



Universidade Federal do Pará



Faculdade de Geologia



Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

VITOR VIEIRA CENTENO

**NEOTECTÔNICA APLICADA A ESTRUTURAÇÃO DO ARCABOUÇO
HIDROGEOLÓGICO DA REGIÃO DE SALINÓPOLIS – NORDESTE DO PARÁ -**

BRASIL

**BELÉM – PARÁ
SETEMBRO – 2016**

VITOR VIEIRA CENTENO

NEOTECTÔNICA APLICADA A ESTRUTURAÇÃO DO ARCABOUÇO
HIDROGEOLÓGICO DA REGIÃO DE SALINÓPOLIS – NORDESTE DO PARÁ -
BRASIL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geologia do Instituto de Geociências
da Universidade Federal do Para – UFPA, em
cumprimento às exigências para obtenção do grau de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Matos de
Abreu

Coorientador: Ms. Osmar Guedes da Silva Jr.

BELÉM

2016

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Centeno, Vitor Vieira, 1992-
Neotectônica aplicada a estruturação do arcabouço
hidrogeológico da região de Salinópolis – Nordeste do Pará - Brasil /
Vitor Vieira Centeno. – 2016.
97 f : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Francisco de Assis Matos de Abreu
Coorientador: Osmar Guedes da Silva Jr.

Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geologia,
Belém, 2016.

1. Neotectônica – Salinópolis (PA). 2. Hidrogeologia
Salinópolis (PA). 3. Sensoriamento remoto – Salinópolis (PA). 4.
Geologia estrutural – Salinópolis (PA). I. Título.

CDD 22. ed.: 551.8098115

VITOR VIEIRA CENTENO

NEOTECTÔNICA APLICADA A ESTRUTURAÇÃO DO ARCABOUÇO
HIDROGEOLÓGICO DA REGIÃO DE SALINÓPOLIS – NORDESTE DO PARÁ -
BRASIL

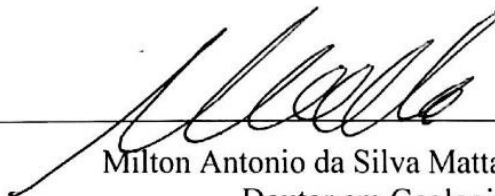
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Geologia do Instituto de
Geociências da Universidade Federal do Pará
(UFPA) em cumprimento às exigências para
obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

DATA DE APROVAÇÃO: 30 / 09 / 2016

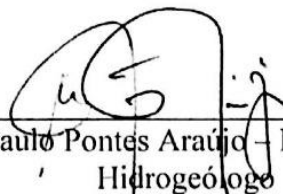
CONCEITO: Excelente



Francisco de Assis Matos de Abreu - Orientador
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará



Milton Antonio da Silva Matta – Membro
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará



Paulo Pontes Araújo – Membro
Hidrogeólogo
Serviço Geológico Brasileiro – CPRM

Ao meu avô, Ulysses Lauro Mendes Vieira.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, Felisberto Centeno Jr. e Katia Centeno, e as minhas irmãs Fernanda Centeno e Camila Centeno, por todo apoio e estímulo que me deram ao longo de toda minha graduação.

Aos meus avós Ulysses Vieira, Maria Vieira, Liege Centeno e Felisberto Centeno, por todos os conselhos e incentivo.

A Universidade Federal do Pará, ao Instituto de Geociências e a Faculdade de Geologia, por toda a infraestrutura e suporte disponibilizados.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Francisco Matos, por toda a paciência e dedicação prestadas ao longo não só deste trabalho, como em toda a minha graduação.

A todos os professores que estiveram presentes ao longo deste curso, em especial ao Prof. Dr. Estanislau Luczynski, orientador da minha primeira iniciação científica e pessoa fundamental nos meus primeiros anos de graduação; ao Prof. Dr. Paulo Gorayeb, pela ajuda fornecida em um dos períodos mais fundamentais do curso; ao Prof. Ms. Osmar Guedes, meu co-orientador, pelo auxílio na utilização dos diversos *softwares* empregados neste trabalho; aos Profs. José Augusto Correa e Milton Matta, pelo conhecimento transmitido em alguns aspectos fundamentais na elaboração deste TCC.

A todos os amigos do curso de Geologia, em especial a Ivinny Barros e Layse Holanda, minha eterna equipe; e a Alexandre Ribeiro, Paulo Faro, Paulo Ronny, Malu Millena e Enzo Venturieri.

A todo o grupo PET Geologia, em especial ao tutor Prof. Dr. Vladimir Távora, por todos os ensinamentos e aprendizados, e ao Ministério da Educação, órgão financiador deste programa.

A Capes, pela concessão da minha primeira bolsa de iniciação científica, o programa Jovens Talentos para Ciência.

Aos amigos de longa data, Leonardo Almeida, Henrique Concourd, Suzana Klautau, Arnaldo Jr, Giovana Mutran e Oscar Moraes.

*“A ciência é a busca
desinteressada pela verdade
objetiva a respeito do mundo
natural”*

Richard Dawkins

RESUMO

O presente trabalho buscou fazer um estudo integrado dos aspectos hidrogeológicos e neotectônicos na região de Salinópolis, nordeste do Pará, Brasil, em uma escala de 1:125.000, envolvendo as folhas SA-23-V-A-V, SA-23-V-A-IV-2 e SA-23-V-A-IV-4. Para isso, foi feita uma análise das principais características do relevo e da rede de drenagem, com o objetivo de determinar a influência dos processos neotectônicos na configuração desses elementos. Os mapas de drenagem foram gerados no *software Arc Map* versão 10.2 a partir da base vetorial disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a qual foi refinada fazendo-se o uso de imagens GeoEye e anaglifos obtidos através dos programas *Google Earth Pro* e *Zoner Photo Studio*. Os mapas de relevo foram criados empregando-se os *softwares Global Mapper v14.0* e *Arc Map* versão 10.2, nos quais se utilizou modelos digitais de elevação com resolução espacial de 30 metros obtidos pela missão *Shuttle Radar Topography Mission*. Os resultados apontam a presença de dois domínios estruturais distintos de características dextrais: um na porção oeste, onde ocorrem falhas transtrativas com orientação N-S e transcorrentes orientadas segundo NE-SW, e outro na porção leste, marcado por falhas normais na direção NW-SE interligadas por transcorrências com disposições NE-SE e E-W, além de estruturas transtrativas N-S. Estas estruturas modificaram o arranjo geométrico dos aquíferos da região, além de terem alterado os padrões de fluxo hidráulico subterrâneo. No caso das feições trativas/ transtrativas, estas também definem áreas de recarga para os aquíferos mais profundos, os quais adquirem características semi-confinadas e interagem de forma mais intensa com os corpos hídricos mais superficiais.

Palavras-chave: Neotectônica. Hidrogeologia. Sensoriamento Remoto. Análise Estrutural. Salinópolis – Pa.

ABSTRACT

This study aimed to make an integrated study of the hydrogeological and neotectonic aspects in the area of Salinópolis, northeast of Pará, Brazil, on a scale of 1: 125,000, involving the sheets SA-VAV, SA-VA-IV-2 and SA-VA -IV-4. For this, it was made an analysis of the main features of relief and drainage network, in order to determinate the influence of neotectonic processes in the configuration of these elements. Drainage maps were generated in *Arc Map* version 10.2, using the vector base provided by the Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, which was refined with the use of GeoEye images and anaglyphs, that were generate through the softwares *Google Earth Pro* and *Zoner Photo Studio*. The relief maps were created in the softwares *Global Mapper v14.0* and *Arc Map* version 10.2, which was used in digital elevation models with a spatial resolution of 30 meters obtained by the Shuttle Radar Topography Mission. The results show the presence of two distinct structural domains of dextral features: one in the western portion, where there are transtrative faults in N-S direction and strike-slip structures in NE-SW, and another domain in the eastern portion, marked by normal faults in NW-SE direction interconnected by transcurrences in NE-SE and E-W, along with N-S transtrative structures. These structures have changed the geometric arrangement of the aquifers in the region, and have modified the standards of underground hydraulic flow. In the case of trative/ transtrative features, these also define recharge areas to the deeper aquifers, which acquire semi-confined features and interact more intensely with the surface water bodies.

Keywords: Neotectonics. Hydrogeology. Remote Sensing. Structural analysis. Salinópolis - Pa.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1.1: Hidrologia e as suas subdivisões	20
Figura 2.1.2: Seção representativa mostrando um aquífero livre, um confinado, as áreas de recarga e descarga e os diferentes tipos de poços associados.....	22
Figura 2.2.1: Exemplos de representação por dados com estrutura matricial e vetorial	24
Figura 2.3.1: Gráfico Esforço (σ) x Deformação (ϵ) para uma rocha.....	27
Figura 2.3.2: Modelo de comportamento da crosta em seus diferentes níveis quando submetida a processos deformacionais.....	28
Figura 2.3.3: Elipsóides de tensão e deformação.	29
Figura 2.3.4: Tipos de fraturas.....	30
Figura 2.3.5: Fraturas e outras estruturas desenvolvidas em um processo de cisalhamento puro rúptil.....	31
Figura 2.3.6: Tipos de fraturas em um regime de deformação coaxial segundo o modelo de Anderson (1951), o qual define (a) falha normal, (b) falha inversa e (c) falha transcorrente.....	32
Figura 2.3.7: Fraturas formadas em um processo de cisalhamento simples segundo o modelo de Riedel (a) e outras estruturas que podem ocorrer de maneira associada (b).	33
Figura 2.4.1: Abrangência temporal de determinados dados usadas para investigações neotectônicas	34
Figura 2.4.2: Geometria dos sistemas de juntas. (a) Juntas sistemáticas verticais de extensão ligadas por juntas assistemáticas. (b) Juntas sistemáticas verticais de extensão e íngremes híbridas ligadas por juntas assistemáticas. (c) Juntas sistemáticas verticais de extensão e híbridas ligadas por juntas assistemáticas.	35
Figura 2.4.3: Propriedades a serem analisadas na rede de drenagem no método lógico sistemático.....	38
Figura 2.4.4: Principais padrões de drenagem.	38
Figura 2.4.5: Alguns padrões secundários de drenagem	39
Figura 2.4.6: Algumas propriedades do relevo a serem analisadas no método lógico sistemático. Simetria alta (A), fracamente assimétrico (B), moderadamente assimétrica (C) e fortemente assimétrica (D). Geometria da encosta côncava-retilínea-convexa (E), côncava (F), côncava-convexa (G) e convexa (H). Quebras positivas e negativas assinaladas respectivamente por “Λ” e “V” nas imagens A-D.	40
Figura 2.4.7: Estágios de evolução de uma escarpa de falha normal.	41

Figura 2.4.8: Feições geomorfológicas comumente associadas a transcorrência.	41
Figura 3.1.1: Mapa de localização da área de estudo, a qual se situa no nordeste do estado do Pará e abrange totalmente ou parcialmente 11 municípios.	42
Figura 3.1.2: Imagem de satélite da área de estudo vista a uma altitude de 95 km. .	43
Figura 3.2.1: Variação anual da precipitação e da temperatura em Salinópolis.	44
Figura 3.3.1: Imagem de satélite na região da área de estudo destacando as duas grandes unidades morfoestruturais presentes: o Planalto Costeiro da Amazônia (com coloração mais clara) e Planícies Fluviomarinhas (com coloração mais escura, ocorrendo principalmente ao longo do litoral e nos vales dos rios).	45
Figura 3.4.1 - Estruturas do Terciário Superior no nordeste do Pará. Área sombreada corresponde a bacia terciária onde se depositaram as unidades Pirabas e Barreiras. Setas divergentes mostram a orientação do componente distensivo (σ_3) e as convergentes mostram a orientação do componente compressivo (σ_1)	51
Figura 3.4.2 - Feições estruturais do Quaternário no nordeste do Pará.	52
Figura 3.4.3 – Mapa morfoestrutural da área de Salgado, NE do Pará, segundo Costa et al. (1991).	53
Figura 4.1: Situação hipotética de uma área onde se encontram 8 alinhamentos na direção E-W e 2 na direção NE, sendo cada um destes últimos 6 vezes maior que cada um dos primeiros.	55
Figura 4.2: Rosácea de alinhamentos levando em consideração apenas a quantidade de elementos em cada direção.	56
Figura 4.2: Rosáceas de alinhamentos levando em consideração a somatória dos tamanhos dos elementos em cada direção.	57
Figura 5.1.1 – Mapa de Drenagem da área de estudo.	59
Figura 5.1.2: Mapa de alinhamentos de elementos de drenagem, mostrados pelas linhas vermelhas em (a) e rosáceas mostrando as direções preferenciais dos alinhamentos na área em geral (b) e nas zonas homólogas (c-i).....	60
Figura 5.1.3: Zona Homóloga 1.	61
Figura 5.1.4: Zona Homóloga 2.	63
Figura 5.1.5: Zona Homóloga 3.	64
Figura 5.1.6: Zona Homóloga 4.	66
Figura 5.1.7: Zona Homóloga 5.	68
Figura 5.1.8: Zona Homóloga 6.	69
Figura 5.1.9: Zona Homóloga 7.	69
Figura 5.2.1: Mapa altimétrico colorido (a) onde a linha vermelha mostra onde foi traçada a seção mostrada em (b).	72

Figura 5.2.2: Mapa altimétrico preto e branco, no qual as áreas mais baixas aparecem com um tom mais escuro e as mais elevadas com uma cor mais clara....	73
Figura 5.2.3: Mapa de declividade do relevo, onde as porções mais inclinadas aparecem com cores escuras e as mais horizontais com cores claras.....	74
Figura 5.2.4: Mapa de alinhamentos de elementos de relevo (mostrados pelas linhas vermelhas) e rosáceas mostrando as direções preferenciais dos alinhamentos.....	75
Figura 5.2.5: Exemplos de formas de relevo com geometrias aproximadamente lenticulares e romboédricas que ocorrem ao longo da área.	76
Figura 5.3.1: Mapa Morfoestrutural, onde se observa um arranjo em blocos, cujos limites foram definidos ao longo dos principais trechos de canais retilíneos e das quebras e alinhamentos de relevo.	81
Figura 5.3.2: Seções ao longo da área de estudo, evidenciando uma configuração morfoestrutural em blocos.	82
Figura 5.3.3: Rosáceas de alinhamentos de drenagem (a) e relevo (b) para o Domínio Oeste.	83
Figura 5.3.4: Rosáceas de alinhamentos de drenagem (a) e relevo (b) para o Domínio Leste.	83
Figura 5.3.5: Rosáceas com dados integrados de alinhamentos de drenagem e relevo para os domínios Oeste (A) e Leste (B).....	83
Figura 6.1: Elipsóides de deformação para a região oeste e leste da área de estudo, nos quais o estiramento ocorre nas direções N-S e NW-SE, respectivamente.	85
Figura 6.2: Seção NW-SE ao longo do bloco oeste (entre os rios Sampaio e Urindeua) em Salinópolis. I, N, J, B, P e D referem-se a localização dos perfis geofísicos usados para a elaboração desta seção.	87
Figura 6.3: Mapa mostrando as principais áreas de recarga localizadas longo de estruturas trativas na área de estudo.	88
Figura 6.4: Imagem de satélite do município de Salinópolis, destacando as áreas de recarga da Formação Pirabas (praias do Farol Velho, Maçarico e Atalaia) e dos demais aquíferos da região (Rio Sampaio e Rio Urindeua).	89
Figura 6.5: Modelo proposto por Palheta (2008) para a descrição dos mecanismos de infiltração, fluxo, recarga e interação de volumes aquosos em sistemas hidrogeológicos afetados por falhas trativas.	91

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
1.2	OBJETIVOS	17
1.2.1	Gerais.....	17
1.2.2	Específicos	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1	HIDROLOGIA E A HIDROGEOLOGIA.....	20
2.2	GEOPROCESSAMENTO - SIG	23
2.2.1	Tipos de dados.....	23
2.2.2	Estrutura de um SIG.....	25
2.2.3	Principais áreas de aplicação.....	25
2.3	GEOLOGIA ESTRUTURAL	26
2.3.1	Elipsoides de deformação e esforço.....	28
2.3.2	Deformação rúptil.....	29
2.4	NEOTECTÔNICA E O MÉTODO LÓGICO SISTEMÁTICO NA ANÁLISE E INTERPREÇÃO DA REDE DE DRENAGEM E RELEVO	33
2.4.1	Drenagem	36
2.4.2	Relevo.....	39
3	CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	42
3.1	LOCALIZAÇÃO	42
3.2	CLIMA.....	44
3.3	RELEVO.....	45
3.4	GEOLOGIA.....	46

3.4.1	Estratigrafia	46
3.4.2	Neotectônica	50
4	MATERIAIS E MÉTODOS	54
4.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	54
4.2	MAPAS DE DRENAGEM.....	54
4.3	MAPAS DE RELEVO.....	54
4.4	ALINHAMENTOS DE DRENAGEM E RELEVO.....	55
4.5	ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS	57
5	RESULTADOS	58
5.1	ANÁLISE DA REDE DE DRENAGEM	58
5.2	ANÁLISE DO RELEVO	70
5.3	ANÁLISE INTEGRADA E DISCUSSÃO	77
6	ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS	84
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	92
	REFERÊNCIAS.....	94

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A água é o bem natural de maior valor para a humanidade. Além de compor $\frac{3}{4}$ do organismo humano e atuar em diversos processos fisiológicos como manutenção da temperatura corporal e respiração, esta substância é de suma importância para o desenvolvimento da sociedade moderna, a qual depende deste recurso para a produção de alimentos, geração de energia e manutenção de processos industriais. Com isso, torna-se fundamental uma boa gestão deste recurso, visando evitar ou amenizar problemas relacionados a seca e contaminação.

A maior parte da água doce disponível no mundo para consumo humano encontra-se armazenada em subsuperfície, fato que atribui uma importância significativa para os estudos no campo da hidrogeologia. No Brasil, com o crescente aumento na utilização dos recursos hídricos subterrâneos, aumentou-se a necessidade de estudos que forneçam informações como subsídios para a preservação e utilização racional desses mananciais. A maioria desses trabalhos, entretanto, não leva em consideração os aspectos estruturais de uma região, especialmente os relacionados a neotectônica.

Na região nordeste do Pará, um dos primeiros trabalhos a considerar a possibilidade de influência da tectônica moderna no arcabouço geométrico dos aquíferos foi o de Matta (2002), o qual realizou um estudo extenso acerca dos aspectos hidrogeológicos na região de Belém e Ananindeua. Ao estudar o arranjo espacial das camadas dos sistemas Pirabas e Barreiras, o autor considerou duas hipóteses: a primeira atribui um arranjo lenticular aos estratos e a segunda considera a presença de falhas normais como manifestações de atividades neotectônicas na região.

Costa (2004) fez uma análise integrada das características hidrogeológicas e estruturais da Região Metropolitana de Belém e comprovou a influência neotectônica na geometria e recarga dos aquíferos dessa área. Trabalhos similares foram realizados na ilha de Mosqueiro, por Palheta (2008), na região de Castanhal, por Bandeira (2008) e na bacia hidrográfica do Rio Tauá, por Carmona (2013).

Um dos primeiros registros na literatura científica da utilização do termo “neotectônica” data de 1948, em um artigo escrito pelo geólogo soviético Vladimir Obruchev, o qual definiu como aqueles “movimentos tectônicos recentes ocorridos durante o Terciário Superior (Neogeno) e o Quaternário, os quais desempenham um papel essencial na origem da topografia contemporânea”. Apesar disso, poucos trabalhos sobre o tema foram realizados nos vinte anos que se seguiram a publicação deste artigo (SAADI, 1993).

De acordo com Hasui (1990), esse cenário mudou a partir da segunda metade da década de 70, onde numerosos estudos foram publicados reconhecendo a neotectônica como um elemento importante na evolução da crosta terrestre. Dentre estes, destaca-se os trabalhos de Jain (1973) *apud* Saadi (1993), que tratou da importância dos estudos neotectônicos para o avanço dos conhecimentos relativos a geotectônica, e Trifonov (1989) *apud* Saadi (1993), o qual afirmou que a tectônica recente é importante para analisar movimentos crustais cenozoicos, estudar questões relacionadas a sismicidade e comparar a tectônica ativa com movimentos tectônicos pretéritos.

A despeito de todas as publicações sobre esse assunto, ainda não existe um consenso com relação a definição do conceito de “neotectônica”. Além da definição de Obruchev, existem outras propostas para o significado deste termo. A Comissão de Neotectônica da Associação Internacional de Estudos do Quaternário (NC/INQUA), por exemplo, adotou em 1978 uma significação ausente de limites temporais, considerando os movimentos neotectônicos como aqueles que ocorrem ou ocorreram recentemente, cuja a origem temporal varia de região para região, dependendo da configuração tectônica atual (LIMA, 2000). De maneira similar, Pavlides (1989) *apud* Lima (2000), considera que o início das atividades neotectônicas varia de região para região, sendo dependente diretamente das características de cada ambiente geológico.

Porém, apesar dessas variações conceituais, existe uma relativa concordância entre os acadêmicos com relação a ligação entre os processos neotectônicos, as feições geomorfológicas e as atividades sísmicas recentes.

Segundo Saadi (1993), no Brasil, os primeiros estudos a tratarem do assunto foram os de Freitas (1951) e Guimarães (1951). O primeiro tentou esboçar um quadro

geral da tectônica moderna no Brasil estudando determinados aspectos geomorfológicos e geológicos. O segundo buscou explicar a configuração de algumas redes hidrográficas brasileiras através de mecanismos tectônicos recentes.

O trabalho de Hasui (1990) é talvez o mais importante já publicado sobre a neotectônica na Plataforma Sul-Americana. Segundo este, os movimentos crustais modernos nessa região são oriundos da reativação de falhamentos pré-cambrianos ocorrida a partir do Oligo-Mioceno ou Mioceno, durante o pós-clímax da abertura do Oceano Atlântico. Estes movimentos são caracterizados pela rotação desta placa de leste para oeste, sendo causados pela atuação de um binário dextral E-W com componentes transpressivos em NW-SE e transtensivos em NE-SW. O autor propôs o início da sedimentação do Grupo Barreiras, o término do magmatismo no Brasil (a aproximadamente 12 milhões de anos) e a deposição do último pacote nas bacias costeiras como o marco do início desses eventos.

Na Amazônia, Costa et al. (1996) fizeram um estudo geral do arcabouço neotectônico da região. Segundo eles, “vários tipos de estruturas são observados nas rochas pré-cambrianas, mesozoicas e cenozoicas da região Amazônica, as quais representam as principais feições do quadro neotectônico desenvolvido desde o Mioceno”.

Desta forma, o presente trabalho discute a relação dos aspectos neotectônicos com o arcabouço hidrogeológico na região do município de Salinópolis, no nordeste do estado do Pará.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Gerais

O principal objetivo deste trabalho é analisar a relação dos aspectos hidrogeológicos na região de Salinópolis com os elementos estruturais presentes na área, especialmente aqueles relacionados às atividades tectônicas mais recentes, para assim, discutir as possíveis influências destes nos sistemas hidrogeológicos da região.

1.2.2 Específicos

Destacam-se como objetivos específicos deste trabalho:

- Caracterizar a rede de drenagem e os aspectos geomorfológicos da área de estudo.
- Discutir possíveis zonas de recarga, padrões de fluxo e interação entre as águas dos aquíferos da região.
- Fornecer subsídios para auxiliar uma gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente àqueles presentes em subsuperfície.
- Elaboração de um banco de dados em um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), reunindo todos os dados obtidos no decorrer deste trabalho.

1.3 JUSTIFICATIVA

No Brasil, a maior parte da distribuição de água se dá através da captação de águas superficiais. Entretanto, nos últimos anos vem ocorrendo uma tendência de se explorar cada vez mais as águas subterrâneas para o abastecimento da população, pois apresentam melhores qualidades físico-químicas-bacteriológicas, dispensam longas redes de distribuição, permitem investimentos gradativos com a demanda e são mais protegidas contra a contaminação e evaporação (REBOUÇAS, 1994).

Na região de Salinópolis, essa tendência é ainda mais acentuada. Visto que a maioria dos reservatórios superficiais são de água salgada, devido a influência direta do Oceano Atlântico, os habitantes deste município e arredores são abastecidos quase que exclusivamente pelas águas obtidas através de poços, cuja captação se dá através das unidades Barreiras e Pirabas (OLIVEIRA et al., 2006).

A expansão das atividades turísticas nesta região, verificada principalmente a partir da década de 60, provocou uma expansão urbana sem planejamento, trazendo consigo os mais variados problemas relacionados a este processo. Entre estes, estão a destinação inadequada de resíduos sólidos, a ausência de tratamento de esgoto e a impermeabilização do solo. Matta (2001) foi um dos primeiros a advertir sobre a influência negativa exercida pela ocupação desordenada nos recursos hidrogeológicos locais, ao atentar sobre o aumento da cunha salina nos aquíferos. Do

mesmo modo, esta questão foi levantada no trabalho de Assunção et al. (2012) que também ressaltaram o aumento da contaminação das águas subterrâneas nesta região.

O fato desta área se situar em um dos locais onde aflora a Formação Pirabas constitui um agravante, visto que esta unidade constitui um importante aquífero de características confinadas/ semiconfinadas em zonas urbanas densamente povoadas, como é o caso da Região Metropolitana de Belém.

Com isso, os estudos dos aspectos hidrogeológicos dessa região assumem uma importância fundamental, no sentido de fornecer informações para a tomada de decisões e elaboração de políticas públicas que visem uma gestão integrada desses recursos.

