid: perception of farmers in Paraíba. [s.d.], 2011. Disponível em: **Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades**. Acesso em: 14 de mar. 2024.

CARDOSO, C. A. et al. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241–248, mar. 2006. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rarv/a/cXmkNxXThc8ksdjWwFM6vNt/#ModalHowcite>. Acesso em: 14 de abr. 2024.

CAVALCANTI, Ely Brasil de Arruda Luna. **Ocorrência de quartzito verde esmeralda no município de Lajes/RN e sua viabilidade como rocha ornamental**. 2008. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Disponível em: https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/5050/1/arquivo3332_1.pdf. Acesso em: 17 abr. 2024.

CIRILO, J. et al. Soluções para o suprimento de água de comunidades rurais difusas no semi-árido brasileiro: avaliação de barragens subterrâneas. researchgate.net, 2003. Disponível em: **Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades**. Acesso em: 14 de mar. 2024.

CIRILO, J. A.; COSTA, W. D. **Barragem subterrânea: experiência em Pernambuco. Petrolina: EMBRAPA, 1997. Disponível em: Cartilhas temáticas tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o Semiárido. v. 3. 31p**. Acesso em: 05 de mar. 2024.

COSTA, W. D.; CIRILO, J. A.; MAIA, A. Z.; SOBRINHO, O. P. **BARRAGEM SUBTERRÂNEA: UMA FORMA EFICIENTE DE CONVIVER COM A SECA. Águas Subterrâneas**, [S. l.], n. 1, 1998. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/22277>. Acesso em: 14 mar. 2024.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10492>. Acesso em: 15 de abr. 2024.

CHRISTOFOLETTI, A. 1981. A variabilidade espacial e temporal da densidade de drenagem. Disponível em: **Not. Geomorfológica**, v. 21, n. 42, p. 3-22. Acesso em: 15 de abr. 2024.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Rio Grande do Norte**, 2005. 12 p. + anexos. Disponível em: < https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/17008/1/rel_lajes.pdf > Acesso em: 10 de abr. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de Informação, 1999. 412p. Disponível em: **Caracterização fisiográfica das bacias hidrográficas dos rios Indaiá e Borrachudo como etapa pré-operacional para a indústria de hidrocarbonetos não convencionais**. Acesso em: 15 de mar. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Agricultura familiar Estudos socioeconômicos e ambientais Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Transferência de Tecnologia Convivência com a Seca**, 2024. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/86634783/barragens-subterraneas-geraram-renda-excedente-de-mais-de-r-7-mil-anuais-a-agricultores>> Acesso em: 17 de abr. 2024.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Barragem subterrânea: acesso e usos múltiplos da água no Semiárido brasileiro** / Maria Sonia Lopes da Silva ... [et al.]. – Brasília, DF: Embrapa, 2021. PDF (45 p.): il. color. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br>> Acesso em: 17 de abr. 2024.

FERREIRA, I. A. R. **Água e Política no Sertão: Desafios ao programa um milhão de cisternas**. 2009. 141 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) Universidade de Brasília, Brasília –BR. Disponível em: < https://www.oasisbr.ibict.br/vufind/Record/UNB_a55dbb968f9592ec37bfcf191d31ed86 >. Acesso em: 19 de abr. 2024.

HORTON, R.E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology, **Geol. Soc. America Bulletin**, 1945, 56 (3), p.275-370. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10492>. Acesso em: 15 de abr. 2024.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Perfil do seu município: Lajes**. IBGE, 2016. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/lajes/>. Acesso em: 24 de mar. 2024.

LLAMAS, M. R. La insercion de las aguas subterraneas en los sistemas de gestion integrada. Boletin Geologico y Minero, v. 110, n. 4, p. 9–25, jul. 1999. Disponível em: **Barragens subterrâneas como alternativa para garantia de segurança hídrica em regiões áridas e semiáridas: desafios e oportunidades**. Acesso em: 12 de mar. 2024.

LIMA, A. O.; LIMA-FILHO, F. P.; DIAS, N. S.; REIS JÚNIOR, J. A.; SOUSA, A. M. GPR 3D profile of the adequateness of underground dams in a sub-watershed of the brazilian semiarid. Revista Caatinga. V. 31, n. 2, p. 523-531. 2018. Disponível em: **a empresa brasileira de pesquisa agropecuária (embrapa) e o desenvolvimento sustentável da agropecuária brasileira**. Acesso em: 15 de mar. 2024.

LIMA, A. O. Novas abordagens metodológicas para locação, modelagem 3D e monitoramento de barragens subterrâneas no semiárido brasileiro. Tese de Doutorado. Programa de Pós Graduação em Geodinâmica e Geofísica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 243 p. 2013. Disponível em: **a empresa brasileira de pesquisa agropecuária (embrapa) e o desenvolvimento sustentável da agropecuária brasileira**. Acesso em: 15 de mar. 2024.

LOPES, I., RAMOS, C. M. C. & LEAL, B. G. Caracterização morfométrica de bacia hidrográfica no semiárido de Pernambuco através de dados SRTM em softwares livre. Disponível em: **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, 8:31-40, 2018. Acesso em: 17 de abr. 2024.