Na área de estudo, ainda são poucos os trabalhos de pesquisa acerca da sua hidrogeologia. Dentre estes, destacam-se os estudos de Freimann (2012) e Freimann (2014), que buscaram determinar as profundidades e espessuras das camadas litológicas através da correlação de perfis geofísicos, de Oliveira et al. (2011) e Lopes et al. (2012), que fizeram um diagnóstico geral dos recursos hídricos e como eles estão sendo utilizados, e Assunção et al. (2012), os quais mostraram os impactos negativos sobre os aquíferos ocasionados pela urbanização desordenada na região.

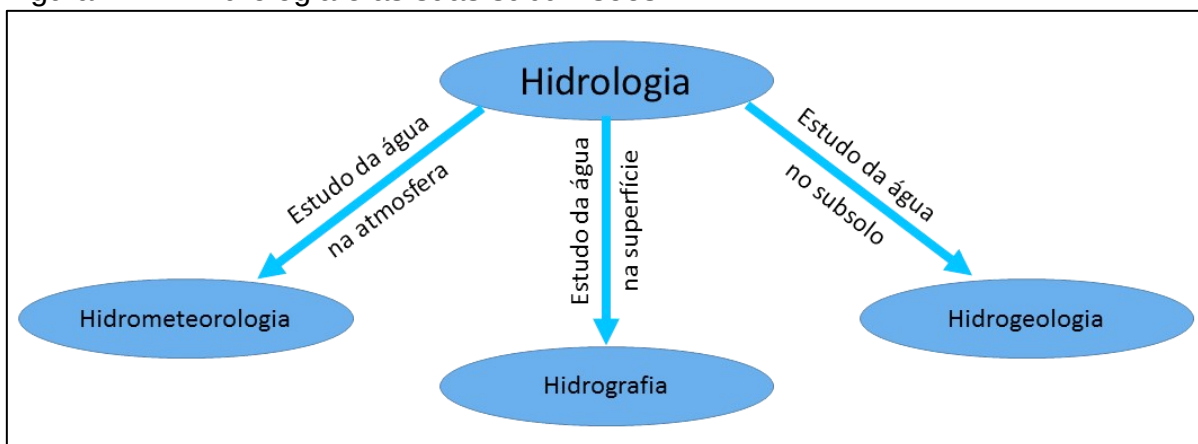
Nessa região, porém, ainda não foi publicado nenhum estudo que leve em consideração uma abordagem integrada das características hidrogeológicas com os aspectos estruturais da área. Estes aspectos são necessários para definir com maior precisão determinados questões relativas a zonas de recarga, padrões de fluxo e geometria dos aquíferos. Assim, o presente trabalho almeja realizar esta integração.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HIDROLOGIA E A HIDROGEOLOGIA

A hidrologia é o estudo da distribuição, forma de ocorrência e movimentação da água na Terra. De maneira geral, esta ciência possui três subdivisões, mostradas na Figura 2.1.1:

Figura 2.1.1: Hidrologia e as suas subdivisões



Fonte: Elaborado pelo autor.

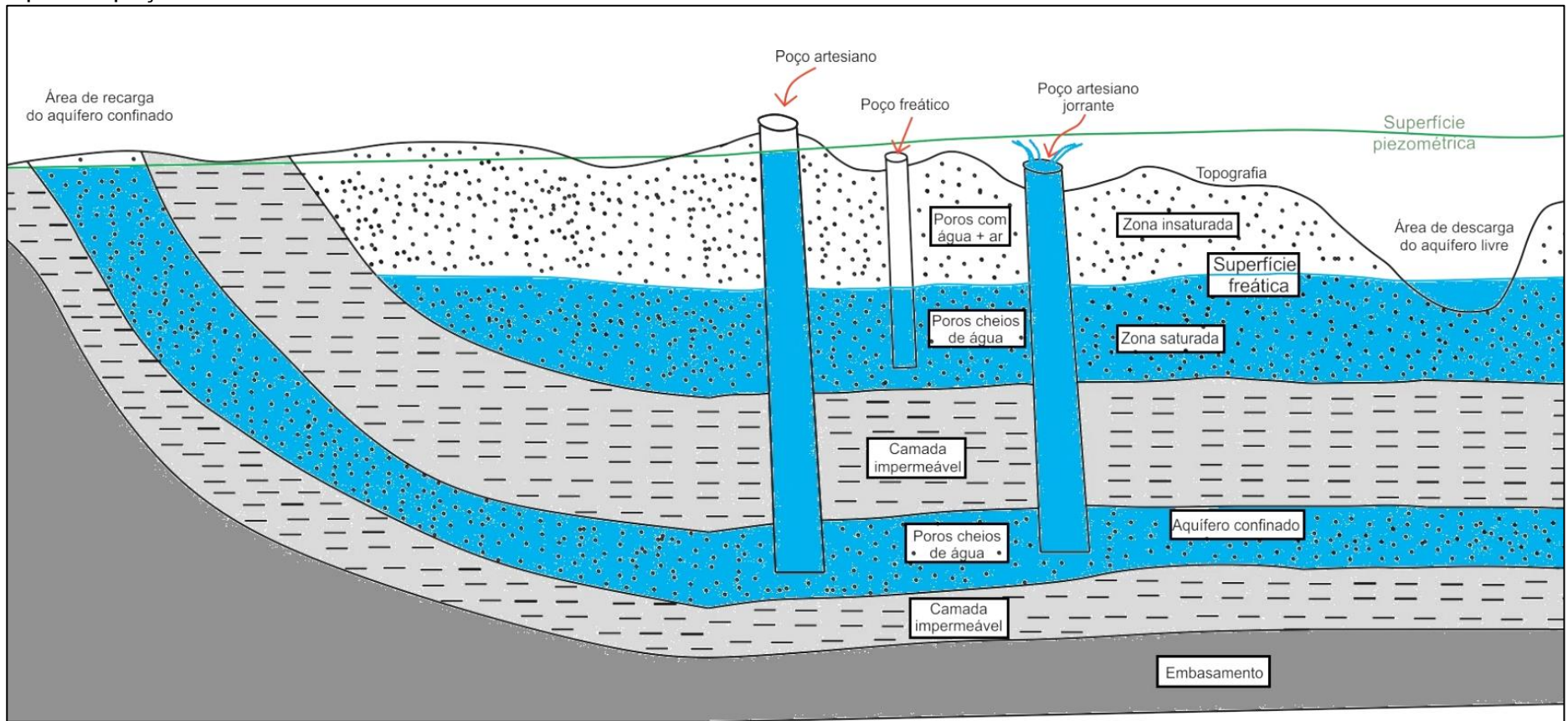
Sendo assim, a hidrogeologia pode ser definida como a parte da hidrologia que estuda os aspectos relacionados as águas subterrâneas, dentre eles o volume, características físico-química-bacteriológicas, movimentação, distribuição e ocorrência.

Segundo dados de Shiklomanov (1998) apud Matta (2002), de toda a água existente no mundo, 97.5% é salgada, 1.72% está em geleiras e apenas 0.78% corresponde a água doce disponível para o consumo humano. No caso desta, 96.1% encontram-se no subsolo, estando os outros 3.9% em rios, lagos, nuvens e outras formas. Portanto, os estudos no campo da hidrogeologia são indispensáveis para uma utilização racional dos recursos hídricos.

No subsolo, as águas ocorrem em fissuras, rochas e/ou sedimentos porosos e permeáveis, chamados de aquíferos. Dependendo da presença ou não da cobertura de uma camada impermeável, os aquíferos podem ser classificados como livres (também chamados de freáticos), quando esta cobertura está ausente, ou confinados, no caso da ocorrência desta. No caso deste último, a área onde suas rochas afloram corresponde a sua zona de recarga.

Os aquíferos livres são compostos pela zona insaturada, onde os poros estão preenchidos parcialmente ou ausentes de água, e pela zona saturada, quando os poros estão preenchidos totalmente por água. O limite entre as duas é dado pela superfície freática, que corresponde ao nível da água no aquífero livre. As áreas em que esta se encontra acima da topografia recebem o nome de zona de descarga. Poços que captam água do aquífero livre são chamados de freáticos. Já os poços que captam água do aquífero confinado são chamados de artesianos. Nestes, o nível da água é chamado de nível piezométrico. Se este estiver acima da topografia, o poço é jorrante. A Figura 2.1.2 faz uma síntese desses conceitos abordados nestes dois últimos parágrafos.

Figura 2.1.2: Seção representativa mostrando um aquífero livre, um confinado, as áreas de recarga e descarga e os diferentes tipos de poços associados.



Fonte: Adaptado de Feitosa e Manoel Filho (2000).

2.2 GEOPROCESSAMENTO - SIG

Um Sistema de Informações Geográficas (SIG) pode ser definido como um sistema no qual operam procedimentos de coleta, armazenamento, manipulação, análise, visualização e integração de dados georreferenciados. A utilização desses sistemas oferece ao utilizador um melhor entendimento de uma determinada área, devido a possibilidade de relacionar informações referentes às mais diversas questões, mas que possuem em comum a sua localização espacial.

2.2.1 Tipos de dados

Segundo Fitz (2008), existem dois tipos de dados que compõem um SIG: os alfanuméricos e os espaciais.

Os dados alfanuméricos são aqueles que podem ser armazenados em tabelas, como números e letras, os quais constituem um banco de informações qualitativas e quantitativas de um determinado dado espacial.

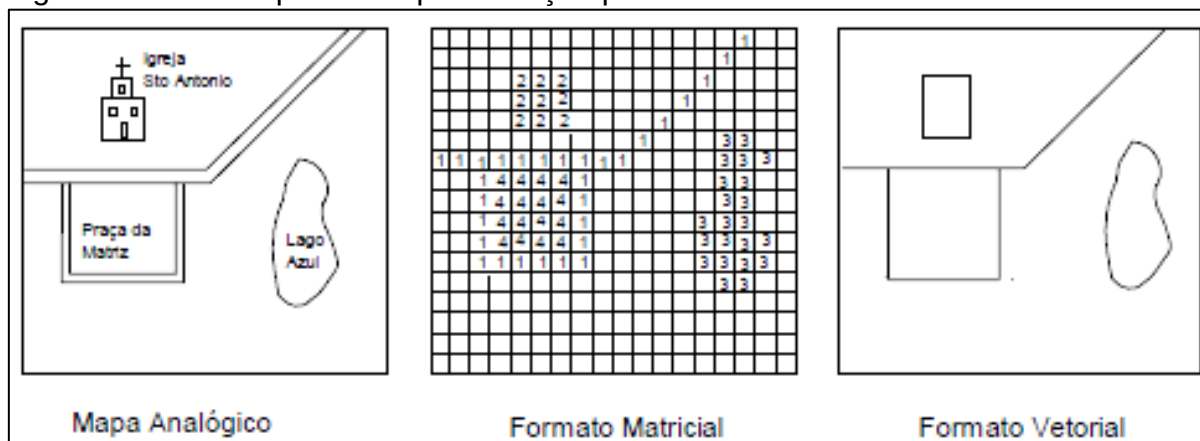
Já os dados espaciais são aqueles que podem ser representados no espaço de forma gráfica, como imagens e mapas. Estes dados podem apresentar estrutura vetorial ou matricial (ou *raster*).

Na estrutura matricial, a área é representada na forma de uma grade composta por um determinado número de células, chamadas de *pixels* que se organizam em n linhas e m colunas, as quais definem a posição da célula. Cada célula apresenta um valor que indica a entidade naquela posição, como por exemplo, a cota topográfica (LISBOA FILHO; IOCHPE, 1996).

A estrutura vetorial se utiliza de um sistema de pares de coordenadas para formar pontos, linhas e polígonos. A representação de uma entidade vai depender da escala utilizada. Por exemplo, em uma escala grande, uma cidade pode ser representada por pontos, linhas e polígonos, que constituíram os elementos que compõe a cidade (como estradas, bairros, praças, pontos de ônibus, etc). Ao contrário do modelo matricial, os dados vetoriais não precisam preencher completamente um determinado espaço (LISBOA FILHO; IOCHPE, 1996).

A Figura 2.2.1 e a Tabela 2.2.1 resumem as principais diferenças entre a estrutura matricial e vetorial.

Figura 2.2.1: Exemplos de representação por dados com estrutura matricial e vetorial



Fonte: Extraído de Lisboa Filho e Lochpe (1996)

Tabela 2.2.1: Diferenças entre a estrutura matricial e a vetorial

Matricial	Vetorial
Traduzem imagens digitais matriciais geradas por sensoriamento remoto e processos de escaneirização.	Traduzem imagens vetorizadas, compostas por pontos, linhas e polígonos.
Execução de operações entre camadas ou <i>layers</i> de mesma área e atributos distintos é extremamente fácil e rápida.	Execução de operações entre camadas ou <i>layers</i> de mesma área e atributos distintos é bastante complexa e demorada.
Vínculo com atributos alfanuméricos é dificultado (<i>pixel a pixel</i>).	Vínculo com atributos alfanuméricos torna-se facilitado, já que se dá através do ponto, linha ou polígono registrado.
Resolução digital está vinculada diretamente a quantidade de <i>pixels</i> da imagem, podendo requerer processadores de grande capacidade e velocidade.	Resolução digital do mapa é limitada pela quantidade de vetores dispostos e de sua impressão, o que propicia grande detalhamento.
Fronteiras das imagens são descontinuas (efeito serrilhado).	Fronteiras das imagens são contínuas (feições regulares).
Cálculos de distâncias, áreas etc. vinculam-se ao desempenho do <i>hardware</i> .	Cálculos de distâncias, áreas etc. são em geral, simplificados, tornando o processamento mais rápido.

Fonte: Extraído de Fitz (2008).

2.2.2 Estrutura de um SIG

Um SIG pode ser concebido para os mais diversos fins, os quais determinarão as suas diferentes funções. Devido a isso, a estrutura varia de um sistema para outro. Quando usado para fins diversos, o SIG pode apresentar uma estrutura genérica, normalmente presente em *softwares* comerciais, como o *ArcGis* e o *Global Mapper*. Quando a finalidade é mais específica, sua composição pode ser mais direcionada, como por exemplo, em um SIG voltado para informações meteorológicas, onde o usuário extraí informações sobre pluviosidade, humidade e temperatura de um determinado local. Neste caso, esses sistemas são obtidos a partir de SIGs genéricos (FITZ, 2008).

De acordo com Fitz (2008), a constituição de um SIG é dada por:

- *Hardware*: os componentes físicos do sistema, como por exemplo: teclado, CPU, mouse, disco rígido, memória RAM, placa mãe, etc.
- *Software*: conjunto de componentes lógicos que fornecem as instruções que determinam o funcionamento do sistema.
- *Dados*: informação ou conjunto de informações, organizadas ou não, obtidas mediante a observação ou medição. Novos dados podem ser gerados mediante a tratamento e/ou processamento de dados antigos.
- *Recursos humanos*: são os usuários envolvidos.

2.2.3 Principais áreas de aplicação

Ramirez (1994) apud Lisboa Filho e Lochpe (1996) listou diversas aplicações possíveis de um SIG, sintetizadas na Tabela 2.2.2:

Tabela 2.2.2: Aplicações de um SIG.

Área de aplicação		Aplicações
Ocupação humana	Planejamento e gerenciamento urbano	Levantamentos censitários, redes de distribuições (água, gás, energia, esgoto), mapeamento de áreas de risco, planejamento de limpeza urbana, cadastramento territorial, mapeamento eleitoral, distribuição de renda.
	Saúde	Rede hospitalar, saneamento básico, controle epidemiológico, mapeamento de doenças.
	Educação	Rede de ensino, levantamento do desempenho escolar, levantamento de professores e alunos.
	Transporte	Supervisão da malha viárias, controle de tráfego
	Segurança	Monitoramento de crimes, logística policial, supervisão e controle do espaço e tráfego aéreo, marítimo e terrestre, serviços de mapeamentos emergenciais.
Utilização da terra		Planejamento agropecuário, cadastramento de propriedades rurais, levantamentos topográficos, mapeamento do uso da terra, classificação dos solos, tipos de vegetações.
Utilização de recursos naturais		Supervisão de atividades extrativistas, disponibilidade e tipos de recursos.
Meio ambiente		Supervisão do desmatamento, monitoramento de espécies em extinção, mudanças climáticas, controle de poluentes, mapeamento de vulnerabilidade ambiental.
Atividades econômicas		Pesquisas de opinião, planejamento publicitário, planejamento logístico e operacional, mapas de demandas.

Fonte: Adaptado de Ramirez (1994) apud Lisboa Filho e Lochpe (1996).

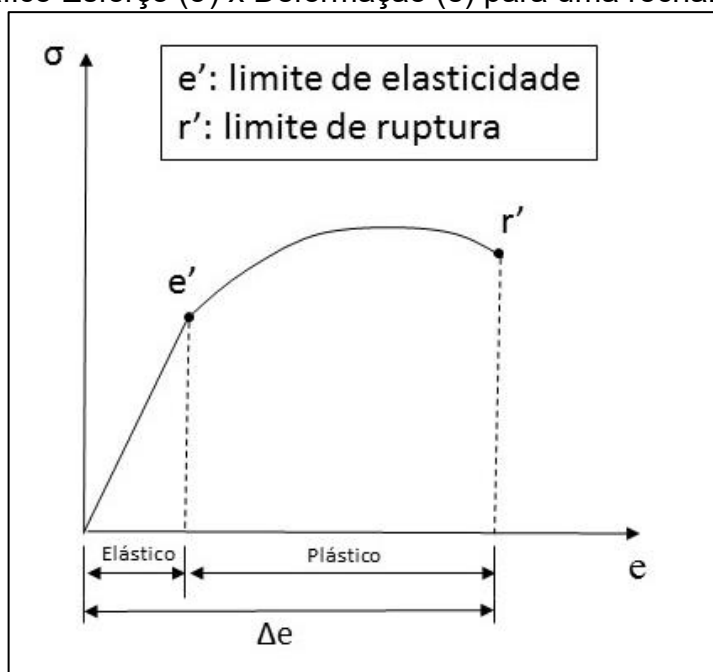
2.3 GEOLOGIA ESTRUTURAL

Feições estruturais em Geologia são aquelas que surgem em um conjunto rochoso quando este é submetido a esforços (*stress*) diferenciais de natureza

geralmente tectônica, que resultam em condições mecânicas e energéticas diferentes daquelas em que o conjunto se formou.

A Figura 2.3.1 mostra o gráfico Esforço (σ) x Deformação (e) para um conjunto litológico qualquer. Quando submetidas a esforços, as rochas inicialmente adquirem um comportamento elástico, isto é, ao remover os esforços, o material volta a sua forma original, caracterizando uma deformação reversível. Com o aumento do esforço, a rocha atinge um ponto a partir do qual a deformação é irreversível. Esse ponto é chamado de limite de elasticidade e a partir dele o material passa a adquirir um comportamento plástico. Este comportamento irá persistir até o momento em que os esforços atuantes sejam altos o suficiente para romperem a rocha, o que ocorre no limite de ruptura.

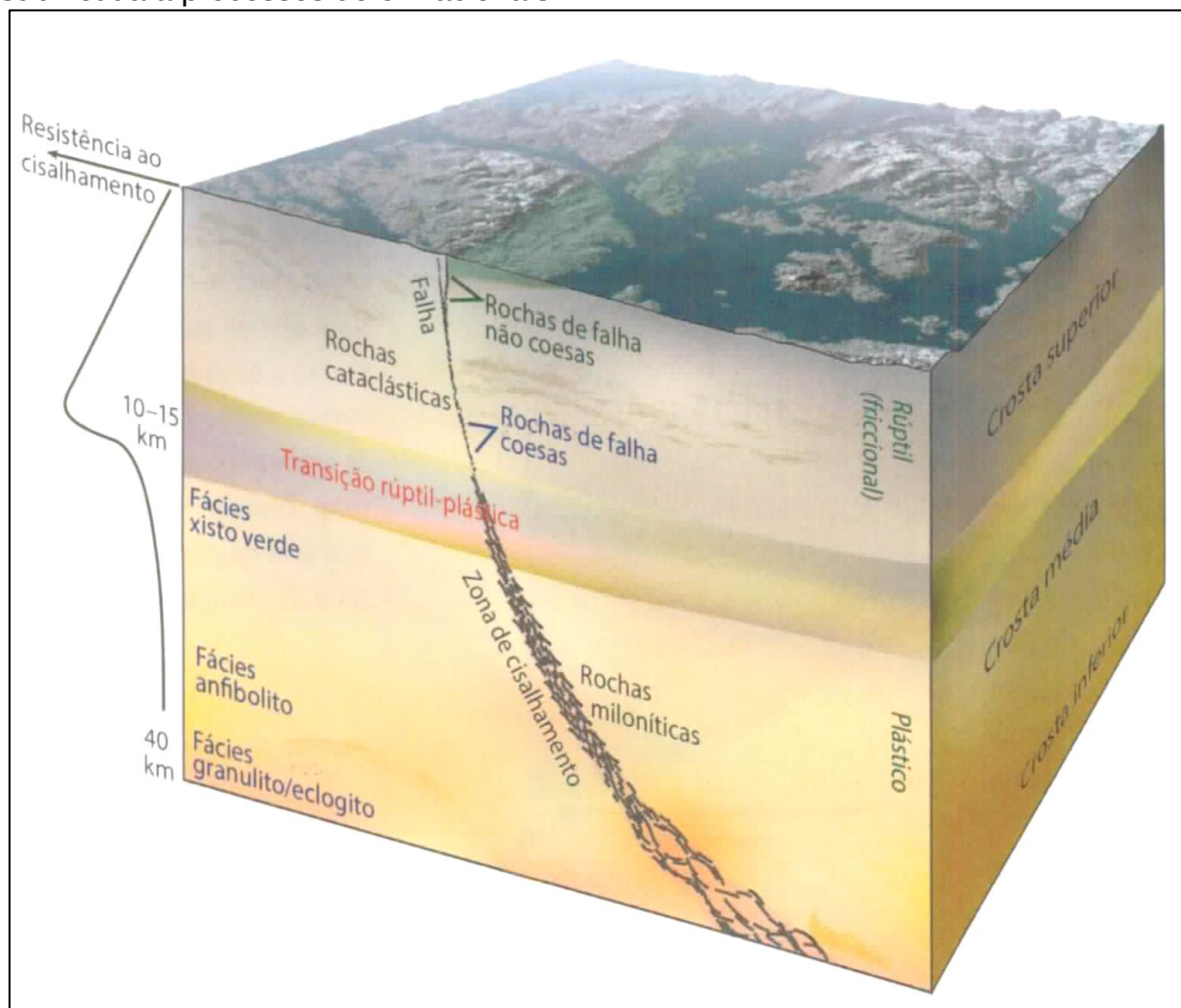
Figura 2.3.1: Gráfico Esforço (σ) x Deformação (e) para uma rocha.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Baseado no comportamento reológico da crosta, Fossen (2012) a dividiu em 3 domínios (Figura 2.3.2). O domínio rúptil ocorre na crosta superior, em profundidades de 0-10 km e o dúctil na crosta média e inferior, em níveis crustais abaixo de 15 km de profundidade. Entre 10-15 km ocorre um domínio de transição, com presença tanto de estruturas rúpteis quanto dúcteis.

Figura 2.3.2: Modelo de comportamento da crosta em seus diferentes níveis quando submetida a processos deformacionais.



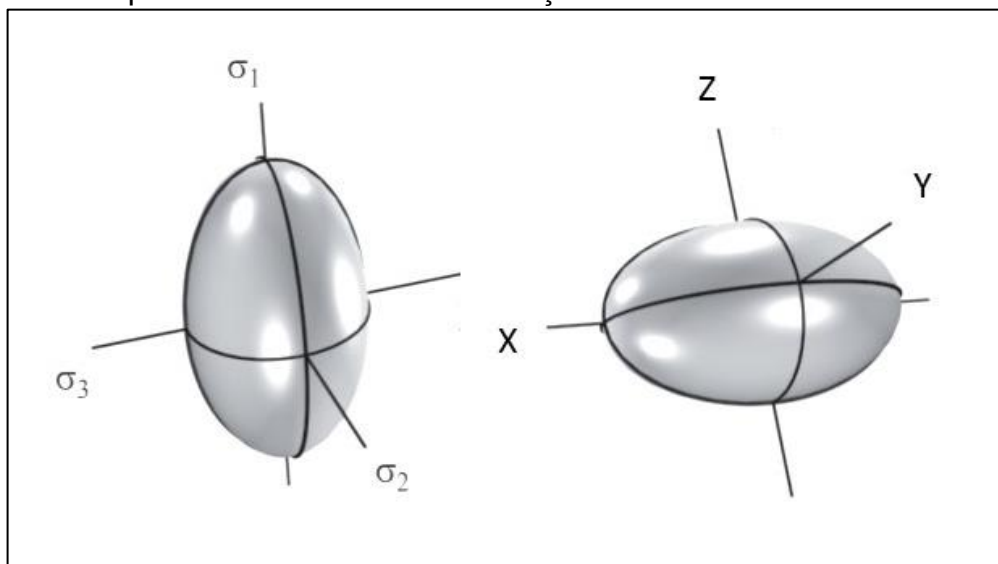
Fonte: Extraído de Fossen (2012).

Na área de estudo, as principais manifestações de atividades neotectônicas são oriundas de processos de deformação rúptil (conforme será visto mais adiante, na seção 3.4.2). Devido a isso, este tipo de deformação será mais detalhado a seguir.

2.3.1 Elipsoides de deformação e esforço

Os esforços atuantes sobre um corpo são bem descritos pelo modelo de elipsoides de deformação e de esforços. Como mostra Hasui (2012) a atuação de tensões $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ sobre um corpo inicialmente esférico irá transformá-lo em um elipsoide com eixos principais ortogonais $X > Y > Z$, chamado de elipsoide de deformação. Do mesmo modo, os esforços podem ser representados por um elipsoide de tensão, de modo que os seus eixos ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) apresentam a relação: $\sigma_1 \parallel Z$, $\sigma_2 \parallel Y$ e $\sigma_3 \parallel X$ (Figura 2.3.3).

Figura 2.3.3: Elipsoides de tensão e deformação.



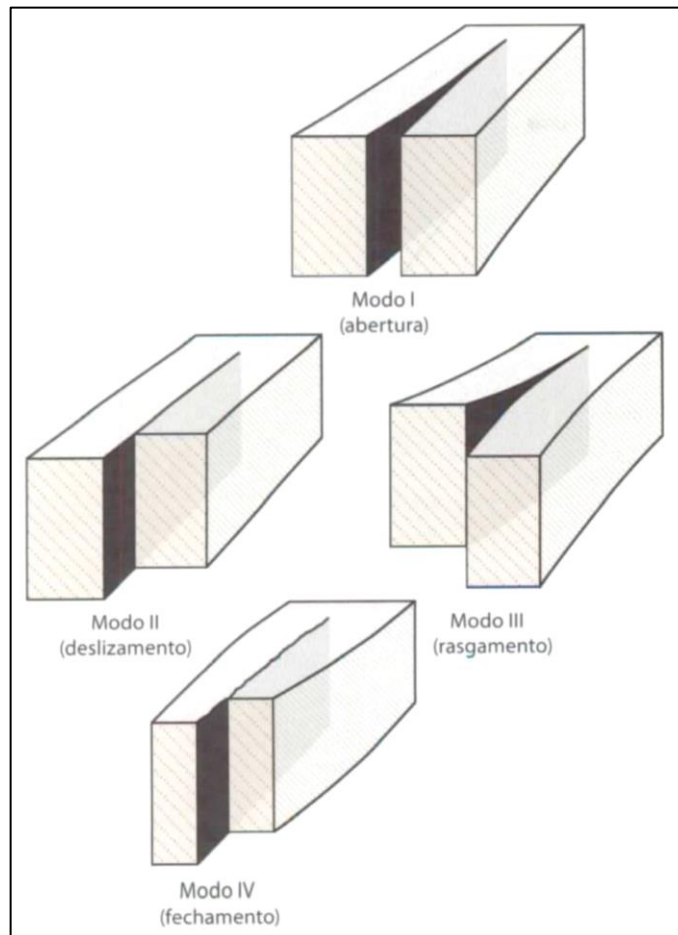
Fonte: Modificado de Hasui (2012).

2.3.2 Deformação rúptil

A deformação rúptil se desenvolve nas rochas em condições superiores aos seus limites de ruptura. Como mencionado anteriormente, estes processos deformacionais tendem a ocorrer na crosta superior, onde as condições mais baixas de temperatura e pressão conferem uma maior friabilidade ao conjunto litológico. Nessas circunstâncias, a presença de esforços diferenciais induzem a mecanismos de fluxo particulado (quando os grãos acomodam deslizamento friccional em suas bordas por translação e rotação) e/ou fluxo cataclástico (quando ocorre fluxo particulado, mas com esmagamento e faturamento dos grãos), os quais geram descontinuidades físicas e mecânicas no maciço rochoso.

As principais estruturas formadas no regime rúptil são fraturas, as quais, de maneira geral, são qualquer superfície que representa uma descontinuidade separando dois blocos rochosos adjacentes. Fossen (2012) divide as fraturas em 4 tipos, mostrados pela Figura 2.3.4:

Figura 2.3.4: Tipos de fraturas.



Fonte: Extraído de Fossen (2012).

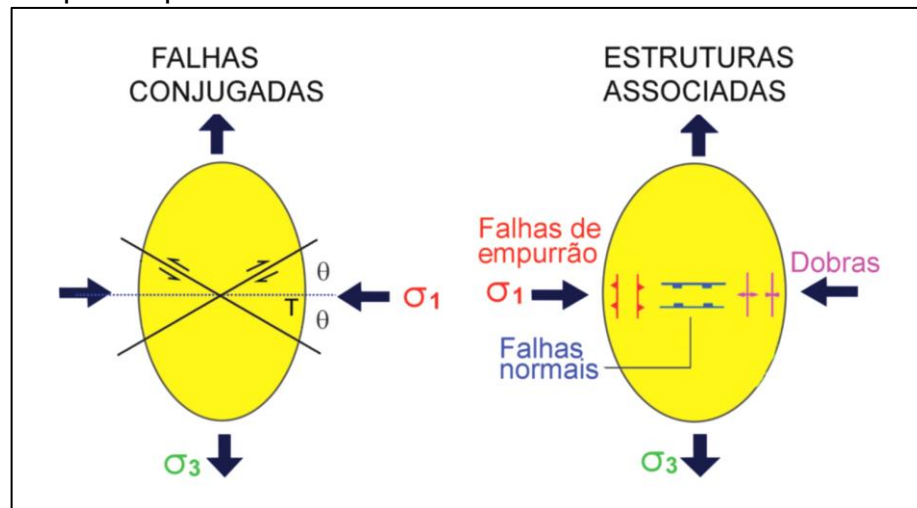
As fraturas do Modo I, também chamadas de extensionais, podem ser subdivididas em fissuras e juntas. As primeiras se referem a fraturas que apresentam deslocamento visível perpendicular ao plano, já as segundas apresentam um deslocamento imperceptível a olho nu. Os modos II e III são chamados de falhas ou fraturas cisalhantes e o Modo IV de estilólitos.

a) Deformação coaxial rúptil

Quando um corpo se apresenta submetido a processos de deformação coaxial (também chamada de cisalhamento puro), as suas linhas paralelas aos eixos principais de deformação não são rotacionadas em relação ao seu estado indeformado.

Um corpo homogêneo submetido a processos de deformação coaxial rúptil desenvolve fraturas extensionais perpendiculares a σ_3 e pares conjugados de fraturas cisalhantes simétricos a σ_1 , cuja interseção define o eixo de σ_2 e forma um ângulo θ próximo de 30° com σ_1 (Figura 2.3.5).

Figura 2.3.5: Fraturas e outras estruturas desenvolvidas em um processo de cisalhamento puro rúptil.

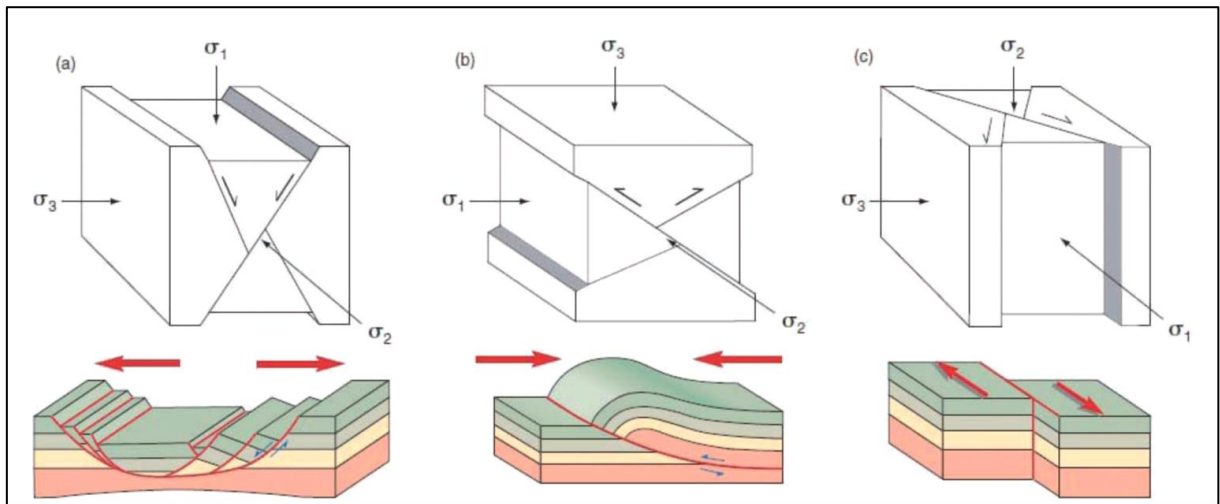


Fonte: Extraído de Hasui (2012).

Baseado na orientação dos esforços principais (σ_1 , σ_2 e σ_3), Anderson (1951) apud Fossen (2012) definiu 3 regimes de falha em função do esforço vertical (Figura 2.3.6):

- Regime de falha normal ou extensional: apresenta σ_1 como eixo vertical. Desenvolvem-se falhas com mergulhos próximos de 60° , sendo caracterizadas por movimentos verticais, onde o teto desce em relação ao piso.
- Regime de falha inversa: apresenta σ_3 como eixo vertical. Os ângulos de mergulho das discontinuidades são geralmente próximos de 30° com o plano horizontal e o teto se desloca para cima em relação ao piso da falha.
- Regime de falha transcorrente ou direcionais: seu eixo vertical corresponde a σ_2 . As discontinuidades formadas apresentam ângulos de mergulho verticais ou subverticais em relação ao plano horizontal e movimentos horizontais ao longo do plano de falha.

Figura 2.3.6: Tipos de fraturas em um regime de deformação coaxial segundo o modelo de Anderson, o qual define (a) falha normal, (b) falha inversa e (c) falha transcorrente.



Fonte: Extraído de Hasui (2012)

Hasui (2012) ressalta que a dedução dos eixos de tensão não é simples. Como foi mencionado anteriormente, em maciços homogêneos, as falhas formadas formam geralmente ângulos próximos de 30° com σ_1 e a interseção entre os pares conjugados contém o eixo de σ_2 . Porém, em maciços heterogêneos, a presença de anisotropias influencia a forma de propagação das falhas. Em especial, no caso daqueles que já apresentam descontinuidades pré-existent, a deformação tende a se acomodar ao longo das mesmas, sem criar novas descontinuidades.

b) Deformação não coaxial rúptil

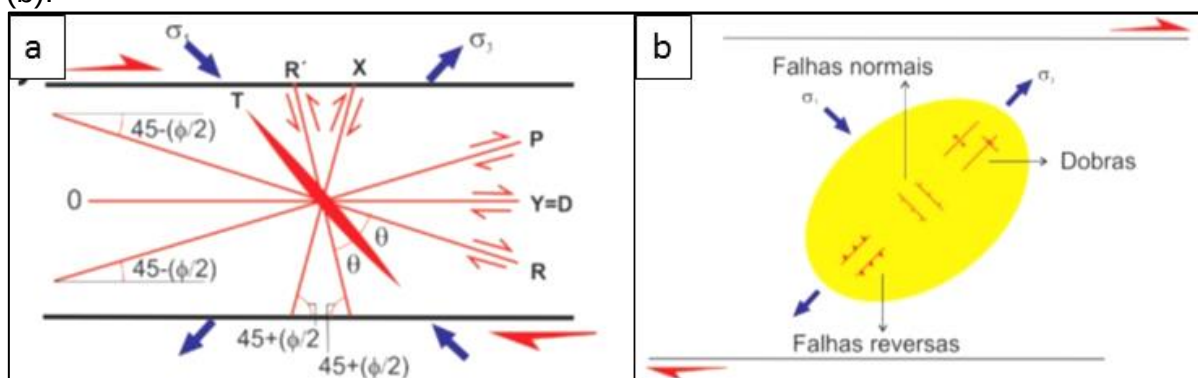
Diferentemente do cisalhamento puro, a deformação não coaxial (também chamada de cisalhamento simples) envolve a rotação de linhas paralelas aos eixos principais de deformação. Isto significa que a orientação dos eixos principais de deformação varia de acordo com a quantidade de deformação, ao passo que no cisalhamento puro esta orientação se mantém constante.

As descontinuidades formadas nesse tipo de deformação seguem o modelo de Riedel (Figura 2.3.7), que descreve o desenvolvimento das seguintes estruturas:

- Fratura R: fratura de cisalhamento de Riedel ou sintética.
- Fratura R': fratura antitética ou anti-Riedel. Apresenta movimentação contrária à do binário principal e forma um par conjugado com R.

- Fratura T: fratura extensional ou de tensão.
- Fratura P: de cisalhamento primária.
- Fratura X: de cisalhamento primária.
- Fratura Y ou D: fraturas de cisalhamento formadas paralelamente a faixa afetada.

Figura 2.3.7: Fraturas formadas em um processo de cisalhamento simples segundo o modelo de Riedel (a) e outras estruturas que podem ocorrer de maneira associada (b).



Fonte: Extraído de Hasui (2012).

O progresso da deformação provoca um adensamento de discontinuidades, bem como mudanças nos ângulos das mesmas. Inicialmente, estas definem formas losangulares e romboédricas. Porém, com o incremento deformacional, estas formas passam a adquirir progressivamente geometrias leticulares e sigmoidas (Hasui, 2012).

2.4 NEOTECTÔNICA E O MÉTODO LÓGICO SISTEMÁTICO NA ANÁLISE E INTERPREÇÃO DA REDE DE DRENAGEM E RELEVO

Segundo Stewart e Hancock (1994) apud Bandeira (2008), o estudo da neotectônica utiliza técnicas específicas (Tabela 2.4.1). De cada uma delas se extraem informações particulares de intervalos variáveis de tempo (Figura 2.4.1).

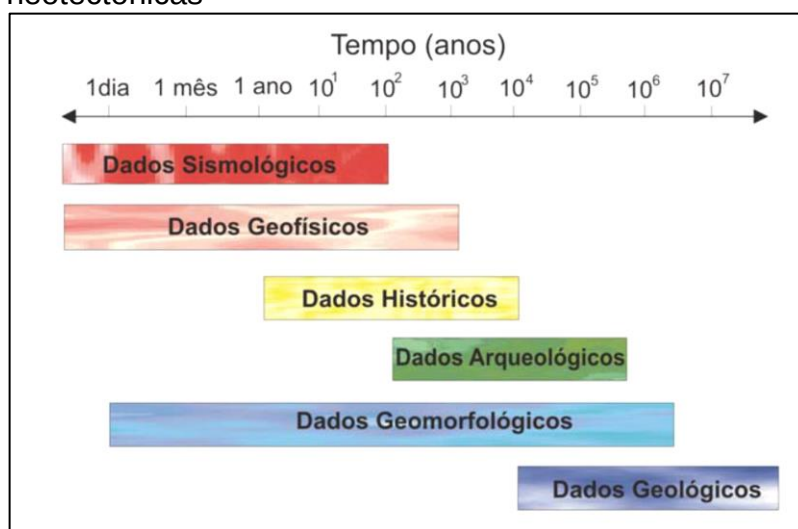
As estruturas neotectônicas mais estudadas são falhas e juntas, por ocorrerem próximas a superfície e por serem as primeiras a se formarem durante um episódio deformacional. Porém o estudo das mesmas nem sempre é tão simples, visto que o fato de elas ocorrerem em níveis crustais superficiais implica uma maior susceptibilidade a erosão (Costa, 2004).

Tabela 2.4.1: Técnicas usadas para aquisição de dados neotectônicos.

	Dados	
	Locais	Regionais
Geodésicos	Controle da inclinação por triangulação, medidores de tensão, deformação e rastejo.	GPS, interferômetros de linhas de base muito longas, rastreamento a laser via satélite.
Sismológicos	Rede de microterremotos	Rede global de dados de terremotos
Sensoriamento Remoto	Fotografias aéreas	Imagem termal, digital e de radar
Geofísicos	Eletromagnetismo	Reflexão sísmica, anomalias de gravidade
Geoquímicos	Resistividade elétrica, emissão de radônio	Monitoramento hidrológico
Históricos	Relato de testemunhas e evidencias documentais	Mapas
Arqueológicos	Registro de estruturas feitas pelo homem	Catálogos de terremotos pré-históricos
Geomorfológicos	Relevo gerado por falhas	Índices morfométricos, padrões de drenagem
Geológicos	Trincheiras	Anomalias de paleoesforço

Fonte: Stewart e Hancock (1994) apud Bandeira (2008).

Figura 2.4.1: Abrangência temporal de determinados dados usadas para investigações neotectônicas

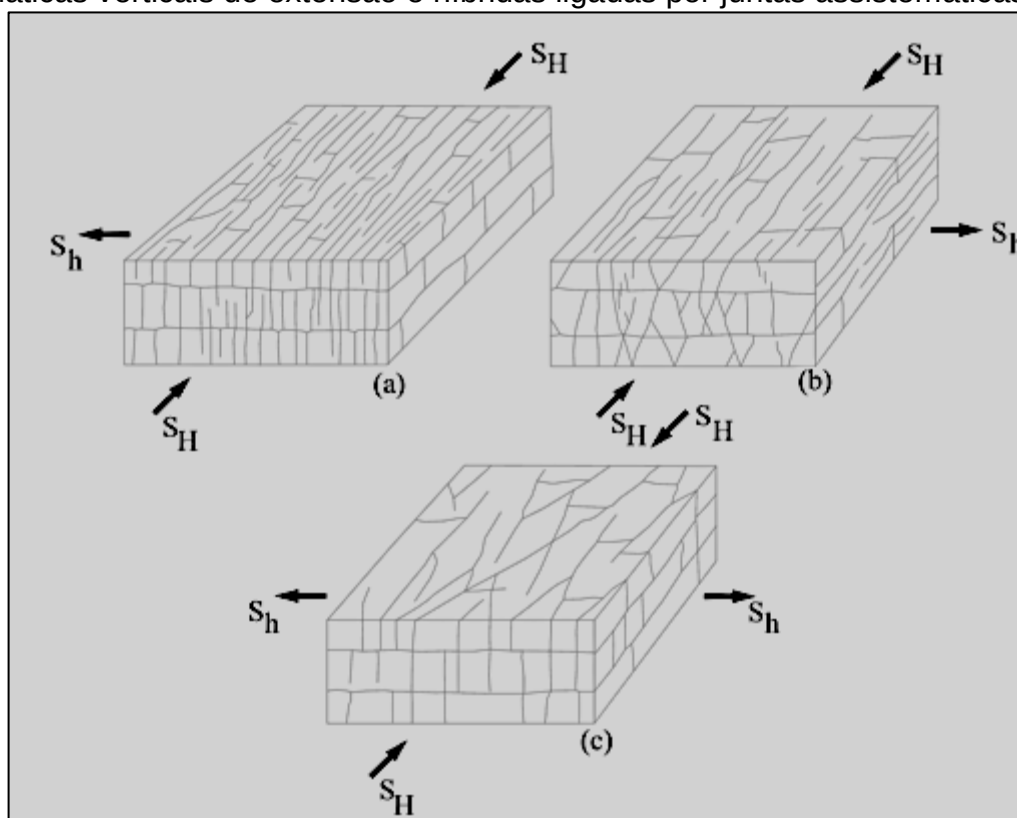


Fonte: Stewart e Hancock (1994) apud Bandeira (2008).

Uma zona de falha neotectônica é constituída por linhas descontínuas, sendo muitas delas discordantes do *trend* regional e segmentadas em duas ou mais linhas

de falha. Nessas zonas, é comum ocorrer a cominuição de rochas e lineações de estiramento, as quais, junto com o padrão regional dos segmentos de falha, fornecem indícios da cinemática do regime e da orientação dos esforços principais. Já as juntas neotectônicas ocorrem em conjuntos geometricamente simples (Figura 2.4.2) e dificilmente afetam materiais incompetentes. Tanto as juntas quanto as falhas neotectônicas cortam as rochas mais recentes de uma área (COSTA, 2004).

Figura 2.4.2: Geometria dos sistemas de juntas. (a) Juntas sistemáticas verticais de extensão ligadas por juntas assistemáticas. (b) Juntas sistemáticas verticais de extensão e íngremes híbridas ligadas por juntas assistemáticas. (c) Juntas sistemáticas verticais de extensão e híbridas ligadas por juntas assistemáticas.



Fonte: Stewart e Hancock (1994) apud Costa (2004).

Como se pode observar na Figura 2.4.1, técnicas que se utilizam de dados geomorfológicos apresentam relativamente grande abrangência temporal, sendo possível obter dados da ordem de dias a milhões de anos. Conforme exposto por Costa (2004), a geomorfologia e, especialmente, os cursos de drenagem de uma área, são muito influenciados pelas litologias e estruturas daquela região. Falhas e juntas constituem descontinuidades entre maciços rochosos sendo, portanto, zonas de fraqueza e feições propícias para o desenvolvimento de cursos d'água.

Consequentemente, as movimentações ocorridas ao longo dessas feições tendem a afetar também os cursos instalados sobre as mesmas. O relevo, apesar de manifestar as estruturas e movimentações de forma um pouco menos evidente, também se comporta de maneira similar, especialmente quando construído por materiais pouco consolidados ou rochas menos duras, como a maioria das sedimentares (que é o caso da área de estudo, como será mostrado mais adiante). Portanto, a configuração geomorfológica e da drenagem de uma área é, em parte, resultado dos seus aspectos litológicos e estruturais. Consequentemente, a análise desses aspectos pode fornecer subsídios para estudos relativos às características estruturais - incluindo neotectônicas – de uma área.

Uma das principais formas de se obter dados geomorfológicos de áreas de dimensões quilométricas consiste na análise de fotográficas áreas e imagens de satélites. No Brasil, até o início dos anos 1970, estas análises eram realizadas principalmente com base no método das chaves, que consistia em um método assistemático e comparativo, sem um conjunto definido de regras a serem seguidas. No início dessa década, M. Guy e J. P. Rival realizaram cursos que introduziram no país o método lógico sistemático. Esse método foi posteriormente sintetizado no trabalho de Soares e Fiori (1976) – do qual foram retiradas as principais informações contidas nesse tópico. Esta metodologia apresenta procedimentos fotointerpretativos de forma sistemática e lógica, sem ideias pré-concebidas, buscando se obter informações relativas as geociências.

O método lógico sistemático é constituído por uma etapa inicial de reconhecimento dos elementos da imagem (como drenagem e relevo), seguida pela análise desses elementos e, por fim, a interpretação.

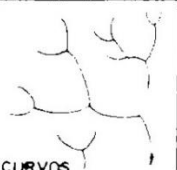
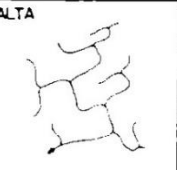
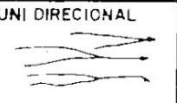
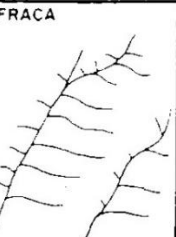
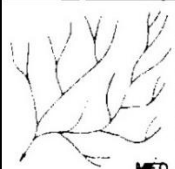
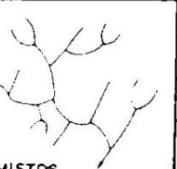
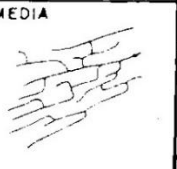
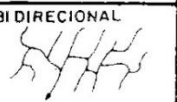
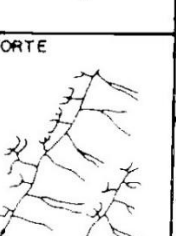
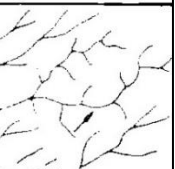
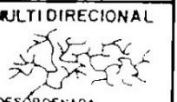
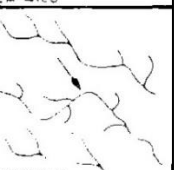
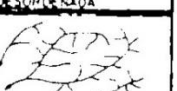
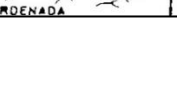
2.4.1 Drenagem

Na análise da drenagem de uma área, segundo Soares e Fiori (1976), existem 6 importantes propriedades a serem descritas (Figura 2.4.3):

- a) Densidade: é a quantidade de elementos de drenagem em uma determinada área. Uma mudança brusca na densidade de drenagem pode indicar controles estruturais ou mudanças litológicas.

- b) Sinuosidade: diz respeito ao comportamento predominantemente curvo ou retilíneo do conjunto como um todo dos elementos de drenagem. Zonas de faturamento apresentam uma configuração de drenagem mais retilínea ou com presença de arcos. Aqueles elementos mais retilíneos, quando menores que 3,5 km, são chamados de lineações de drenagem, e podem ser interpretados como traços de fratura, que correspondem a zonas de concentração de juntas, especialmente se forem bi a multidirecionais, pois as rochas se fraturam em duas ou mais direções quando submetidas a esforços. Quando maiores que 3,5 km, estes elementos devem ser interpretados como falhas (SOARES; FIORI, 1976).
- c) Angularidade: é ângulo de confluência dos elementos de drenagem, podendo ser alto (maior de 120°), médio (entre 60° e 120°) e baixo (menor que 60°).
- d) Tropia: refere-se à direção preferencial dos elementos de drenagem, podendo ser unidirecional, bidirecional, tridirecional ou multidirecional. Essa direção muitas vezes é reflexo da orientação principal das estruturas de uma área.
- e) Assimetria: é relação entre o tamanho, forma e quantidade de elementos de drenagem em ambos os lados de um elemento maior, podendo ser fraca, quando em ambos os lados os elementos são similares, a forte quando os mesmos diferem consideravelmente. Esta propriedade, principalmente os tributários estão ligados a um canal principal retilíneo ou pouco curvado, pode indicar movimentação vertical de bloco, onde o canal principal se localiza na falha, os tributários menores no bloco soerguido e os maiores no bloco abatido (BEZERRA, 2003 apud BANDEIRA, 2008).
- f) Formas anômalas: são estruturas que diferem consideravelmente das presentes nos seus arredores. Algumas anomalias associadas a falhamento são deflexões de canais em ângulos oblíquos, presença local de pequenos lagos, deslocamento de drenagem na direção montante, mudanças a jusante na sinuosidade do rio, meandros isolados, feições em S ou Z (que podem indicar movimentação, respectivamente, sinistral e destal), mudanças abruptas para feições anastomosadas, anomalias em cotovelo e em arco variações abruptas na largura da drenagem e presença de meandros isolados (BANDEIRA, 2008; COSTA, 2004).