LORENZON, A. S. et al.. Influência das características morfométricas da bacia hidrográfica do rioBenevente nas enchentes no município de Alfredo Chaves-ES. Disponível em: **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 195–206, jan. 2015. Acesso em: 14 de abr. 2024.

MAPBIOMAS. Disponível em: <brasil.mapbiomas.org/colecoes-mapbiomas/> Acesso em: 13 de abr. de 2024.

MC CUEN, R. H., WONG, S. L., RAWLS, W. J., (1984). **Estimating urban time of concentration. Journal of Hydraulic Engineering** 110 (7), pp 887-904. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/66/SBRH2013_PAP013097.pdf> Acesso em: 15 de abr. 2024.

MELLO, C. R.; SILVA, A. M.; BESKOW, S. **Hidrologia de Superfície: princípios e aplicações**. 2ª Edição. 531p. Editora UFLA, 2020.

Nações Unidas. **2,5 bilhões de pessoas não têm acesso a saneamento básico em todo o mundo**. New Yorque: United Nations, 2015. Disponível em: <<http://www.revistappr.com.br/conteudo.php?m=MTA2&l=tx>>. Acesso em: 19 de abr. 2024.

Oliveira, João Bosco de. Alves. Josualdo Justino. França, Francisco Mavignier Cavalcante. 2010. Disponível em: **Cartilhas temáticas tecnologias e práticas**

hidroambientais para convivência com o Semiárido. v. 3. 31p. Acesso em: 05 de mar. 2024.

OLIVEIRA, P. T. S., SOBRINHO, T. A., STEFFEN, J. L. & RODRIGUES, D. B. B. Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. Disponível em: **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 14:819-825, 2010. Acesso em: 17 de abr. 2024.

PORTO, E. R.; SILVA, A. de S; ANJOS, J. B. dos; BRITO, L. T. de L. e LOPES, P. R. **C. Captação e aproveitamento de água de chuva na produção agrícola dos pequenos produtores do Semi-Árido Brasileiro: o que tem sido feito e como ampliar sua aplicação no campo.** Disponível em: In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE SISTEMAS DE CAPTAÇÃO DE ÁGUA DE CHUVA, 9., 1999, Petrolina, PE. Anais... Petrolina, PE: Embrapa Semi-Árido, 1999. Acesso em: 12 de mar. 2024.

SILVA. J. A. M. da; COSTA. M. da C.; FERREIRA. R. C.; NETO. O. N. de S. **Análise multitemporal da degradação ambiental na Bacia Hidrográfica do Rio Ceará-Mirim por meio de sensoriamento remoto.** 2018. Disponível em: <https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conadis/2018/TRABALHO_EV116_M D1_SA18_ID1014_05112018115719.pdf> Acesso em: 11 de abr. 2024.

STRAHLER, A. N. **Hyposometric analysis of erosional topography.** *Geologic Society American Bulletin*, v. 63, n. 10, p. 1117-1142, 1952. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10492>. Acesso em: 10 de abr. 2024.

SZILAGYI, Gustavo. **Diagnóstico ambiental do processo de desertificação no município de Lajes/RN.** Dissertação (mestrado em Geografia). UERN. Natal: 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/18845/1/GustavoS.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2024.

Tonello, K. C., Dias, H. C. T., Souza, A. L., Ribeiro, C. A. A. S., Leite, F. P. 2006. Morfometria da Bacia Hidrográfica da Cachoeira Das Pombas, Guanhanes – MG. *Revista Árvore*, Viçosa – MG, 30 (5):849-857. Disponível em: **Nova abordagem metodológica para locação, modelagem 3D e monitoramento de barragens subterrâneas no semiárido brasileiro.** Acesso em: 16 de mar. 2024.

TEODORO, V. L. I.; TEIXEIRA, D.; COSTA, D. J. L.; FULLER, B. B. O Conceito de Bacia Hidrográfica e a Importância da Caracterização Morfométrica para o Entendimento da Dinâmica Ambiental Local. **Revista Brasileira Multidisciplinar**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 137-156, 2007. DOI: 10.25061/2527-2675/ReBraM/2007.v11i1.236. Disponível em: <https://revistarebram.com/index.php/revistauniara/article/view/236>. Acesso em: 15 abr. 2024.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** 4. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH, 2009. 943p.

WENZEL, Denise Aline; MORGAN ULIANA, Eduardo; TERRA DE ALMEIDA, Frederico; PACHECO DE SOUZA, Adilson; DOS SANTOS ALVES MENDES, Múcio André; DA SILVA SOUZA, Lucas Gerônimo. **Características fisiográficas de sub-bacias do médio e alto Rio Teles Pires - MT. Revista de Ciências Agro-Ambientais, [S. l.], v. 15, n. 2, p. 123–131, 2018. DOI: 10.5327/rcaa.v15i2.2193.** Disponível em: <https://periodicos.unemat.br/index.php/rcaa/article/view/2193>. Acesso em: 14 abr. 2024.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada.** São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. Disponível em: <<https://periodicos.unemat.br/index.php/rcaa/article/view/2193>> Acesso em: 15 abr. 2024.