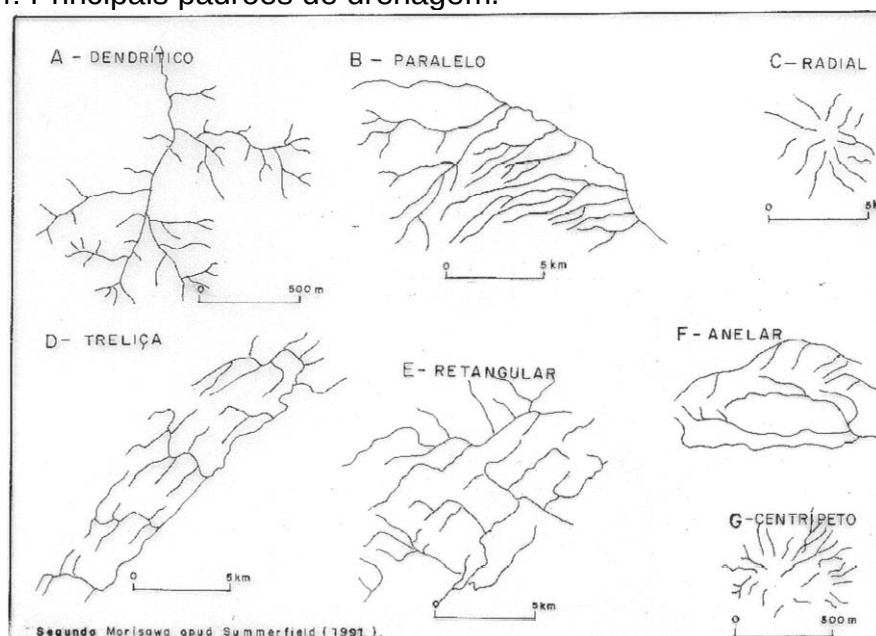
Figura 2.4.3: Propriedades a serem analisadas na rede de drenagem no método lógico sistemático.

A - DENSIDADE	B - SINUOSIDADE	C - ANGULARIDADE	D - TROPIA	E - ASSIMETRIA	F - FORMAS ANÔMALAS
 ALTA	 CURVOS	 ALTA	 UNI DIRECIONAL	 FRACA	 MEANDROS ISOLADOS
 MÉD	 MISTOS	 MÉDIA	 BI DIRECIONAL	 FORTE	 EM ARCO
 BAIXA	 RETILÍNEOS	 BAIXA	 MULTIDIRECIONAL		 COTOVELO
			 DESORDENADA		
			 ORDENADA		

Fonte: Extraído de Soares e Fiori (1976)

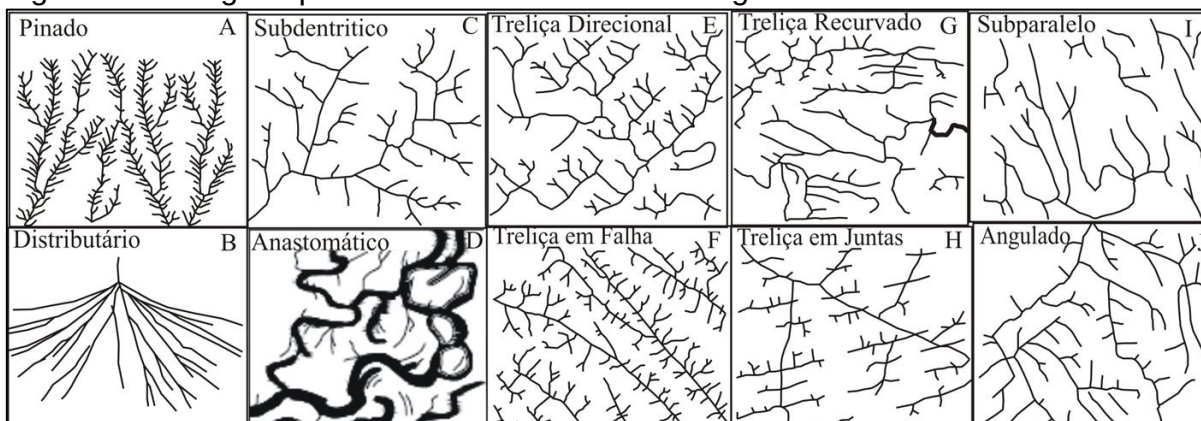
Outro aspecto importante a ser descrito é o padrão de drenagem, que diz respeito a maneira como os elementos de drenagem se dispõem. A Figura 2.4.4 mostra os principais padrões de drenagem e a Figura 2.4.5 mostra alguns padrões secundários. Conforme Christofletti (1980), os padrões que mais comumente se desenvolvem sobre áreas estruturadas e falhadas são o treliça, o paralelo e o retangular.

Figura 2.4.4: Principais padrões de drenagem.



Fonte: Extraído de Morisawa (1985) apud Lima (2002).

Figura 2.4.5: Alguns padrões secundários de drenagem



Fonte: Extraído de Howard (1967) apud Bandeira (2008).

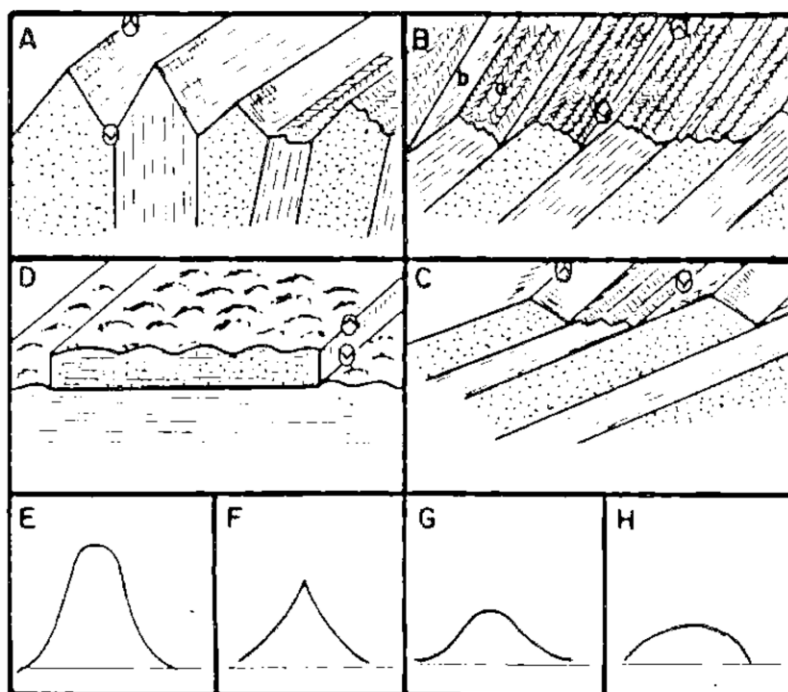
2.4.2 Relevo

Para a análise do relevo Soares e Fiori (1976) destaca algumas propriedades principais:

- Densidade: quantidade de elementos de relevo em uma determinada área. Mudanças bruscas na densidade de relevo tem implicações similares as da drenagem.
- Quebras positivas: são cristas de relevo, estruturadas com concavidade para baixo, podendo ser suaves ou agudas (Figura 2.4.6 a-d). Quando dispostas regularmente, podem ser interpretadas como as direções das escarpas das linhas de falhas.
- Quebras negativas: forma rebaixada do relevo, estruturada com concavidade para cima (Figura 2.4.6 a-d). Quando regulares, podem representar linhas de fraturas
- Assimetria: diz respeito a diferença da inclinação dos taludes em ambos os lados de uma quebra positiva. Quanto maior for essa diferença, maior a assimetria (Figura 2.4.6 a-d).
- Alinhamento de relevo: feições de relevo lineares ou levemente curvas, mais salientes e de maiores dimensões, apresentando-se em geral como um conjunto de lineações paralelas de relevo e com formas de crista simétricas. Relevo constituído por elementos muito alinhados comumente é reflexo de áreas estruturadas.

- f) Geometria das encostas: é a forma dominante das encostas em uma determinada área. As formas principais são: convexa (Figura 2.4.6 h), côncava (Figura 2.4.6 f), côncava-convexa (Figura 2.4.6 g) e côncava-retilínea-convexa (Figura 2.4.6 e).

Figura 2.4.6: Algumas propriedades do relevo a serem analisadas no método lógico sistemático. Simetria alta (A), fracamente assimétrico (B), moderadamente assimétrica (C) e fortemente assimétrica (D). Geometria da encosta côncava-retilínea-convexa (E), côncava (F), côncava-convexa (G) e convexa (H). Quebras positivas e negativas assinaladas respectivamente por “Λ” e “V” nas imagens A-D.



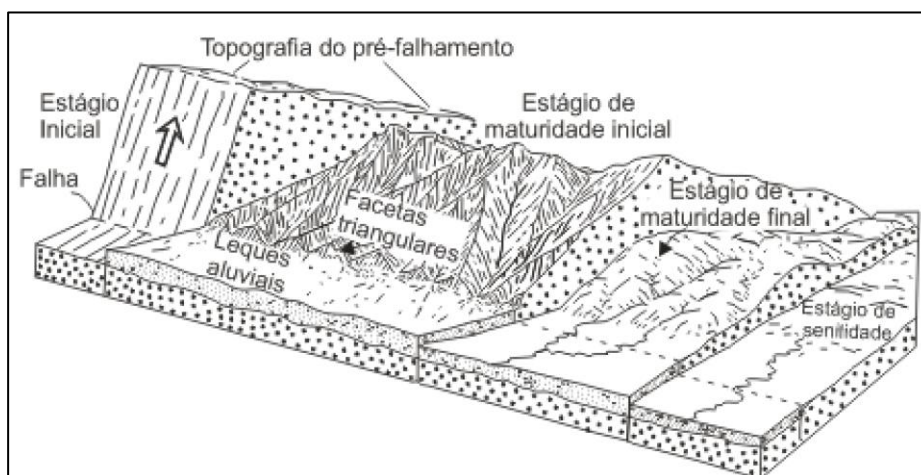
Fonte: Extraído de Soares e Fiori (1976)

Falhas normais desenvolvem no relevo feições bastante expressivas como escarpas de falhas, as quais também ocorrem associadas a falhas cavalgantes e transcorrentes, porém de forma não tão expressiva. Estas escarpas apresentam uma evolução marcada por um estágio inicial onde as mesmas são retas e com ângulos próximos de 60° , um estágio intermediário onde se desenvolve faces triangulares, e um estágio final onde ela é totalmente erodida (STEWART; HANCOCK, 1994 apud BANDEIRA, 2008) (Figura 2.4.7). Também é comum o desenvolvimento de cuestas, *grabens*, *horsts* e vales assimétricos (PALHETA, 2008).

As feições mais comuns associadas a falhas transcorrentes são deslocamento de colinas e canais, escarpas paralelas e com pequenos deslocamentos verticais, vales, truncamento de cristas, dentre outros (Figura 2.4.8) (PALHETA, 2008).

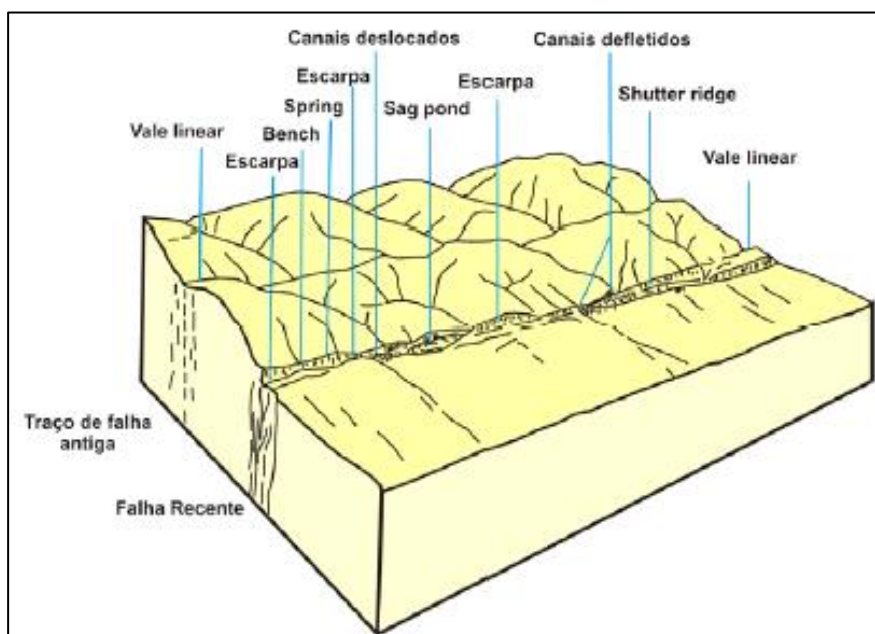
Por fim, falhas de cavalgamento desenvolvem principalmente feições de relevo onduladas, associadas a sinclinais e anticlinais sendo mais difíceis de serem detectadas através de análise geomorfológica (STEWART; HANCOCK, 1994 apud PALHETA, 2008).

Figura 2.4.7: Estágios de evolução de uma escarpa de falha normal.



Fonte: Strahler (1971) apud Bandeira (2008).

Figura 2.4.8: Feições geomorfológicas comumente associadas a transcorrência.



Fonte: Sylvester (1988) apud Palheta (2008).

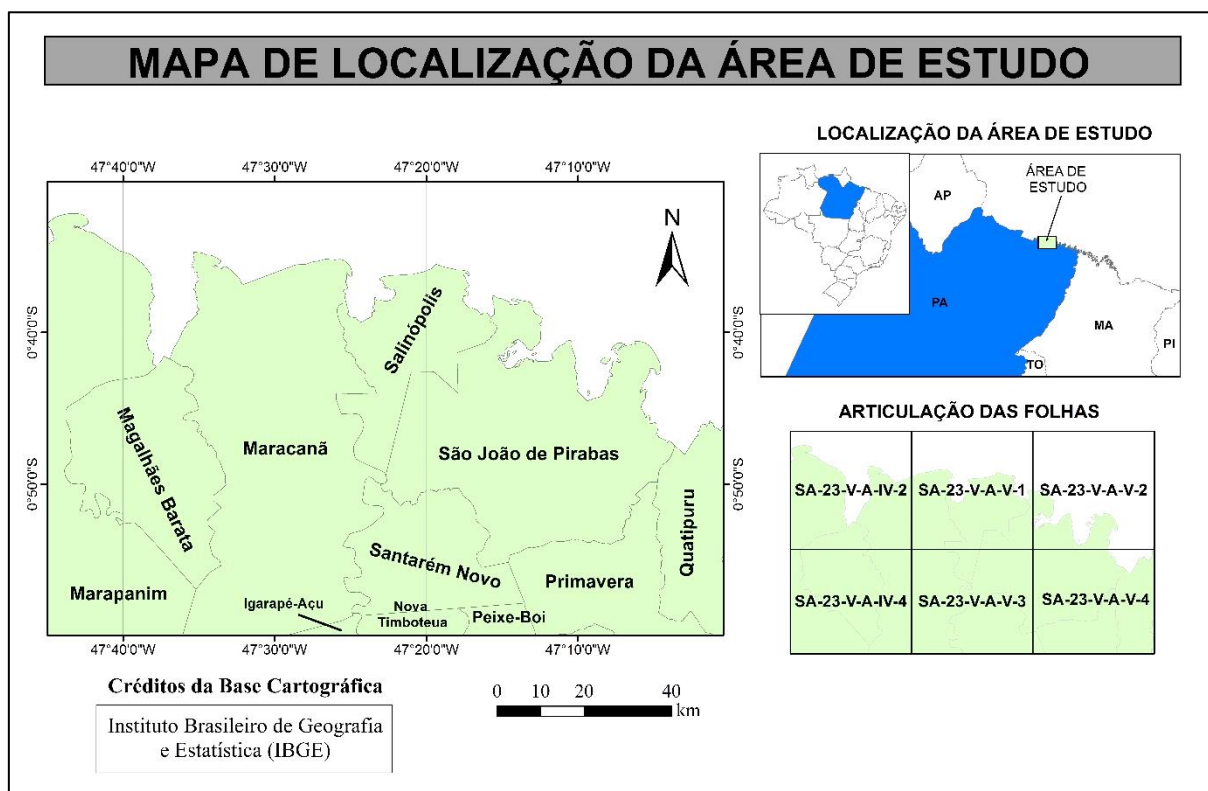
3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo se localiza na região norte do Brasil, no litoral do nordeste do Estado do Pará. É limitada pelas longitudes $47^{\circ}45' W$ e $47^{\circ} W$ e pelas latitudes $0^{\circ}30' S$ e $1^{\circ} S$, abrangendo as folhas SA-23-V-A-V (SA-23-V-A-V-1, SA-23-V-A-V-2, SA-23-V-A-V-3 e SA-23-V-A-V-4), SA-23-V-A-IV-2 e SA-23-V-A-IV-4. Encontra-se inserida no Fuso 23 da projeção UTM e apresenta uma área total de aproximadamente 4600 km² (figuras 3.1.1 e 3.1.2).

A área abrange a totalidade dos municípios de Magalhães Barata, Salinópolis, São João de Pirabas e Santarém Novo, e boa parte dos municípios de Marapanim, Maracanã, Primavera e Quatipuru, além de compreender uma pequena porção do norte de Nova Timboteua, Peixe-Boi e Igarapé Açu (figura 3.1.1 e 3.1.2).

Figura 3.1.1: Mapa de localização da área de estudo, a qual se situa no nordeste do estado do Pará e abrange totalmente ou parcialmente 11 municípios.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 3.1.2: Imagem de satélite da área de estudo vista a uma altitude de 95 km.

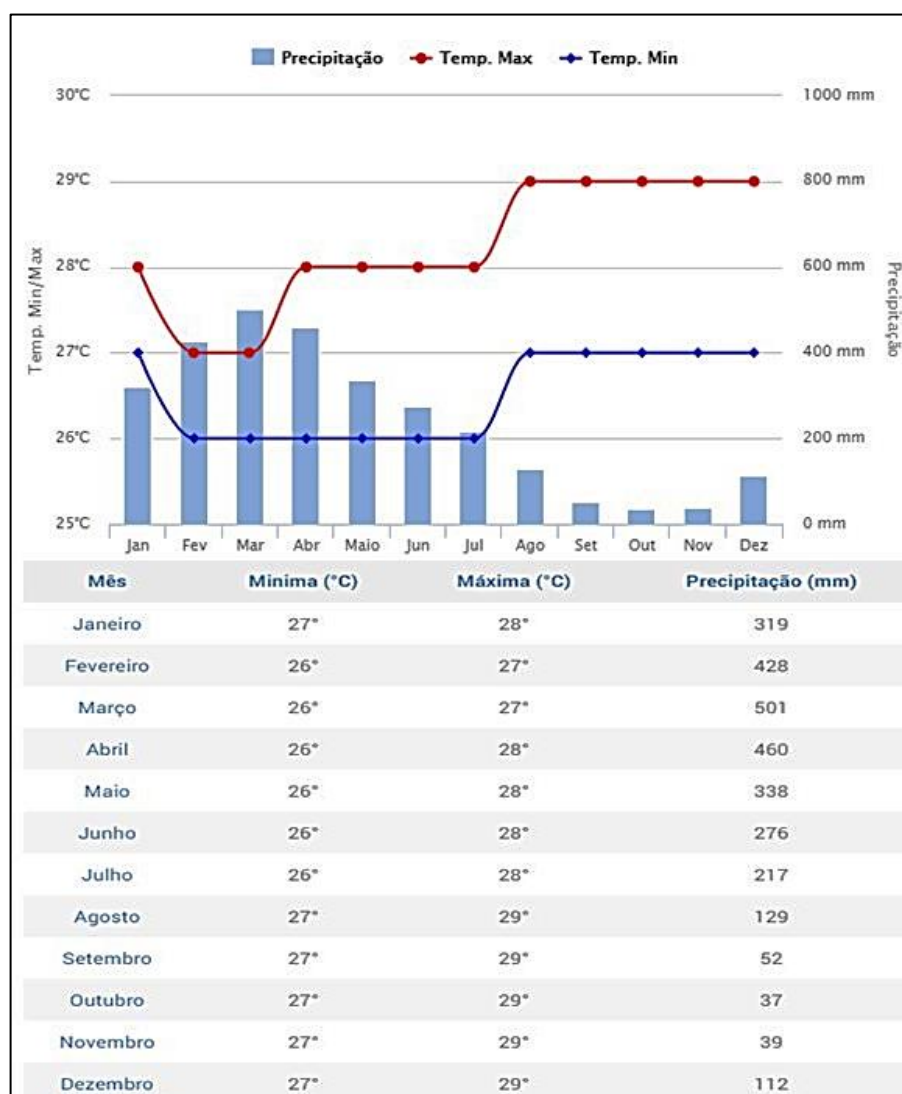


Fonte: Imagem GeoEye do Google Earth Pro.

3.2 CLIMA

O litoral do nordeste do Pará é caracterizado por um clima megatérmico, úmido, com altos volumes de chuva entre janeiro e junho (período chuvoso) e deficiência moderada de água entre julho e dezembro (período seco), acumulando uma pluviosidade média de 2500 mm/ano (EL-ROBRINI et al., 2006). A umidade varia pouco durante o ano, oscilando normalmente entre 85% a 90%. A variação de temperatura anual também é baixa, estando situada geralmente no intervalo entre 18°C e 33°C, com médias de 27°C. A Figura 3.2.1 mostra as médias anuais do comportamento da temperatura e da chuva, com base em uma série histórica de 30 anos.

Figura 3.2.1: Variação anual da precipitação e da temperatura em Salinópolis.



Fonte: CLIMATEMPO (2016).

3.3 RELEVO

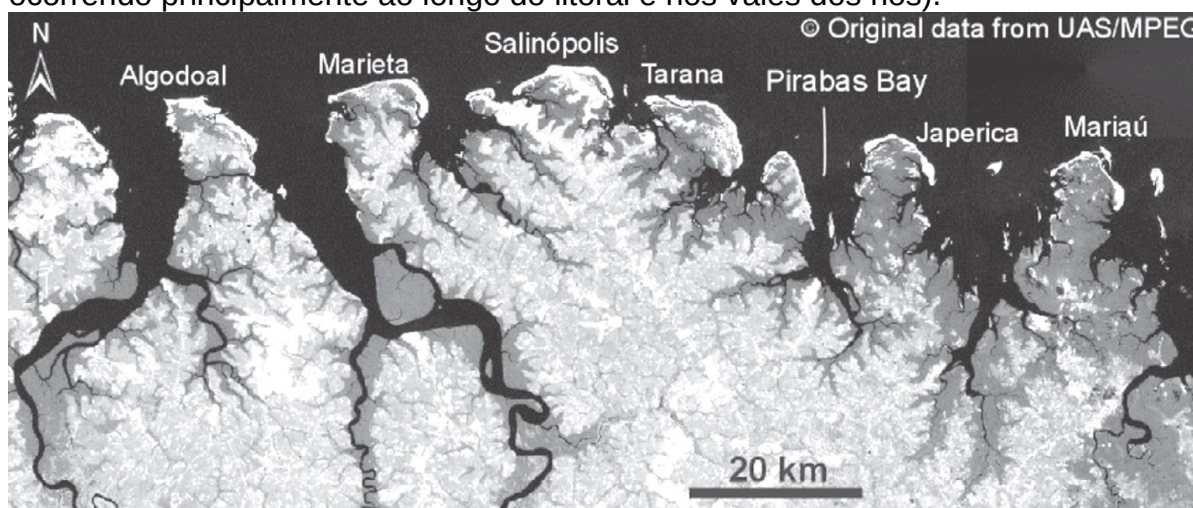
Segundo Silva et al. (1994), a área de estudo se insere em duas grandes unidades morfoestruturais, o Planalto Costeiro da Amazônia (Zona Bragantina) e Planícies Fluviomarinhas (Figura 3.3.1).

O Planalto Costeiro é constituído por um relevo rebaixado, variando de plano a ondulado, fortemente dissecado, com cotas topográficas variando de 40 a 70 m, sendo formado como resultado de processos de aplainamento e dissecação do Grupo Barreiras, o qual sustenta essa unidade.

As planícies fluviomarinhas ocorrem nas porções mais próximas da linha de costa e ao longo dos vales fluviais e são caracterizadas pela presença de reentrâncias, que teriam surgido principalmente devido afogamento de vales fluviais. Nesta unidade se encontram várzeas ou planícies fluviomarinhas, com relevos planos a suavemente ondulados, sendo sustentados por depósitos aluvionares e costeiros quaternários.

Em um trabalho envolvendo uma escala mais detalhada, Boulhosa e Souza Filho (2008) reconheceram 16 unidades geomorfológicas na Folha Salinópolis (SA-V-A-V), descritas na Tabela 3.3.1.

Figura 3.3.1: Imagem de satélite na região da área de estudo destacando as duas grandes unidades morfoestruturais presentes: o Planalto Costeiro da Amazônia (com coloração mais clara) e Planícies Fluviomarinhas (com coloração mais escura, ocorrendo principalmente ao longo do litoral e nos vales dos rios).



Fonte: Extraído de El-Robrini et al. (2006).

Tabela 3.3.1: Unidades geomorfológicas presentes na Folha Salinópolis (SA-V-A-V).

Unidade geomorfológica	Características geomorfológicas gerais
Planalto Costeiro	Composto pelo Grupo Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, correspondente ao embaçamento da Planície Costeira.
Colinas e tabuleiros	Relevo ondulado e por vezes planos com altitudes de até 64 m.
Planícies aluvial	Depósitos holocênicos influenciados por processos fluviais.
Planície de inundação vegetada – Várzea	Planície lamosa encontrada na margem dos rios, coberta por vegetação.
Planícies estuarinas e de Maré	Depósitos holocênicos influenciados diretamente pelas correntes e marés.
Planície de intermaré lamosa – Manguezal	Planície lamosa, densamente vegetada por mangue, que sofre a influência de marés, e processos estuarinos.
Planície de supramaré	Superfície areno-argilosa resultante da dissipação de dunas e erosão de falésias, com sedimentos retrabalhados e acumulados apenas durante as marés de sizígia.
Pântano salino	Depósitos areno-argilosos hipersalinos, localizados na zona de supramaré.
Barras arenosas	Barras arenosas longitudinais desenvolvidas na foz dos canais de maré e de baías.
Planície litorânea	Depósitos holocênicos que sofrem influência de ondas, ventos e marés.
Antigas cristas de praia	Corpos arenosos alongados isolados pelos processos litorâneos e que repousam sobre depósitos lamosos de manguezais.
Dunas vegetadas	Campos de dunas que foram totalmente descaracterizados e vegetados.
Dunas costeiras atuais	Dunas fixas e móveis paralelas à linha de costa.
Interdunas	Dunas fixas e móveis entre lagos.
Praias de macromaré	Estão localizadas na zona de maior energia do litoral desde o nível de baixa-mar até a linha máxima de alcance das marés (base dos campos de dunas e falésias ativas).
Lagos	Corpos hídricos associados aos campos de dunas atuais e paleodunas, estando limitados pelas mesmas.

Fonte: Extraído de Boulhosa e Filho (2008).

3.4 GEOLOGIA

3.4.1 Estratigrafia

O nordeste do Pará tem sua geologia marcada por unidades cenozoicas e quaternárias, aflorando as rochas da Formação Pirabas e Grupo Barreiras, e os sedimentos Pós-Barreiras e Modernos (Tabela 3.4.1)

Tabela 3.4.1: Coluna Litoestratigráfica das unidades presentes na região da área de estudo.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO SUMÁRIA
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO	SEDIMENTOS MODERNOS	Areias de graulação fina a média, intercaladas com argilas escuras e siltes, com restos de animais e vegetais
		PLEISTOCENO	PÓS-BARREIRAS	Sedimentos inconsolidados, areno-argilosos, finos a médios, com concreções ferruginosas.
	TERCIÁRIO	Mioceno Intermediário	GRUPO BARREIRAS	<i>FÁCIES ARGILO-ARENOSA</i> Argilo-arenosas, areno-argilosas e, restritamente arenosas limpas <i>FÁCIES ARENOSA</i> Arenitos amarelados, de granulação média, mal selecionados, com grânulos e seixos subangulosos disseminados. <i>FÁCIES CONGLOMERÁTICA</i> Conglomerados polimíticos, com matriz de areia grossa, seixos mal selecionados e pouco retrabalhados
		Mioceno Inferior	FORMAÇÃO PIRABAS	<i>ECOFÁCIES CASTELO</i> calcários duros diversificados, muito comuns na forma de coquinas, biohermitos, micritos e dolmicritos <i>ECOFÁCIES CAPANEMA</i> calcários argilosos (margas), micritos e bioclastitos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos (<i>beach rocks</i>) <i>ECOFÁCIES BAUNILHA GRANDE</i> argilas negras com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros contendo no seu interior crustáceos branquimes (carcinólitos)

Fonte: Adaptado de Costa (2004).

- Formação Pirabas

A Formação Pirabas apresenta idade eomiocênica e é conhecida como sendo um dos maiores registros marinhos do Cenozóico brasileiro, ocorrendo descontinuamente ao longo de falésias costeiras, cortes de estradas, minas a céu aberto e em subsuperfície nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, abrangendo os estados do Pará, Maranhão e Piauí (TÁVORA et al., 2010).

Historicamente, as pesquisas realizadas por Maury na região e suas publicações foram fundamentais para o reconhecimento da Formação Pirabas e serviram de base para pesquisas geológicas e paleontológicas seguintes. Em 1925,

Maury denominou a formação como Formação Pirabas, e através do reconhecimento do gastrópode *Orthaulax pugnax* na fácies Castelo, ela foi capaz de correlacionar o paleoambiente desta região com outros já identificados em algumas formações da América do Norte (TÁVORA et al., 2002).

No contexto geológico, a acumulação desta unidade ocorreu sob condições de forte controle tectônico e desenvolvimento de vales incisos que estão conectados ao longo das zonas de falhas, sendo elas, normais NW-SE inclinadas para NE e transcorrentes NE-SW, as quais agem como zonas de transferência (COSTA et al., 1996). A sedimentação inclui os depósitos marinhos carbonáticos com presença de terrígenos da Formação Pirabas. Estes depósitos gradualmente mudam para uma associação de sequências regressivas de natureza siliciclástica da Formação Barreiras, indicando forte soerguimento da borda da bacia e cessante deposição carbonática (ROSSETTI; GÓES, 2004; TÁVORA et al., 2010).

A respeito da constituição, na Formação Pirabas são encontrados biocalcirruditos, margas, folhelhos negros e verdes, biohermitos, calcilutitos e calcarenitos maciços ou com estratificações (paralelas ou cruzadas). Ferreira (1982) reconheceu três fácies:

- 1) Fácies Castelo: calcários na forma coquinas, micritos, biohermitos e dolmicritos.
- 2) Fácies Baunilha Grande: argilitos negros com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros possuindo fragmentos de crustáceos.
- 3) Fácies Capanema: calcários argilosos, micritos, biomicritos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos.

Essas fácies são marcadas pelo rico conteúdo fossilífero e as suas disposições atribuem a esta unidade uma origem em um ambiente marinho aberto, com águas rasas, quentes e agitadas, com presença de lagunas, estuários e, mais localizadamente, mangues (GÓES et al., 1990).

- Grupo Barreiras

O Grupo Barreiras é um conjunto sedimentar formado por depósitos siliciclásticos de cores variegadas, que se apresenta interdigitado com os depósitos carbonáticos da Formação Pirabas. Esta unidade se distribui por uma estreita faixa da zona litorânea brasileira, se estendendo do Amapá ao Rio de Janeiro. Os registros miocênicos mais extensos se encontram principalmente nos estados do Pará e do Maranhão. Esses depósitos são bem expostos no norte da Bacia de São Luís, na porção leste do Sistema de *Graben* do Marajó no centro-leste da sub-bacia de Cametá, Bacia de Bragança-Vizeu e nas Plataformas Bragantina e do Pará (ROSSETTI, 2006).

Durante muito tempo acreditou-se que esta unidade Barreiras tinha idade pliocênica/pleistocênica, devido a correlação com outros depósitos no nordeste do Brasil. Porém, estudos palinológicos posteriores mostraram que ela pertence ao Mioceno Médio. Estes estudos também mostraram a influência marinha na deposição dos litotipos da Formação Barreiras, o que levou a sugestão de que esta se encontra interdigitada com a Formação Pirabas (ROSSETTI, 2006).

A respeito da sua composição, encontram-se sedimentos continentais conglomeráticos, argilosos e arenosos, de coloração alaranjada com níveis de arenito ferruginoso estratificado, pouco consolidado e com microfraturas e microfalhas (MATTA, 2002). A origem dos depósitos Grupo da Barreira está ligada a influência de variados ambientes litorâneos dominados por correntes de maré na formação destes depósitos (ROSSETTI; GÓES, 2004).

- Pós-Barreiras

Os sedimentos Pós-Barreiras ocorrem sobrepostos ao Grupo Barreiras, com o qual formam uma superfície erosiva. São constituídos por sedimentos de coloração amarelada, inconsolidados e facilmente desagregados, de composição predominantemente quartzosa, com granulação areno-argilosa, havendo ocorrência local de seixos e blocos de arenito ferruginoso (FARIAS et al., 1992 apud COSTA, 2004). Sua origem deposicional é atribuída a movimentos gravitacionais com atuação secundária de dunas eólicas (ROSSETTI et al., 1990 apud COSTA, 2004).

- Sedimentos Modernos

Os Sedimentos Modernos constituem depósitos fluviomarinhos inconsolidados presentes ao longo das planícies fluviais e costeiras, sendo formados por areias, siltes e argilas com restos de vegetais e de animais. Sua origem é ligada a erosão principalmente do Grupo Barreiras e sedimentos Pós-Barreiras, os quais são as unidades com maiores exposições na área de estudo.

3.4.2 Neotectônica

O principal artigo abordando os aspectos neotectônicos na região é o de Costa et al. (1996), os quais fizeram uma síntese do arcabouço neotectônico de toda a Região Amazônica.

Para o nordeste do Pará, segundo os autores, estruturas terciárias dividem a região em dois compartimentos com regimes diferentes, um com características transpressivas e outro de comportamento transtensivo (Figura 3.4.1).

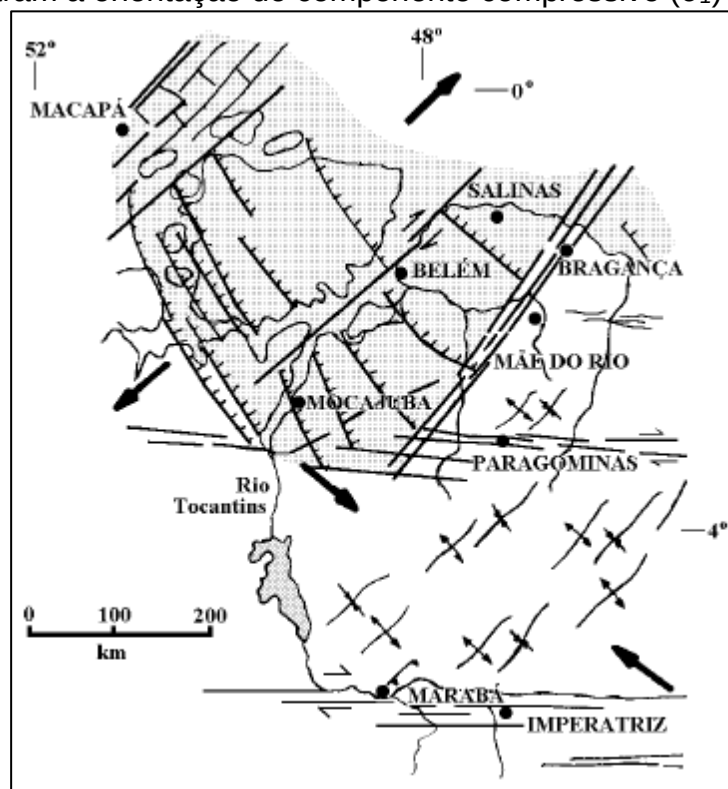
O primeiro compartimento se localiza entre os municípios de Marabá e Paragominas, no Pará, e se estende até o oeste do Estado do Maranhão. Sua parte interna é caracterizada pela presença de dobras cujos eixos possuem orientação NE-SW, apresentando dimensões métricas a quilométricas. Este compartimento é limitado a norte e a sul por feixes de falhas dextrais com direção E-W. O feixe norte exerce um forte controle nas drenagens de primeira e segunda ordem, apresentando 560 km de comprimento e incluindo, ao longo de sua extensão, estruturas transpressivas e transtensivas. O feixe sul é menor, com 350 km de extensão, e impõe anomalias nos rios Araguaia e Tocantins, além de controlar o baixo curso do Rio Itacaiúnas.

O segundo compartimento, onde se localiza a área de estudo deste trabalho, abrange a ilha do Marajó e o extremo nordeste do Pará. Este setor é caracterizado pela presença de falhas normais com perfis lítricos e planares, estando orientadas segundo NW-SE com mergulhos para NE. Também ocorrem falhas de transferência com orientação NE-SW. Estas estruturas definem uma bacia terciária alongada na

direção NW-SE, cujo o preenchimento sedimentar ocorreu seguindo esta mesma direção e originou os depósitos da Formação Pirabas e Grupo Barreiras (Figura 3.4.1).

Segundo os mesmos autores, no Quaternário as falhas normais foram reativadas, mantendo seus aspectos distensivos, e suas presenças não são simples de reconhecer em atividades de campo.

Figura 3.4.1 - Estruturas do Terciário Superior no nordeste do Pará. Área sombreada corresponde a bacia terciária onde se depositaram as unidades Pirabas e Barreiras. Setas divergentes mostram a orientação do componente distensivo (σ_3) e as convergentes mostram a orientação do componente compressivo (σ_1)

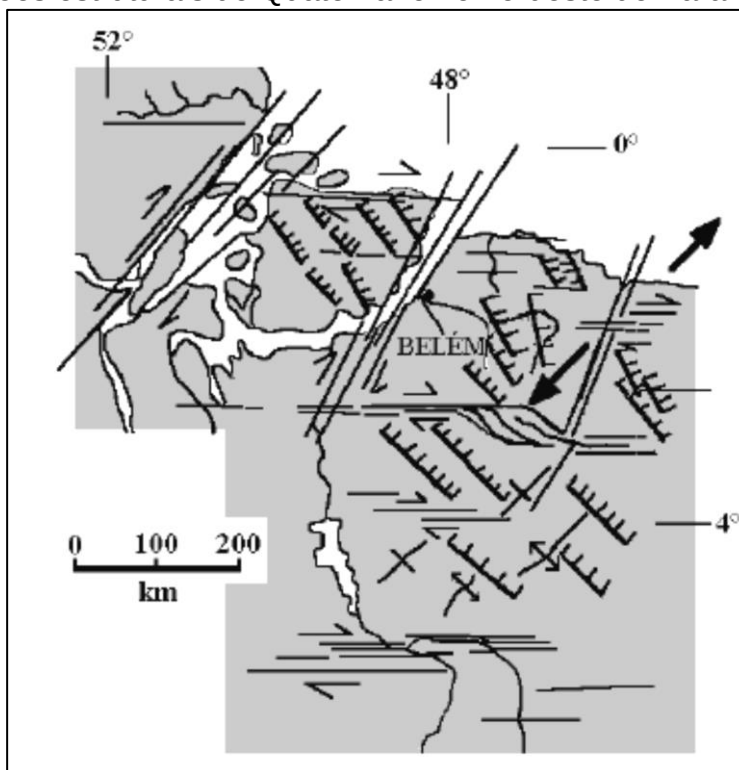


Fonte: Extraído de Costa et al. (1996).

Ainda de acordo com Costa et al. (1996), o quadro estrutural do Quaternário (Figura 3.4.2), é caracterizado por falhas transcorrentes dextrais em E-W interligadas por falhas normais segundo N-S, NW-SE e NNW-SSE. Tais estruturas afetaram as formações Ipixuna, Pirabas e o Grupo Barreiras, e definem bacias de afastamento transtensivas, com geometria aproximadamente romboédrica e de dimensões variadas. Os deslocamentos horizontais associado a estas feições de transcorrência foram responsáveis pelo surgimento de áreas transtensivas e transpressivas alternadas. Os deslocamentos verticais foram responsáveis pelas exposições isoladas da Formação Pirabas, pelo basculamento da Ilha do Marajó, pela deposição

de sequências quaternárias de terraços fluviais, pelo controle da dissecação do relevo colinoso e pelas anomalias na rede de drenagem, como arcos, cotovelos e meandros isolados.

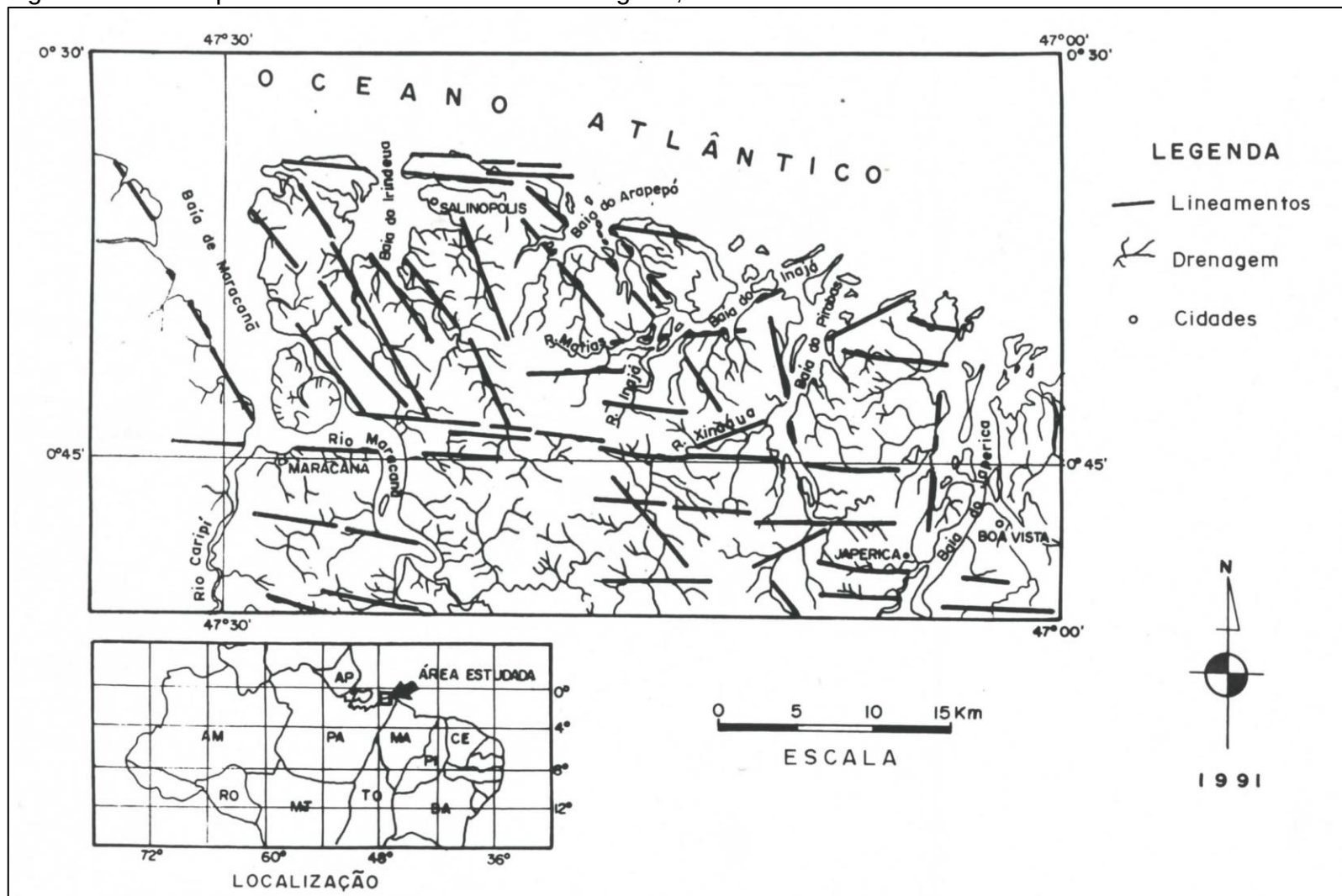
Figura 3.4.2 - Feições estruturais do Quaternário no nordeste do Pará.



Fonte: Extraído de Costa et al. (1996).

Em um trabalho abrangendo parte da área de estudo, na região de Salgado (litoral do NE do Pará), Costa et al. (1991), através da análise do padrão de drenagem e atividades de campo, reconheceram falhas normais voltadas para NW-SE e transcorrências orientadas nas direções NNE-SSW, NE-SW e WNW-ENE (Figura 3.4.3). Estas estruturas deslocam e seccionam as unidades Pirabas e Barreiras e foram interpretadas pelos autores como assinaturas de movimentações dextrais interiores na Placa Sul-Americana. Eles também destacam que estes movimentos tectônicos são refletidos na configuração atual da rede de drenagem da região e exercem influência em processos de sedimentação e erosão.

Figura 3.4.3 – Mapa morfoestrutural da área de Salgado, NE do Pará.



Fonte: Extraído de Costa et al. (1991).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA

Esta etapa ocorreu ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho, onde se buscou informações relativas às características fisiográficas e geológicas da área de pesquisa, bem como estudos que já tenham abordado questões relacionadas a neotectônica e hidrogeologia na região ou nas proximidades. Também foi realizada no intuito de obter conhecimento dos conceitos essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, além de metodologias que possam ser utilizadas ou adaptadas para o mesmo.

4.2 MAPAS DE DRENAGEM

Os mapas de drenagem foram gerados a partir de dados da rede de drenagem em formato *shapefile* em escala 1:250.000, disponibilizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) no endereço eletrônico <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapeamento_sistematico/>.

Estes dados foram refinados utilizando o *software Arc Map* versão 10.2, onde se usou imagens GeoEye disponíveis no *Google Earth Pro* e anaglifos georreferenciados elaborados segundo o método proposto por Centeno e Silva Jr. (2015), que consiste na obtenção de imagens de terreno disponíveis no *software Google Earth Pro*, com posterior processamento das mesmas no programa *software Zoner Photo Studio* para a geração de imagens estereoscópicas.

4.3 MAPAS DE RELEVO

Os mapas de relevo foram gerados através de imagens de Modelo Digital de Elevação com resolução espacial de 30 metros obtidas pela missão *Shuttle Radar Topography Mission*, estando disponíveis no endereço eletrônico <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>>.

Estas imagens foram processadas no *software Global Mapper* v14.0, onde se utilizou a ferramenta *3D Path Profile/Line of Sight Tool* para a obtenção das seções.

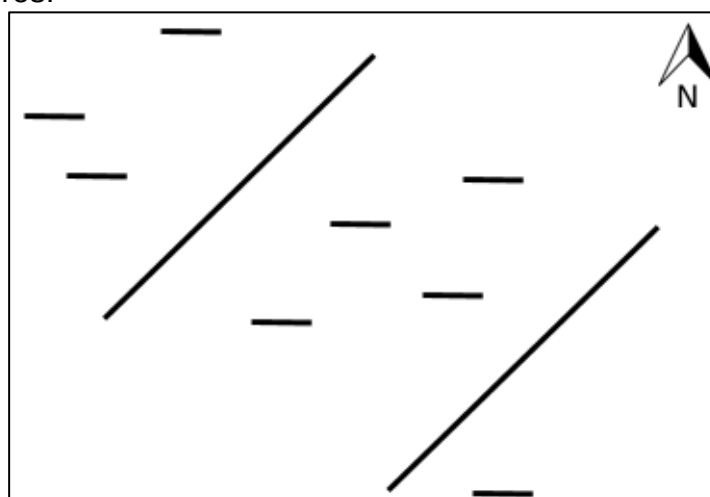
Neste mesmo programa, foram utilizadas as opções *Color Ramp Shader* e *Gradient Shader* para gerar as imagens altimétricas colorida e em preto e branco, com as quais se elaborou, respectivamente, os mapas altimétricos colorido e preto e branco de relevo no *software Arc Map* versão 10.2. O motivo de se ter elaborado dois mapas diferentes refere-se ao fato de o relevo ser realçado de forma mais evidente no primeiro, e a drenagem no segundo.

4.4 ALINHAMENTOS DE DRENAGEM E RELEVO

Ambos os alinhamentos de drenagem e relevo foram traçados utilizando o programa *Arc Map* versão 10.2, sendo os primeiros gerados a partir do *shapefile* da rede de drenagem refinada e os segundos a partir do Modelo Digital de Elevação. Neste *software*, foram obtidas as direções (utilizando a ferramenta *COGO*) e os tamanhos de cada alinhamento. Estes dados foram exportados para um arquivo em formato *txt*, o qual foi utilizado no programa *OpenStereo* para a geração de rosáceas.

Na elaboração das rosáceas, foi levado em consideração não apenas a direção dos alinhamentos, como também o tamanho de cada um. As implicações disso são mostradas em um exemplo simples exibido na Figura 4.1, onde se tem 2 alinhamentos na direção 45°NE e 8 na direção E-W. Cada alinhamento para NE apresenta um tamanho 6 vezes maior que cada um dos voltados para E-W.

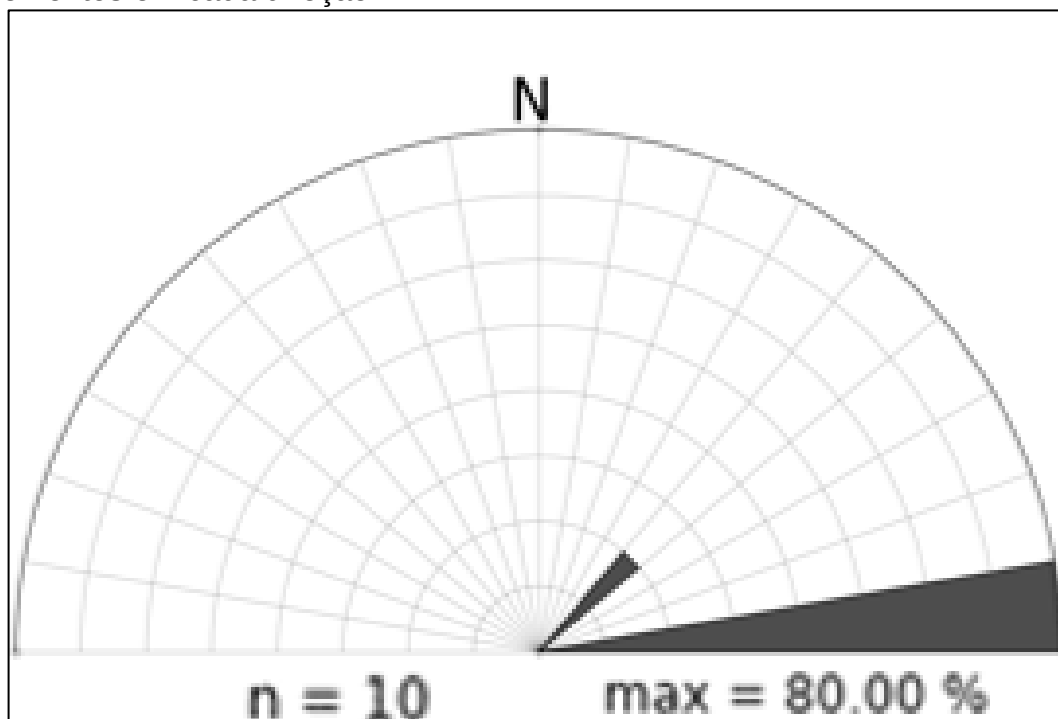
Figura 4.41: Situação hipotética de uma área onde se encontram 8 alinhamentos na direção E-W e 2 na direção NE, sendo cada um destes últimos 6 vezes maior que cada um dos primeiros.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Normalmente, na maioria dos trabalhos, as rosáceas são elaboradas levando-se em consideração apenas a frequência alinhamentos em uma determinada direção. Deste modo, usando o exemplo da Figura 4.1, a rosácea mostraria uma tendência de 80% dos alinhamentos para E-W e 20% para NE (Figura 4.2).

Figura 4.42: Rosácea de alinhamentos levando em consideração apenas a quantidade de elementos em cada direção.



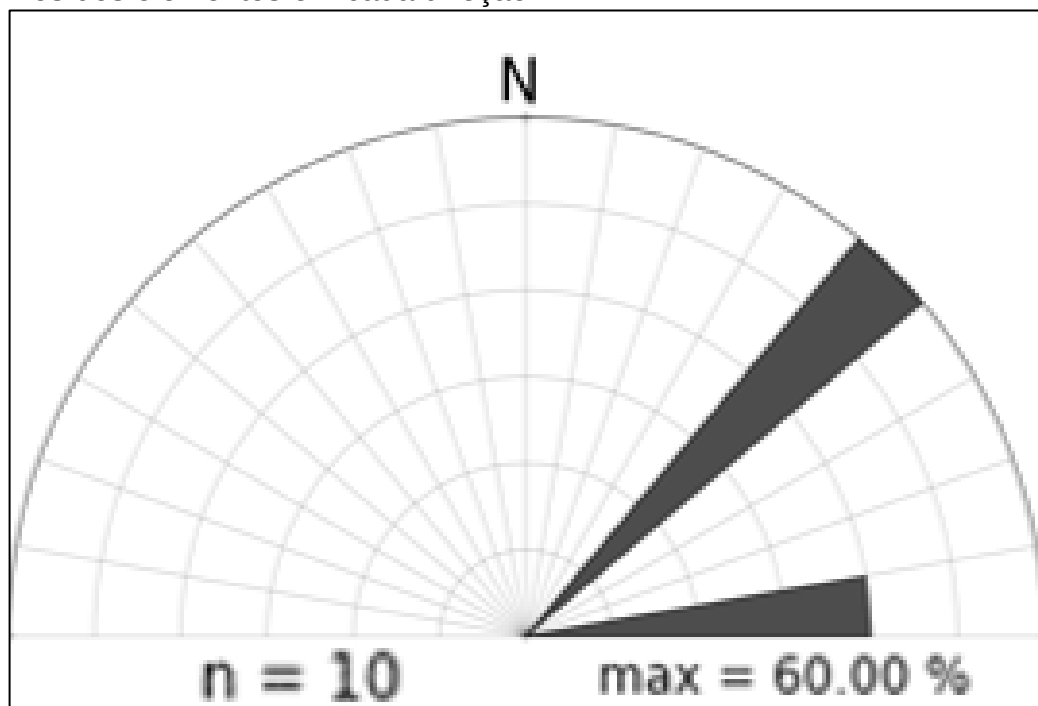
Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma outra forma de elaborar as rosáceas leva em consideração não apenas a direção, mas também o tamanho de cada alinhamento. Neste caso, a frequência em cada direção seria dada pela fórmula $[(\sum s_y / \sum s) \times 100]$, onde $\sum s_y$ é a somatória dos tamanhos dos lineamentos em uma direção y e $\sum s$ é a somatória dos tamanhos dos lineamentos em todas as direções. Assim, a frequência na direção NE seria $[(6+6)/(6+6+1+1+1+1+1+1)] \times 100 = 60\%$. Para a direção E-W, seria $[(1+1+1+1+1+1)/(6+6+1+1+1+1+1+1)] \times 100 = 40\%$ (Figura 4.3).

Neste trabalho, foi utilizado apenas este segundo método para a geração das rosáceas, por apresentar maior validade estatística em relação ao primeiro, visto é levado em consideração uma variável extra (comprimento) além da direção, de forma

os *trends* de um determinado aspecto da área são apresentados de forma mais precisa, fornecendo interpretações mais representativas.

Figura 4.43: Rosáceas de alinhamentos levando em consideração a somatória dos tamanhos dos elementos em cada direção.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5 ANÁLISE E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Todos os dados foram inseridos em um ambiente SIG para facilitar a análise de forma integrada dos mesmos. As análises e interpretações foram feitas tomando como base os trabalhos de Stewart e Hancock (1994), Soares e Fiori (1976), Christofolletti (1980), Costa (2004), Bandeira (2008) e Palheta (2008).

5 RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DA REDE DE DRENAGEM

A rede de drenagem da área de estudo apresenta características que variam ao longo da mesma. Assim, baseado na variação de suas propriedades, esta foi dividida em 7 Zonas Homólogas (ZHs) (Figura 5.1.1). Porém, ao longo da região se observam algumas generalidades, como a presença de variados tipos de formas anômalas - destacando-se principalmente formas em Z e S, meandros isolados, dobras em cotovelo e formas arqueadas – e a ocorrência predominante de padrões treliça e retangular. Também vale destacar que, apesar de variarem ao longo das ZHs, as orientações gerais dos alinhamentos de drenagem ocorrem segundo 4 direções preferenciais: E-W, N30°-50°W, N-S e N20°-40°E (Figura 5.1.2 b).

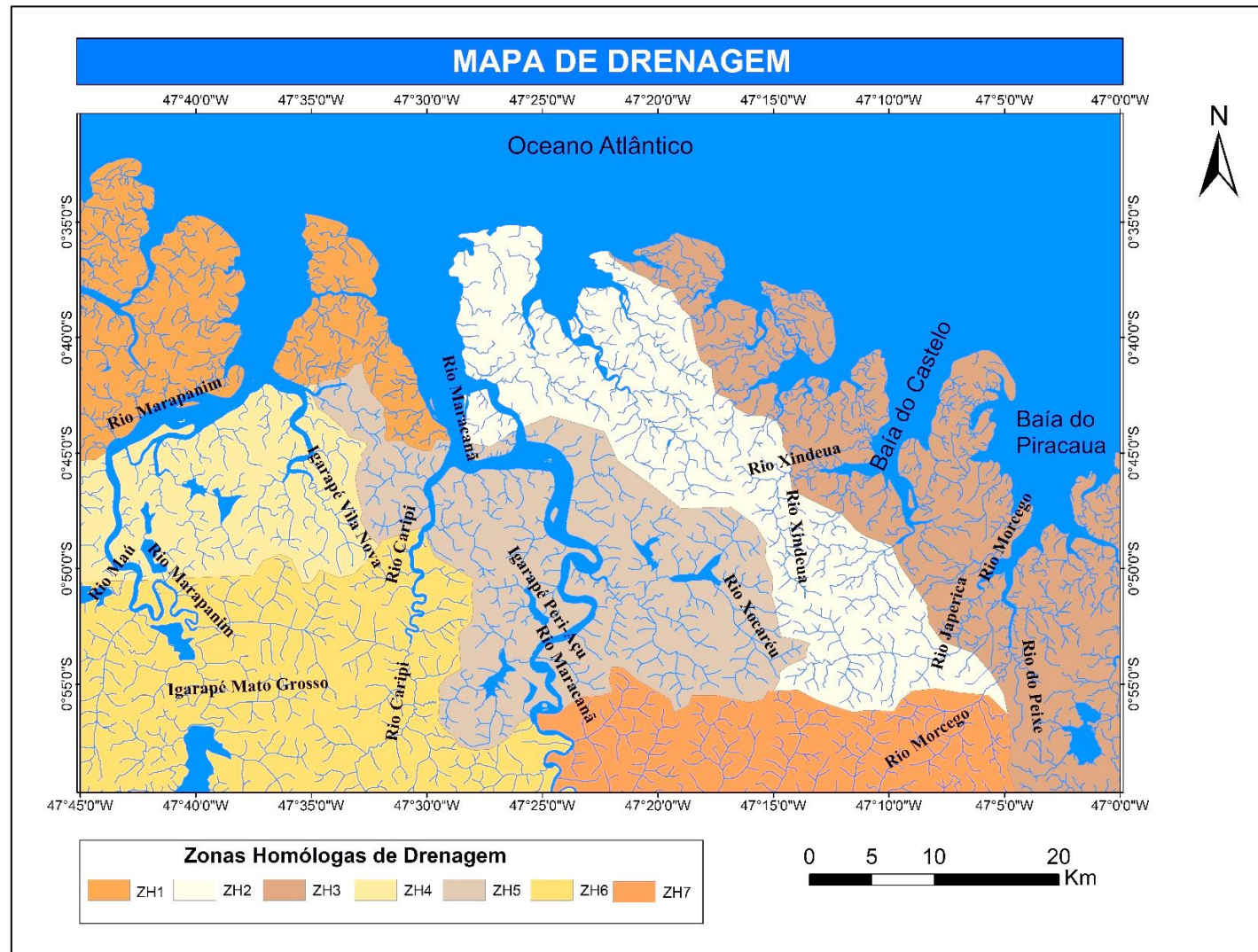
- **Zona Homóloga 1**

A ZH1 se localiza no noroeste da área, estando limitada a norte pelo Oceano Atlântico, a leste pelo Rio Maracanã (e sua baía) e a sul pelo Rio Marapanim. Este último sofre uma deflexão de aproximadamente 60° para norte (Figura 5.1.3), desaguando no oceano e constituindo a feição mais expressiva desta ZH.

Por se encontrar em uma área costeira, com baixas altitudes e relativamente plana, esta ZH se apresenta muito susceptível a processos relacionados a oscilação dos níveis das marés. Com isso, desenvolve-se uma rede de drenagem particularmente mais densa em relação ao restante da área. Ainda assim, nota-se um padrão variando de treliça direcional a retangular, com os elementos de drenagem apresentando orientação preferencial N10°-20°W, ocorrendo também de maneira considerável E-W, N60°-70°W, N-S e N60°-70°E (Figura 5.1.2 c). A angularidade é predominantemente média, a sinuosidade é baixa e a assimetria é média (Figura 5.1.3),

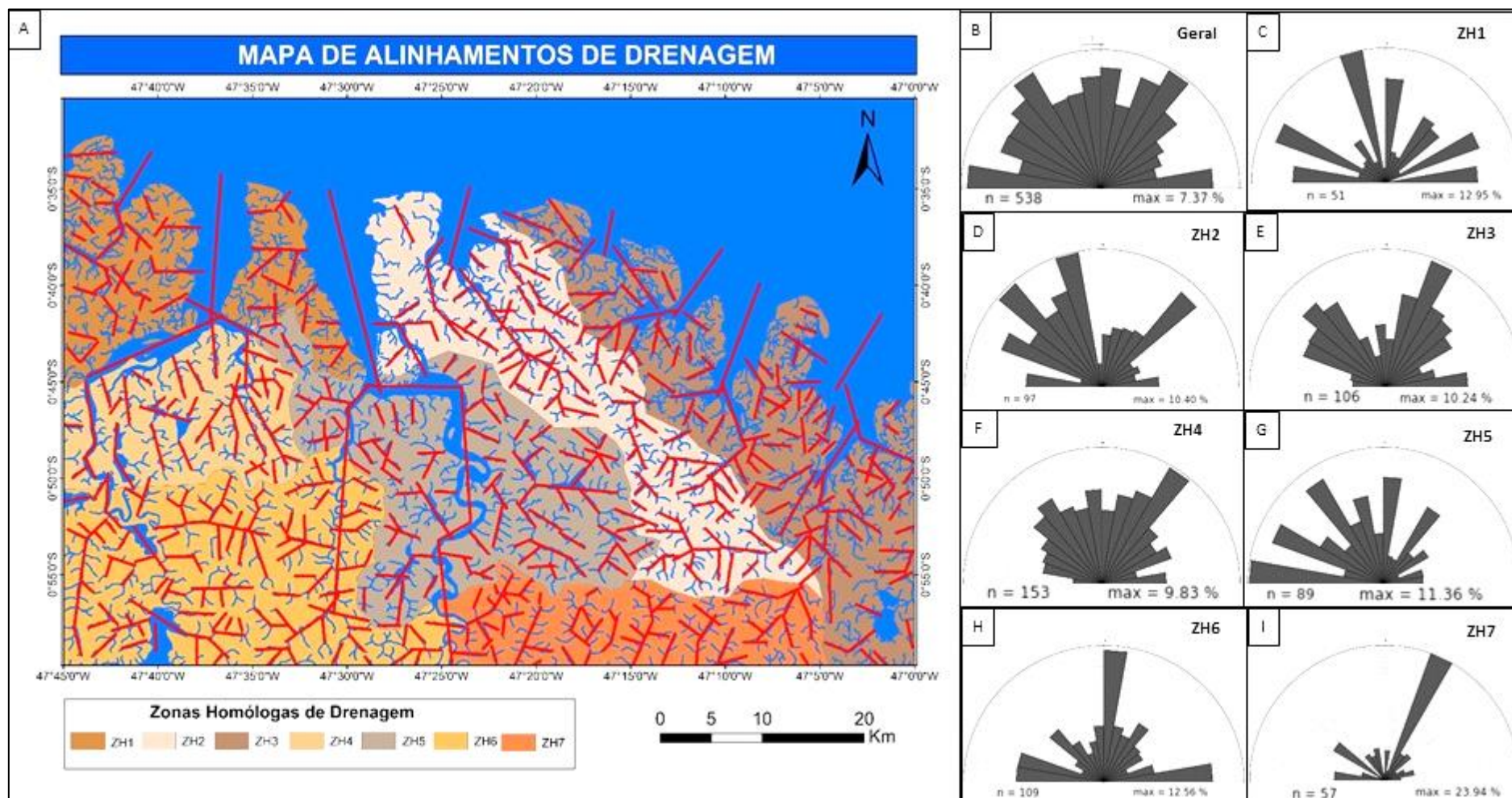
As formas anômalas que mais se destacam são dobras em cotovelo, sendo a mais evidente formada pela mudança de sentido de ENE-WNW para NNE-SSW do Rio Marapanim. Formas em Z e em S também ocorrem de maneira expressiva, sendo verificado um maior predomínio das primeiras em relação as segundas. Estas formas ocorrem principalmente segundo E-W e N-S. Outras formas anômalas presentes são meandros isolados e formas em arco (Figura 5.1.3).

Figura 5.1.1: Mapa de Drenagem da área de estudo.



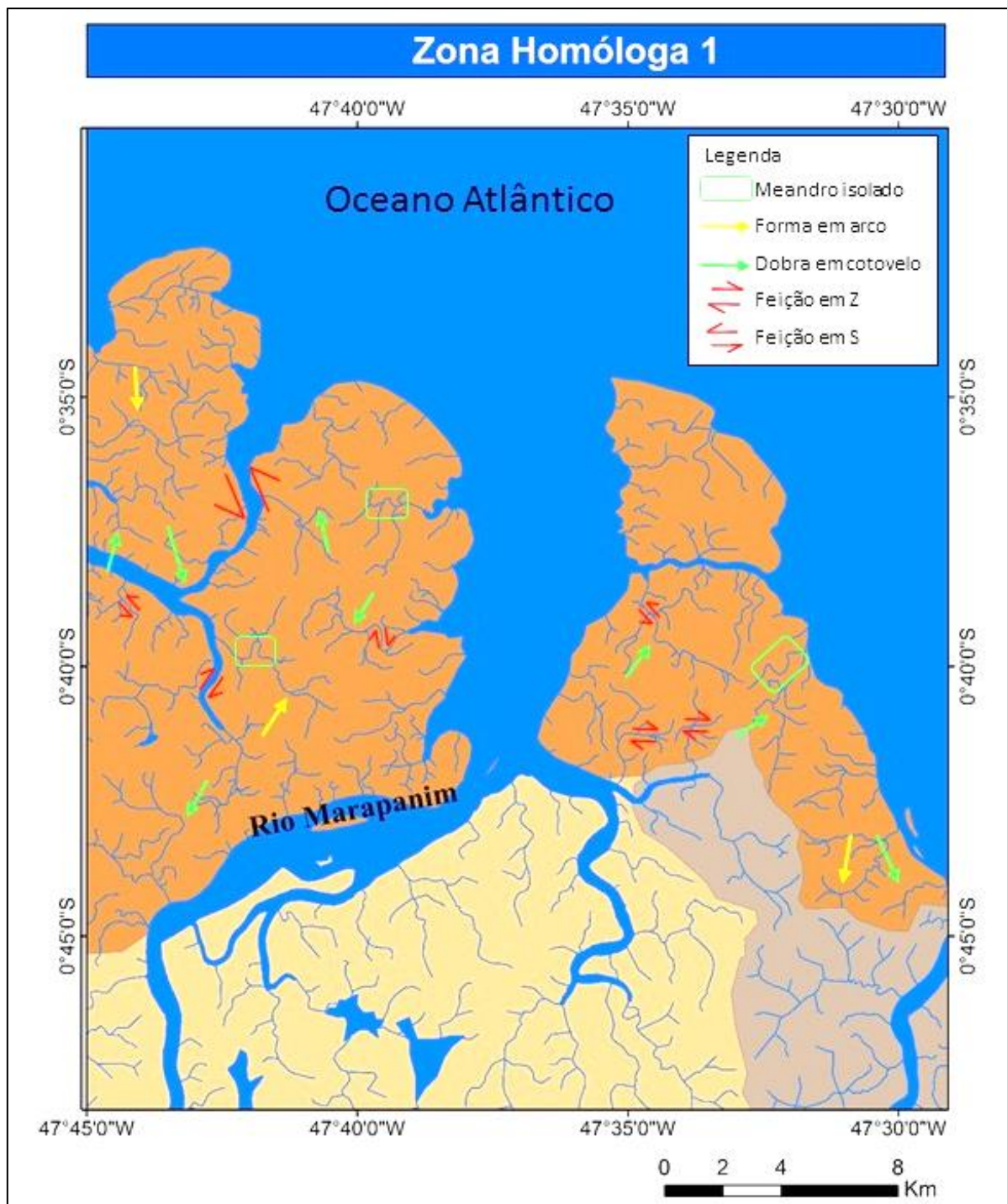
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.1.2: Mapa de alinhamentos de elementos de drenagem, mostrados pelas linhas vermelhas em (a) e rosáceas mostrando as direções preferenciais dos alinhamentos na área em geral (b) e nas zonas homólogas (c-i).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.3: Zona Homóloga 1.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Zona Homóloga 2**

A ZH2 apresenta uma geometria alongada na direção NW-SE que se estende do norte ao sudeste da área (Figura 5.1.4). Isso é, em grande parte, reflexo da orientação dos seus elementos de drenagem principais, os quais se encontram

dominantemente seguindo esta mesma direção, em $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ e $N10^{\circ}-20^{\circ}W$. Alinhamentos em $N40^{\circ}-50^{\circ}E$ e $N60^{\circ}-70^{\circ}W$ também ocorrem de maneira considerável (Figura 5.1.2 d). A disposição desses elementos impões um padrão de treliça para a drenagem.

O limite da ZH2 com a ZH1 é dado pelo Rio Maracanã, já com as outras ZHs a transição é mais gradual. No caso dos limites com as ZHs 3, 5 e 7, os mesmos foram traçados onde a drenagem passa a apresentar, respectivamente, uma densidade maior (ZH3), mudança para um padrão retangular (ZH5) e mudança da orientação principal dos elementos de drenagem para NE-SW (ZH7).

Além dessas características, a ZH2 apresenta uma densidade média de drenagem em relação as outras ZHs, angularidade média, sinuosidade baixa e assimetria moderada. Dentre as anomalias verificadas, a que mais se destaca é a forma meandrante de um canal na porção norte da ZH, a dobra em cotovelo verificada no Rio Xindeua, que muda de uma direção N-S para E-W, e a feição em arco no Rio Japerica, que sofre uma inflexão de E-W para NE-SW. Esses tipos de anomalias ocorrem ao longo de toda essa ZH, sendo também verificadas de maneira expressiva feições anastomosadas e alargamento de rio (Figura 5.1.4).

- **Zona Homóloga 3**

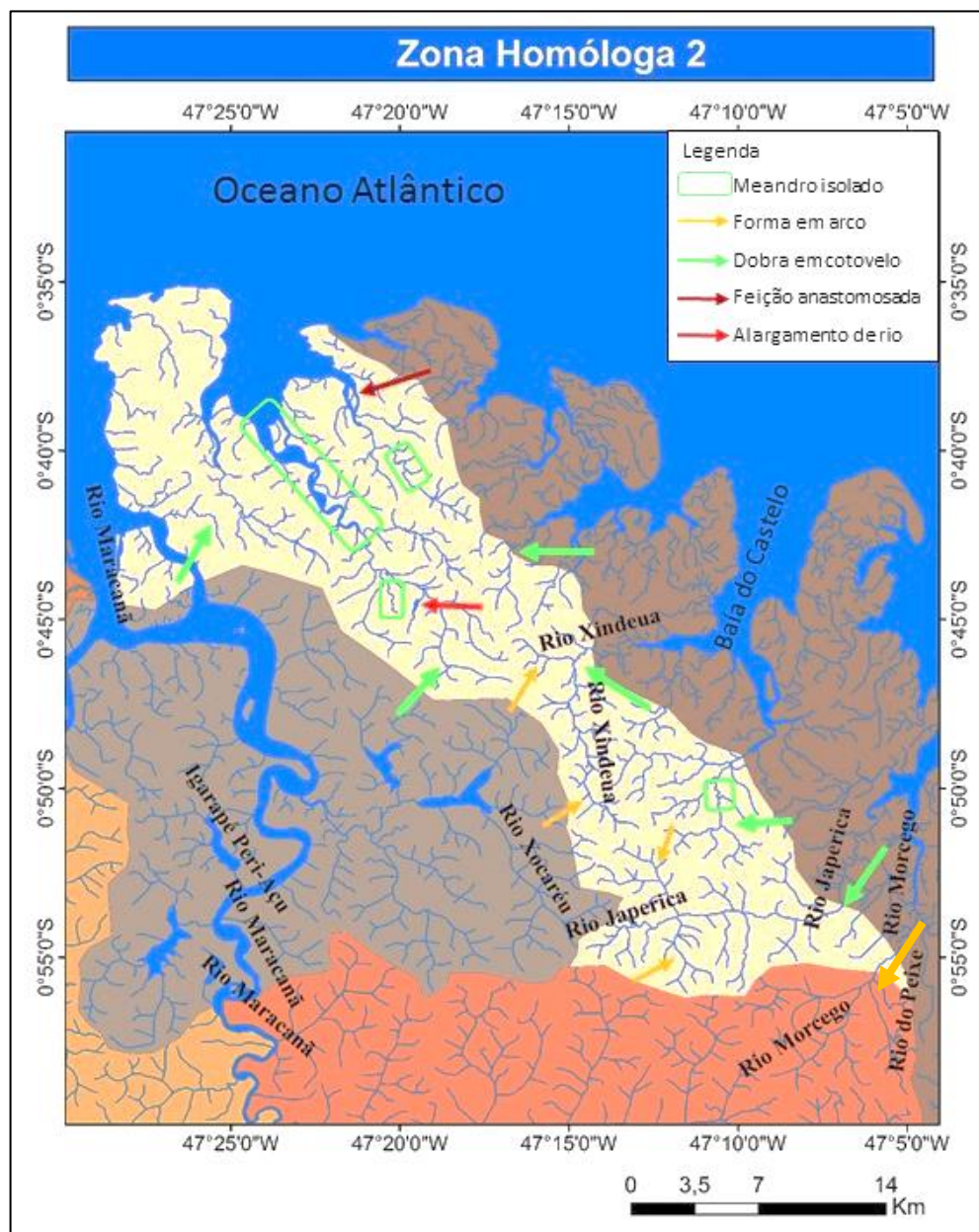
Ocorre ao longo de todo o leste da área, em uma região topograficamente mais baixa, em contato direto com o Oceano Atlântico, sendo recortada por expressivas baías, como a do Piracaua e a do Castelo. Com isso, a ZH3 apresenta como característica mais expressiva a sua rede de drenagem altamente densa (Figura 5.1.4), sendo a ZH com maior densidade de elementos de drenagem em toda a área.

Esta rede de drenagem apresenta padrão subdentritico, sinuosidade alta e angularidade média a baixa. Os elementos de drenagem encontram-se alinhados principalmente nas direções NE-SW e N-W, especialmente em $N20^{\circ}-30^{\circ}E$ e $N40^{\circ}-50^{\circ}W$ (Figura 5.1.2 e). A é assimetria baixa, apesar de ocorrer localmente alguns canais com assimetria alta, como no caso do Rio Japerica, que apresenta tributários maiores e mais numerosos na sua margem esquerda em relação a margem direita, e

no do Rio Morcego, cuja margem direita apresenta tributários mais ramificados que a margem esquerda (Figura 5.1.5).

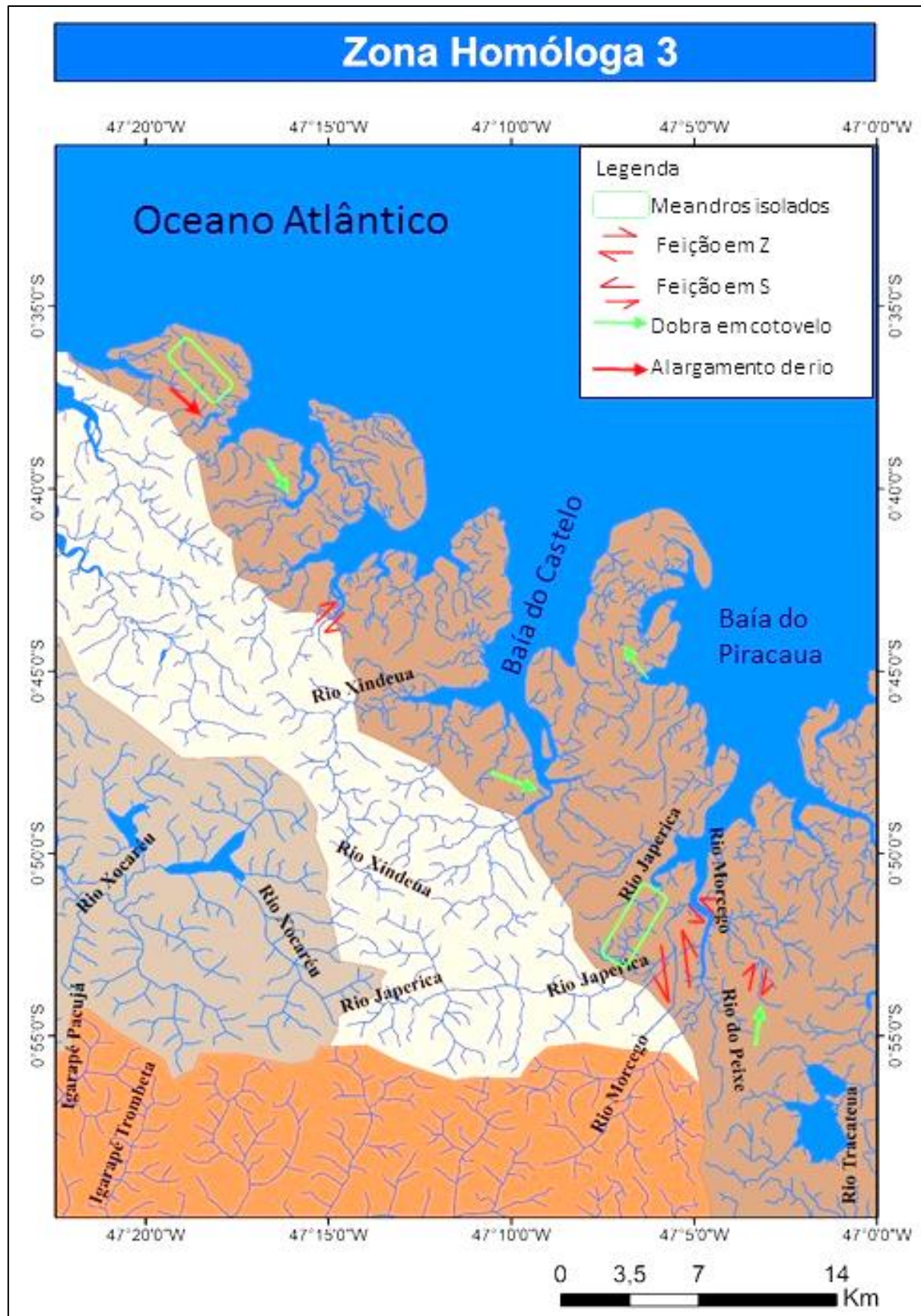
Dentre as anomalias, encontram-se meandros isolados, dobras em cotovelo, alargamento de rio e um lago isolado localizado no extremo sudeste da área (Figura 5.1.5). Formas em Z e em S também ocorrem, orientadas principalmente para N-S, NW-SE e NE-SW.

Figura 5.1.4: Zona Homóloga 2.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.5: Zona Homóloga 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- **Zona Homóloga 4**

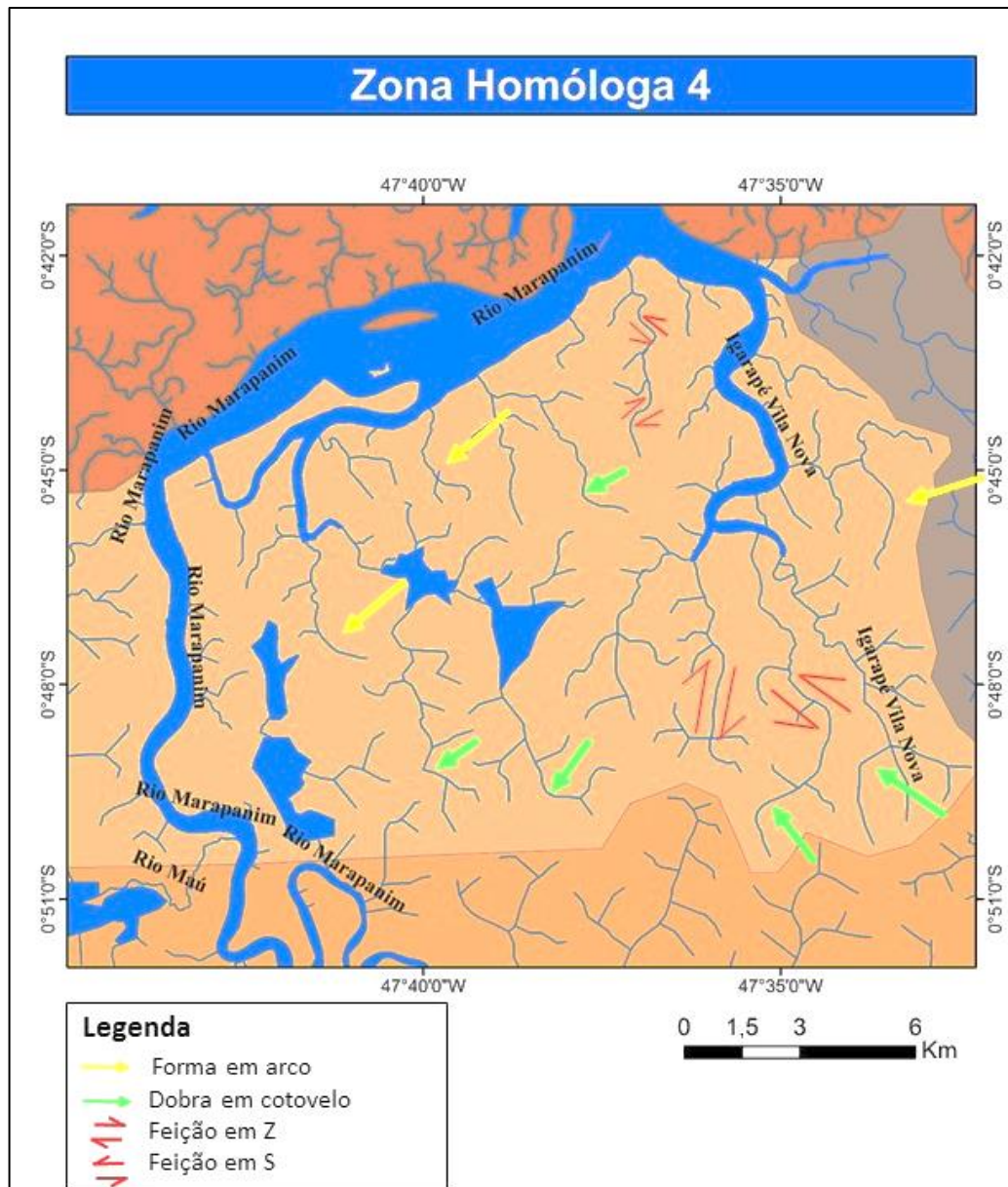
Localizada no oeste da área, a ZH4 apresenta como principais canais de drenagem o Rio Marapanim e o Igarapé Vilanova. Ambos se apresentam orientados segundo N-S, porém a maioria dos elementos de drenagem se alinham entre N30°-40°E, ocorrendo também de maneira considerável N-S e N30°-40°W (Figura 5.1.2 f). Com isso, a drenagem apresenta um padrão treliça direcional a subdendrítica. (Figura 5.1.6).

Apresenta-se limitada a leste e a sul pelas zonas homólogas 5 e 6, respectivamente, com as quais o limite é gradual. No caso da ZH5, o limite é definido pela mudança para um padrão mais retangular, e na ZH6, pela mudança no padrão da orientação dos canais principais, o quais estão dispostos em E-W e N-S.

Além das características mencionadas anteriormente, a ZH4 apresenta densidade de drenagem intermediária, angularidade média e sinuosidade mista. A assimetria é média a alta, sendo isso bem evidente no Igarapé Vila Nova, o qual apresenta tributários maiores na margem esquerda que na margem direita (Figura 5.1.6).

Dentre as feições anômalas presentes, a que mais se destaca é a dobra em cotovelo do Rio Marapanim, que muda sua orientação de N-S para ENE-WSW. Essa feição, associada a outra dobra em cotovelo presente na ZH1 que muda a direção do rio de ENE-WSW para NNE-SSW, conferem ao mesmo uma expressiva feição em Z segundo ENE-WSW. Outras anomalias notáveis são o padrão meandrante mais ao sul deste rio e ao longo do Igarapé Vila Nova e os lagos que presentes. Também ocorrem dobras em cotovelo e formas em arco. Feições em Z e S ocorrem principalmente segundo NNE-SSW, NE-SW e NW-SE (Figura 5.1.6).

Figura 5.1.6: Zona Homóloga 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

• Zona Homóloga 5

A ZH5 se localiza na porção central da área e faz limites graduais com todas as outras ZHs, exceto com a ZH3. Sua principal feição é Rio Maracanã, o qual apresenta expressivas dobra em cotovelo, resultado de sua mudança de N-S para E-W e depois para N-S novamente, configurando uma forma em S. Estas dobras em cotovelo se repetem ao longo de toda a ZH, conferindo um padrão retangular a subdendrítico a rede de drenagem. Também chama atenção o padrão meandrante do Rio Maracanã, o qual é discordante do entorno (Figura 5.1.7).

A rede de drenagem apresenta elementos orientados principalmente segundo E-W, ocorrendo também de maneira considerável para N-S, $N30^{\circ}$ - 40° W e $N60^{\circ}$ - 70° W (Figura 5.1.2 g). A sinuosidade é baixa e a angularidade e a densidade são médias. A assimetria é moderada a alta, onde no Rio Xocaréu apresenta tributários maiores na sua margem esquerda e os rios Capiri, Maracanã e Igarapé Peri-açu nas suas margens direitas (Figura 5.1.7).

Dentre as anomalias, além das numerosas dobras em cotovelo presentes e do padrão meandrante do Rio Maracanã, também ocorrem feições em arco, alargamento de rios (como no caso do Igarapé Peri-Açu e do Rio Xocaréu) e formas em Z (Figura 5.1.7). Estas últimas ocorrem principalmente segundo NNE-SSW e NE-SW.

- **Zona Homóloga 6**

Esta ZH abrange o extremo sudoeste da área, e apresenta como principal feição os rios Marapanim e Caripi, com seus aspectos meandrantes discordantes do padrão do entorno (Figura 5.1.8). Nesta ZH, a drenagem apresenta um padrão de treliça, com os maiores elementos de drenagem orientados em E-W, ocorrendo também de maneira considerável em N-S (Figura 5.1.2 h). A assimetria da rede de drenagem é média a baixa, a sinuosidade é baixa e a angularidade e a densidade são médias (Figura 5.1.8).

As anomalias presentes, além do padrão meandrante dos rios Marapanim e Caripi, são dobras em cotovelo, formas em arco e lagos isolados. Também ocorrem feições em Z (com destaque para a presente no Rio Caipiri) e, em menor proporção S, estando estas feições orientadas para E-W e NE-SW (Figura 5.1.8).

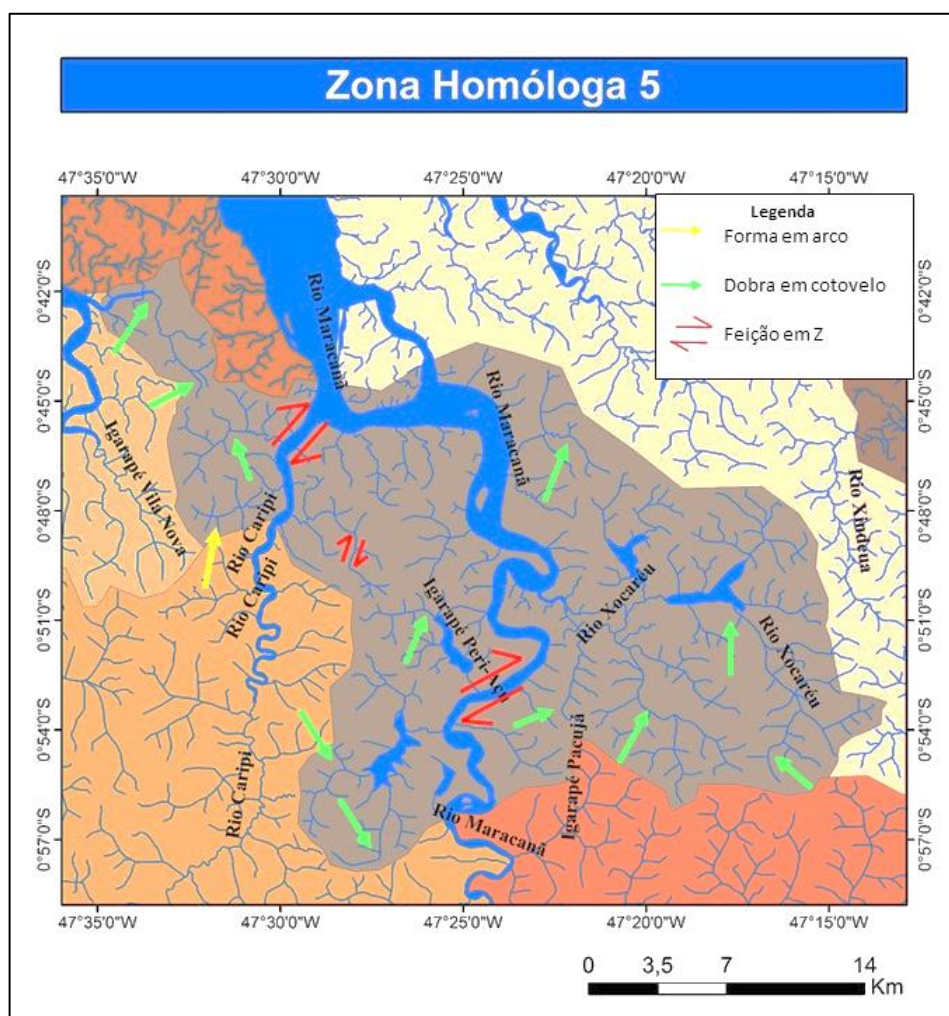
- **Zona Homóloga 7**

Localizada no sudeste da área, a ZH7 limitada a oeste pelo Rio Maracanã, e apresenta limites a norte, com as ZHs 5 e 3, a oeste, com a ZH7, definidos pelas mudanças mais graduais das características da rede de drenagem (Figura 5.1.9).

Seus principais canais se orientam na direção N20°-30°E (Figura 5.1.2 i), tais como os igarapés Pacujá, Trombete e Iraquara. Estes canais apresentam tributários orientados principalmente segundo N50°-60°W. Esta configuração atribui um padrão treliça a esta ZH. Outras características são a sua sinuosidade baixa, densidade intermediária (em relação ao restante da área) e angularidade média. A assimetria é alta, especialmente em relação aos igarapés Pacujá e Iraquara e ao Rio Morcego, cujas margens esquerdas apresentam afluentes maiores e com mais tributários associados em relação aos das margens direitas (Figura 5.1.9).

Dentre as anomalias, destacam-se formas em arco (como a presente no Igarapé Iraquara) e dobras em cotovelo. Feições em Z e em S ocorrem de forma localizada segundo E-W (Figura 5.1.9).

Figura 5.1.7: Zona Homóloga 5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.1.8: Zona Homóloga 6.

5.2 ANÁLISE DO RELEVO

A área apresenta um relevo pouco expressivo, com cotas variando de 0 a 63m (figuras 5.2.1 e 5.2.2) e inclinações baixas a medianas, variando de 0° a 15° (Figura 5.2.3), além de apresentar vertentes suaves e predominantemente convexas e côncava-convexas.

As porções mais rebaixadas encontram-se nas áreas litorâneas e nas margens de baías, principalmente ao longo da porção leste da área, onde as altitudes apresentam valores médios de 10 metros (figuras 5.2.1 e 5.2.2). A porção norte, também mais próxima do litoral, apresenta-se um pouco mais elevada, com cotas médias em torno de 20 metros. O relevo nessas áreas é predominantemente de agradação e apresenta quebras pouco expressivas. Também apresenta pequenas quantidades de elementos de relevo, o que reflete na sua textura mais suave e baixa densidade de elementos e lineamentos. Além disso, é caracterizado pelo seu aspecto plano a suavemente ondulado, com inclinações normalmente entre 0° a 4° (Figura 5.2.3). Isso, associado a influência de processos litorâneos, como correntes e oscilações do nível de maré mais acentuadas, faz com que estas áreas mais rebaixadas apresentem uma grande densidade de drenagem, como foi mostrado na Seção 5.1.

Porções mais baixas com características similares as descritas anteriormente também ocorrem cortando regiões mais altas ao longo das margens dos maiores rios que atravessam a área de estudo, notavelmente os rios Marapanim, Maracanã, Caripi e Igarapé Vila Nova, orientados principalmente na direção N-S (figuras 5.2.4).

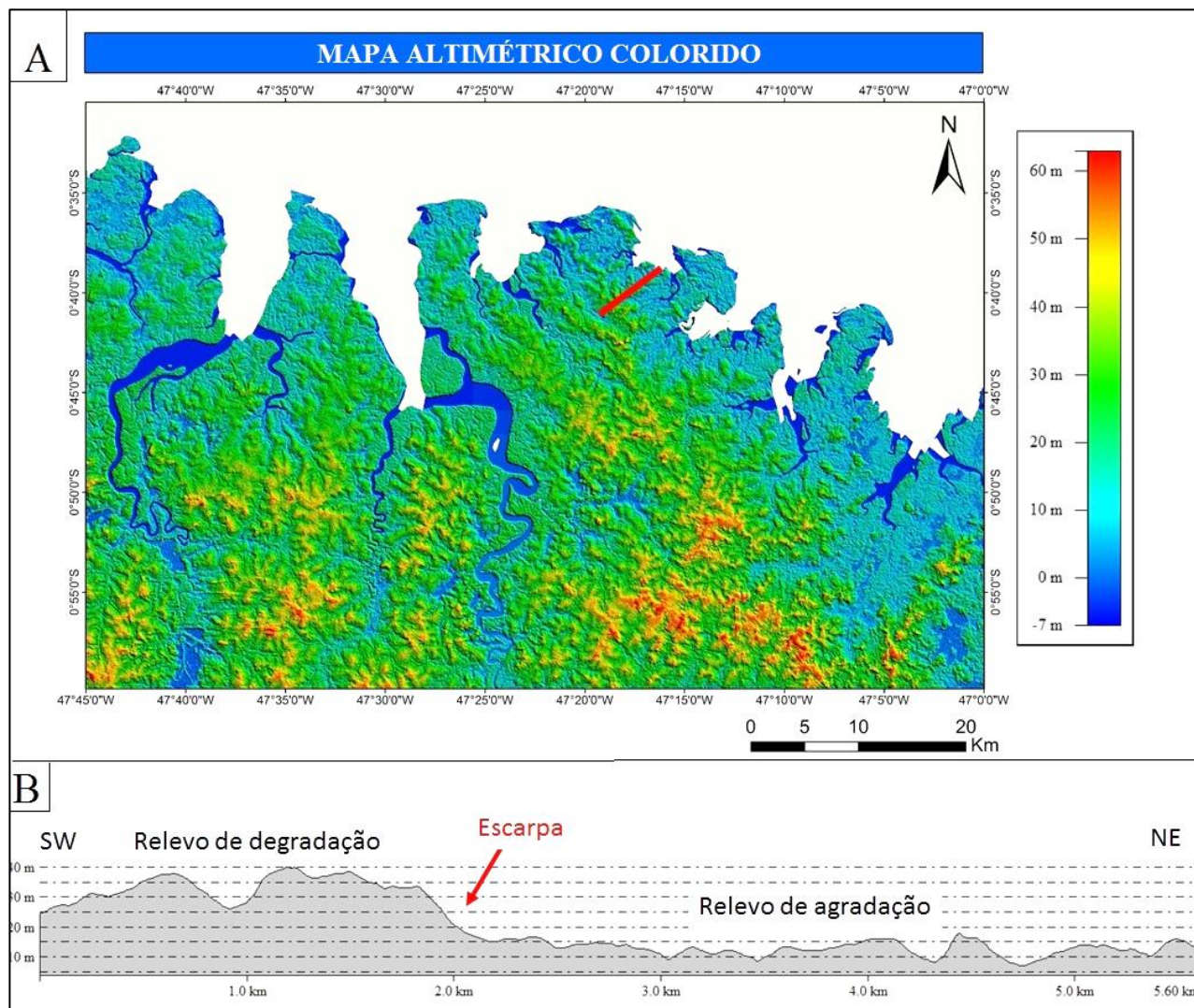
Nas porções mais centrais, o relevo apresenta-se topograficamente mais elevado, com cotas normalmente entre 30 a 40 metros e é predominantemente de degradação (figuras 5.2.1 e 5.2.2). As áreas mais altas ocorrem na região sudeste, onde as altitudes chegam a atingir 65m. Estas regiões apresentam uma densidade bem maior de elementos de relevo em relação ao restante da área, o que confere uma textura mais rugosa e uma maior quantidade de lineamentos em relação as porções mais rebaixadas. As quebras e alinhamentos também são mais evidentes (Figura 5.2.4) e a inclinação dos terrenos é maior, com valores normalmente entre 5° a 10°, caracterizando um relevo ondulado (Figura 5.2.3). Os elementos e as quebras de relevo encontram-se alinhados principalmente na direção N40°-60°W, ocorrendo

também expressivamente nas direções N20°-40°E, N-S, N30°-40°W, N60°-70°W e E-W (Figura 5.2.4). Estes alinhamentos são bastante evidentes especialmente na região situada a leste do Rio Maracanã.

Ao longo da área, também são observadas escarpas em estágio de maturidade inicial e final, especialmente nas áreas de cotas mais altas e nas regiões de transição para cotas mais baixas (figuras 5.2.1 e 5.2.2). Estas escarpas formam desníveis de até 20m (Figura 5.2.1 b) e ocorrem orientadas em duas direções preferenciais: a leste do Rio Maracanã elas se alinham principalmente segundo N40°-60°W, e a oeste do rio elas tendem a se alinhar na direção N-S.

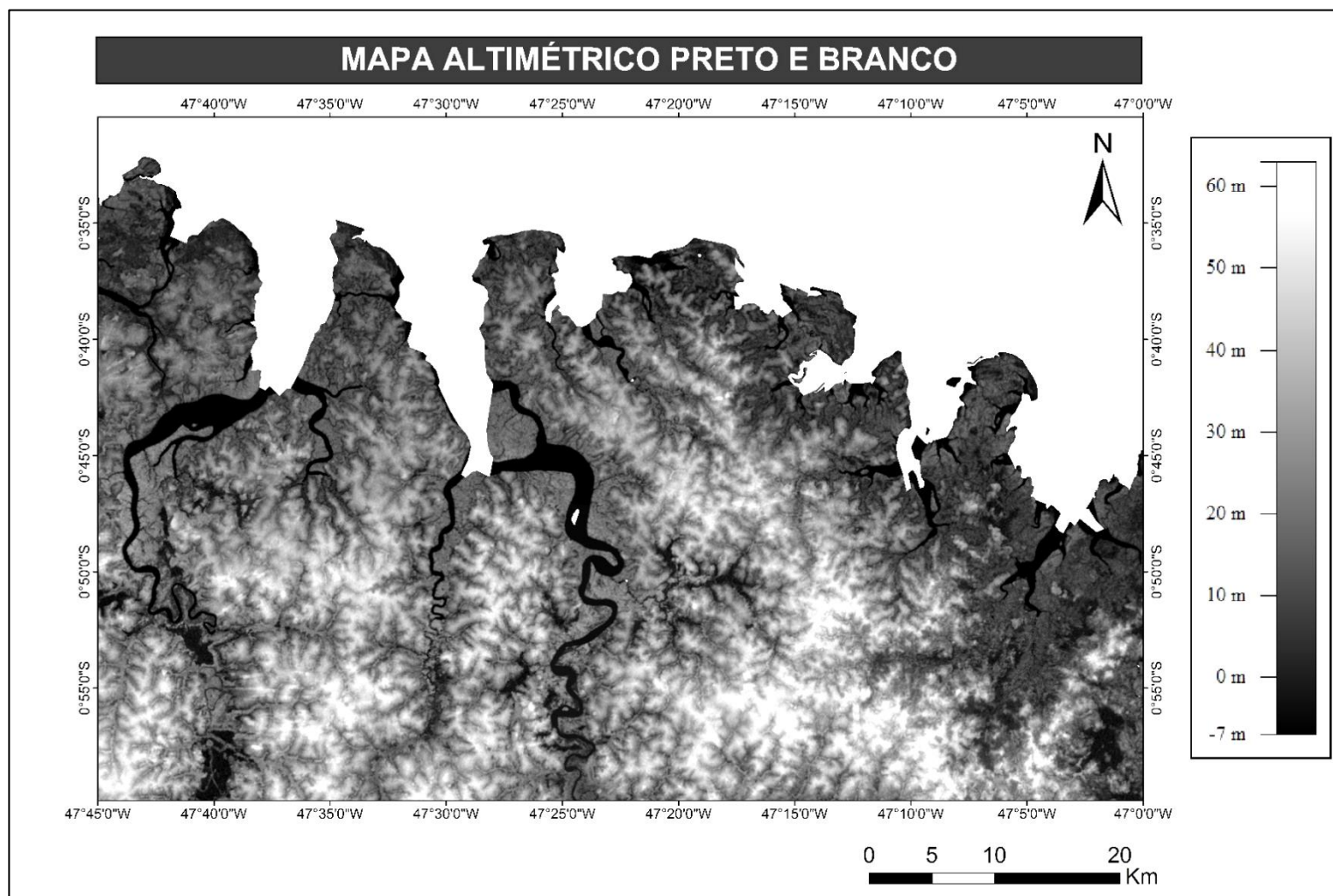
Outras feições notáveis são a presença de formas aproximadamente lenticulares e romboédricas (Figura 5.2.5).

Figura 5.2.1: Mapa altimétrico colorido (a) onde a linha vermelha mostra onde foi traçada a seção mostrada em (b).



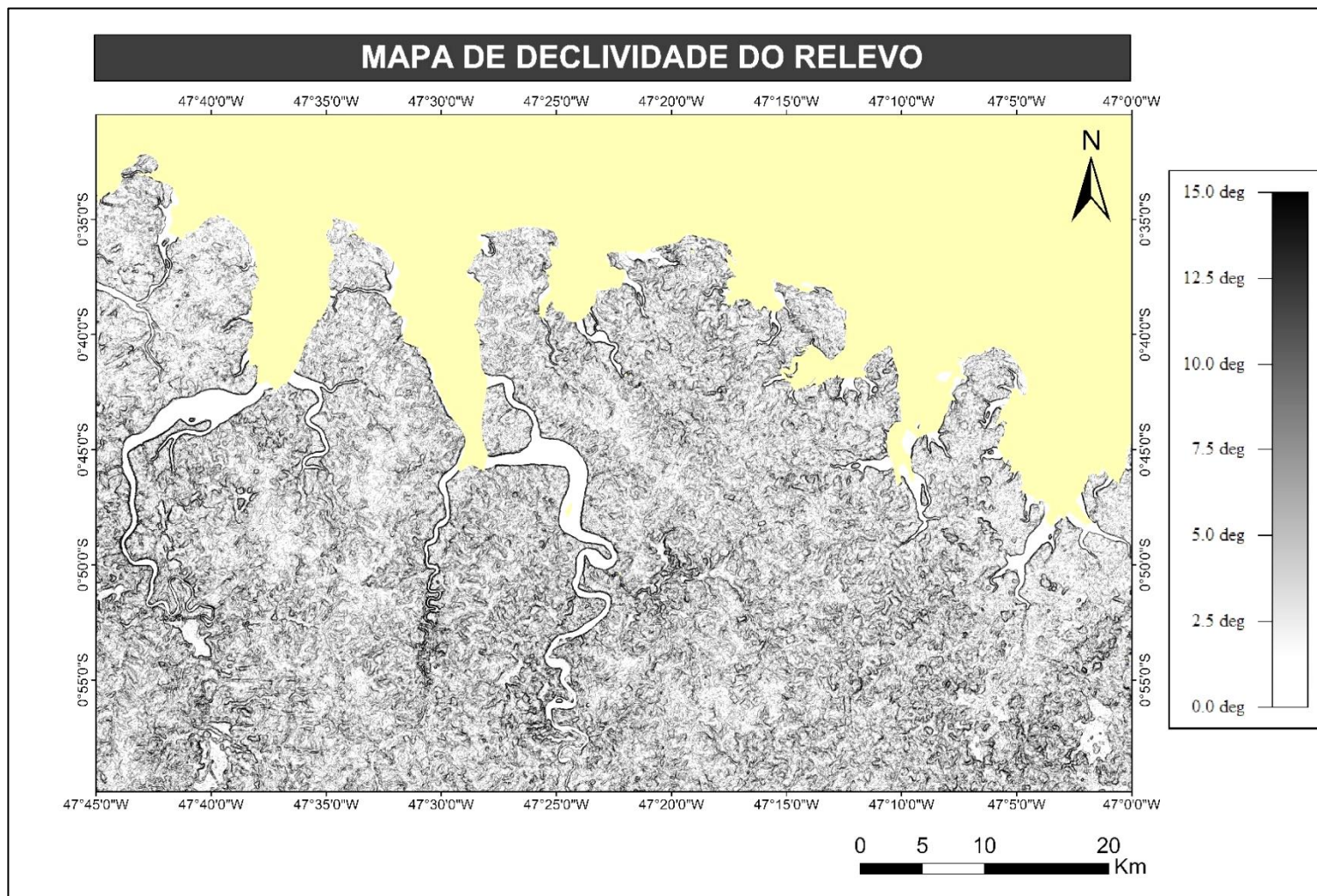
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.2.2: Mapa altimétrico preto e branco, no qual as áreas mais baixas aparecem com um tom mais escuro e as mais elevadas com uma cor mais clara.



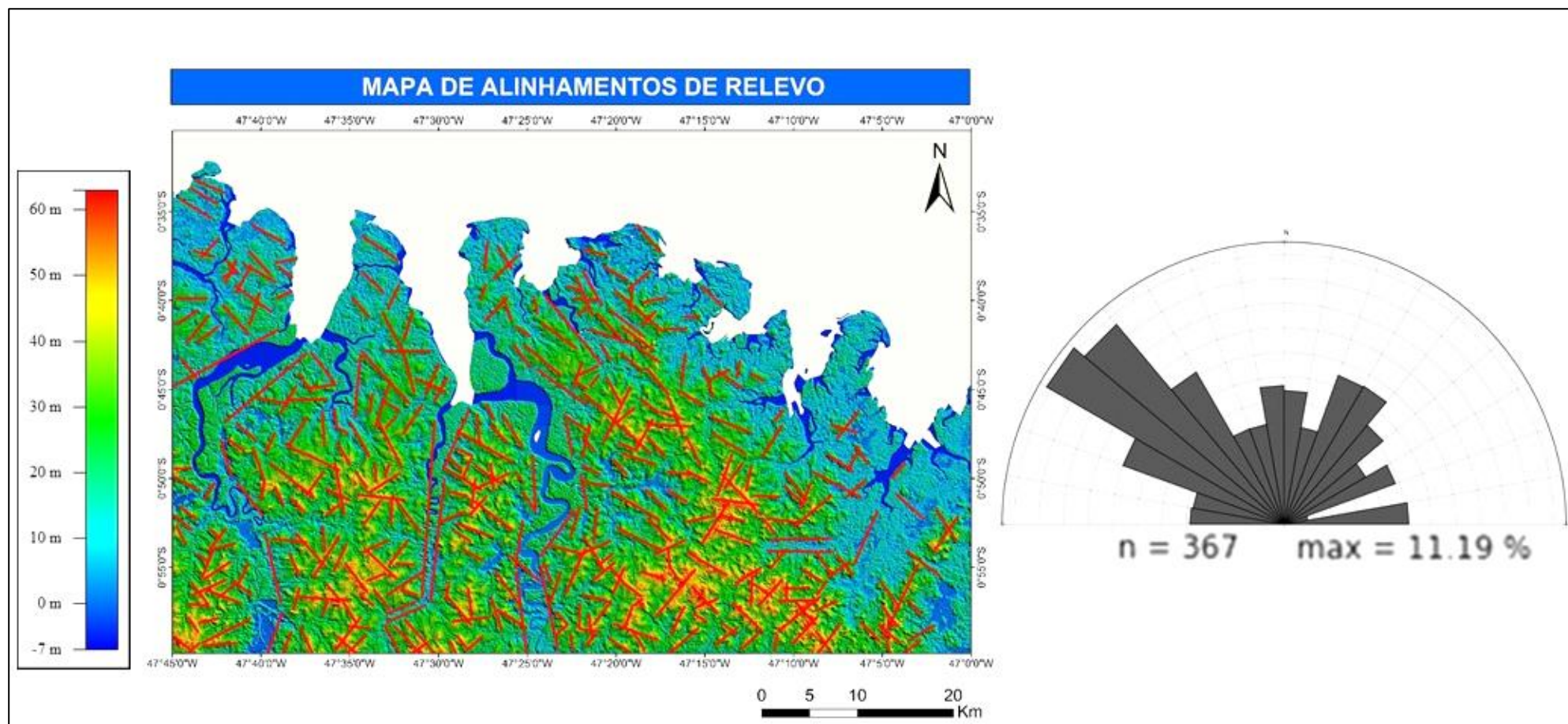
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.2.3: Mapa de declividade do relevo, onde as porções mais inclinadas aparecem com cores escuras e as mais horizontais com cores claras.



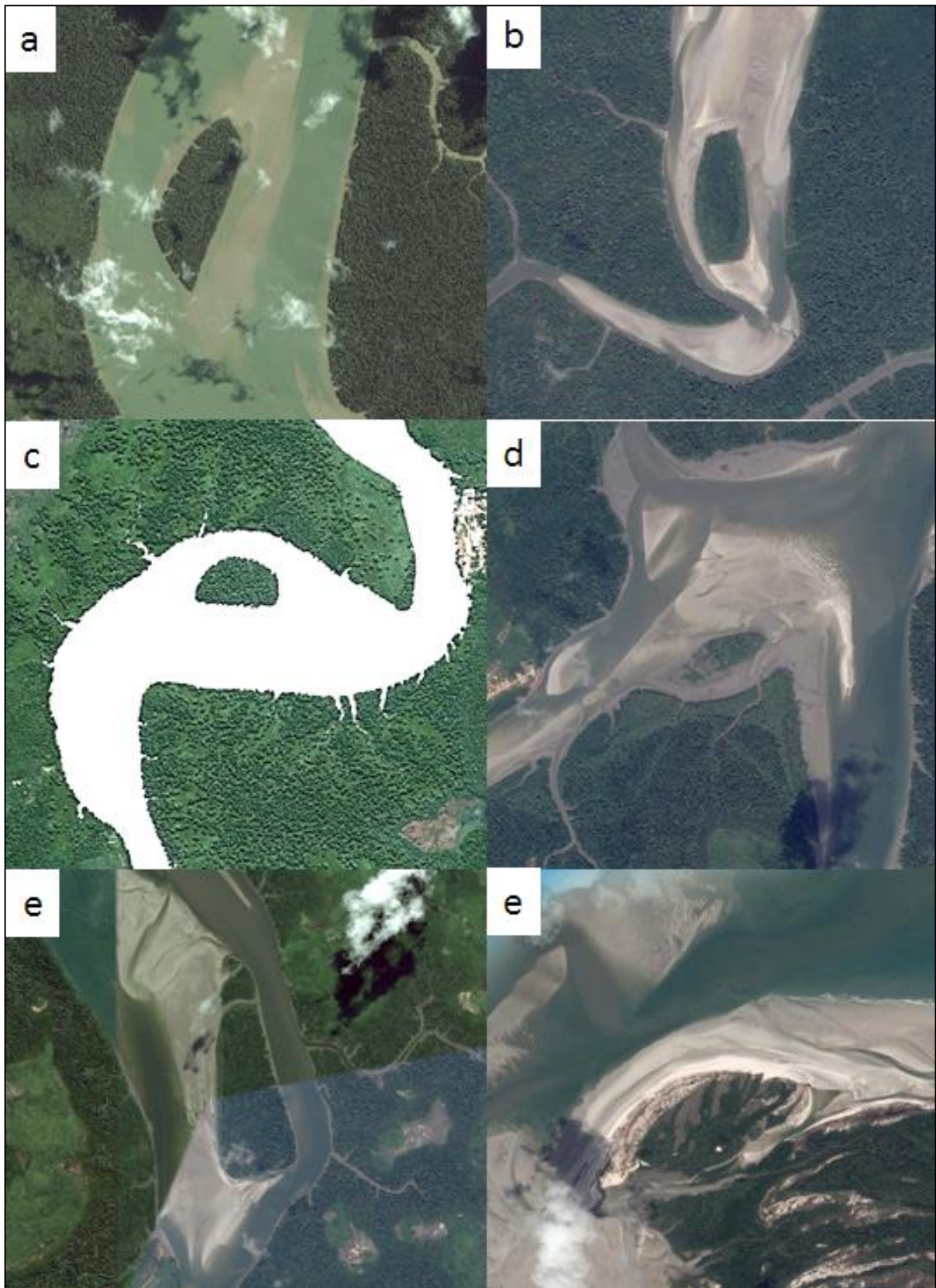
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.2.4: Mapa de alinhamentos de elementos de relevo (mostrados pelas linhas vermelhas) e rosáceas mostrando as direções preferenciais dos alinhamentos.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.2.5: Exemplos de formas de relevo com geometrias aproximadamente lenticulares e romboédricas que ocorrem ao longo da área.



Fonte: Imagem GeoEye do Google Earth Pro.

5.3 ANÁLISE INTEGRADA E DISCUSSÃO

A análise da drenagem e do relevo aponta a presença de feições que indicam a presença de um expressivo regime neotectônico na área de estudo. Isto é verificado principalmente na rede de drenagem, a qual, com seus numerosos cursos d'água, apresenta vários indícios de controles estruturais na região.

O relevo, por outro lado, apresenta-se pouco expressivo e manifesta com menor intensidade este regime. Isto ocorre devido ao mesmo ser constituído por materiais pouco resistentes a erosão, sendo composto superficialmente de forma dominante por sedimentos inconsolidados, os quais apresentam, na maioria da região, espessuras métricas a decimétricas. Ademais, ao longo da área ocorre rios largos e volumosos, além de grandes volumes de chuva, o que tende a aplainar e uniformizar o relevo, dificultando a preservação de estruturas indicativas de tectonismo. Mesmo assim, ainda se observam algumas feições típicas destas atividades, destacando-se escarpas em estágio de maturidade inicial e final – as quais apresentam suas origens normalmente associadas a falhamentos normais ou transtrativos – e feições com formas aproximadamente lenticulares e losangulares - cuja a geometria pode ter sua origem a partir de um regime de deformação não coaxial rúptil.

Outro forte indício é a significativa orientação das formas de relevo, principalmente no leste da região, o que é algo de esperar em uma área submetida a esforços de natureza tectônica, que imprime ao relevo um expressivo alinhamento de acordo com a disposição dos esforços principais. Os elementos e as quebras de relevo encontram-se alinhados principalmente segundo NW-SE, ocorrendo também de forma considerável nas direções NE-SE e N-S, sendo esta última verificada com maior frequência a oeste do Rio Maracanã.

De forma similar, a rede de drenagem também se orienta segundo direções preferenciais. A extração dos lineamentos de drenagem aponta alinhamentos dispostos principalmente nas direções E-W, NW-SE, N-S e NE-SW.

A rede de drenagem, em relação ao relevo, apresenta uma diversidade maior de estruturas indicativas de tectonismo. As mais observadas foram formas em Z, S e dobras em cotovelo. Também ocorrem feições anastomosadas, meandros e lagos isolados, arcos e alargamentos abruptos de rios. Além disso, ao longo da rede de

drenagem encontram-se predominantemente padrões treliça e retangular, os quais são tipicamente desenvolvidos em áreas sob controles estruturais, como mostrado na Seção 2.4.1.

A análise evidenciou a presença de estruturas formadas tipicamente em regime de deformação não coaxial rúptil. Através delas, observou-se tanto indícios de movimentações dextrais, como formas em Z, quanto de movimentações sinistrais, como formas em S. Os exemplos que mais se destacam encontram-se ao longo de canais orientados em E-W e NE-SW, como as formas em Z do Rio Marapanim e Caripi e as em S e em Z do Rio Maracanã. Apesar de terem sido encontradas feições formadas tanto em processos de cinemática dextral quanto sinistral, ao longo de área de estudo se observou com maior frequência estruturas indicativas de primeira em relação a segunda. A ocorrência de feições de movimentação anti-horária não representa nenhuma característica fora do normal, visto que a instalação de um regime de cisalhamento dextral sobre uma área constituída por diferentes rochas e estruturas tende a desenvolver formas sinistrais de maneira localizada. Além disso, o próprio modelo de Riedel prevê a ocorrência de estruturas com cinemática discordante a do arranjo principal que uma área manifesta, como por exemplo, as fraturas antitéticas.

Também se observam, em menor proporção, mas de maneira considerável, a presença de estruturas indicativas de cisalhamento puro, sendo as que mais se destacam são as formas de relevo escarpadas, que ao longo da área ocorrem orientadas principalmente na direção N40°-60°W e N-S. A primeira ocorre mais frequentemente no leste da área, especialmente nas proximidades do município de Salinópolis, e a segunda é mais evidente ao longo da porção oriental da região de estudo. Também ocorrem drenagens com tributários assimétricos, que pode está associado a rebaixamento relativo de blocos.

Algumas feições apresentam também indícios de cisalhamento tanto puro quanto simples. Nos rios Maracanã e Caripi, por exemplo, ocorrem estruturas associadas a falhas normais – mais especificamente escarpas orientadas segundo N-S, presentes ao longo da transição dos seus vales para os relevos mais altos – e estruturas associadas a cisalhamentos simples – notadamente os numerosos segmentos retos seccionados seguidamente por dobras em cotovelos, imprimindo

esse aspecto meandrante aos mesmos, além da ocorrência de algumas ilhas com formas losangulares e lenticulares ao longo destes rios.

Assim, a análise realizada neste trabalho sugere que a área se encontra sob um regime estrutural de comportamento rúptil, onde as principais estruturas estariam relacionadas à origem dos aspectos do relevo e da drenagem mais expressivos na região, como os canais retilíneos de maiores dimensões e as quebras e alinhamentos de relevo mais acentuados. Deste modo, através deles, foram delineadas as feições estruturais mais significativas presentes na área de estudo, onde se obteve um arranjo morfoestrutural caracterizado pela presença de blocos (Figuras 5.3.1), cujos desníveis são similares ao longo da área, sendo eles da ordem de 10m, podendo atingir até 20m em alguns casos (Figura 5.3.2). Além disso, também se observa que estes se dispõem seguindo padrões lístricos ao longo de toda a região, podendo ser visto de forma evidente ao longo das seções mostradas na Figura 5.3.2.

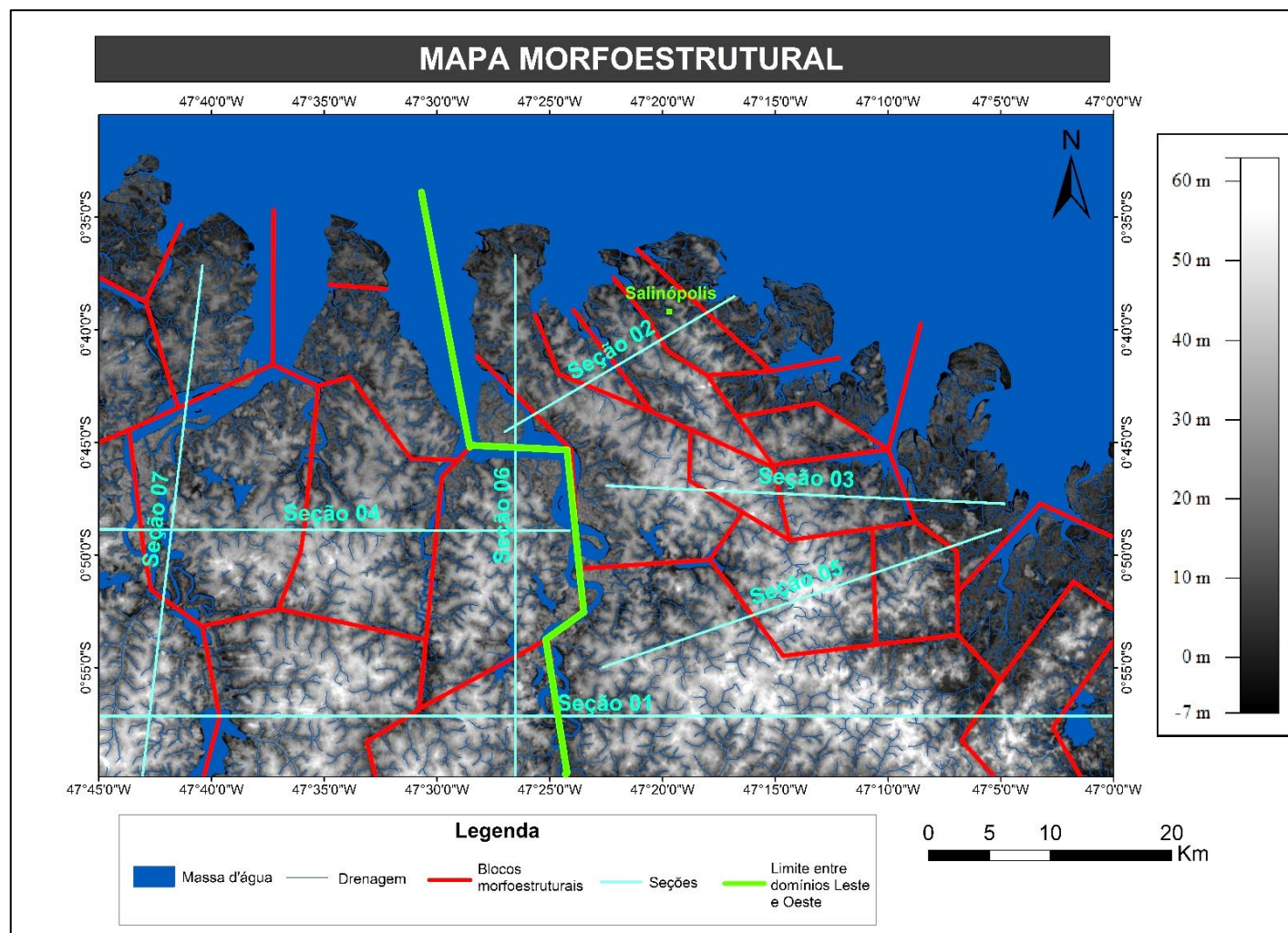
A configuração morfoestrutural mostrada na Figura 5.3.1 evidencia a presença de dois domínios distintos: um na porção ocidental – caracterizado pela presença de blocos de maiores dimensões, com formas poligonais mais alongadas na direção N-S – e outro na porção oriental, no qual os blocos são menores, mais numerosos, com formas mais retangulares e alongados segundo NW-SE ou E-W. No Domínio Leste, as direções mais notáveis da rede de drenagem são $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ e $N20^{\circ}-30^{\circ}E$ (ocorrendo em grande quantidade também para $N30^{\circ}-40^{\circ}E$, $N60^{\circ}-70^{\circ}W$, $N30^{\circ}-40^{\circ}W$ e E-W) e do relevo são $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ e $N30^{\circ}-40^{\circ}E$ (as direções $N20^{\circ}-30^{\circ}E$, $N40^{\circ}-50^{\circ}E$, N-S e E-W também se destacam) (Figura 5.3.3). Já no domínio ocidental, os elementos de drenagem se orientam principalmente para N-S, E-W e $N10^{\circ}-20^{\circ}W$ (e secundariamente para $N30^{\circ}-40^{\circ}W$ e $N30^{\circ}-50^{\circ}W$) e os de relevo para $N40^{\circ}-60^{\circ}W$ e N-S (e secundariamente para $N60^{\circ}-70^{\circ}W$, $N30^{\circ}-40^{\circ}W$, $N20^{\circ}-40^{\circ}E$ e $N60^{\circ}-70^{\circ}E$) (Figura 5.3.4). Ao se elaborar uma rosácea para cada um dos domínios integrando ambos os alinhamentos de relevo e drenagem, fica evidente que o Domínio Oeste apresenta orientações de relevo e drenagem principalmente segundo NW-SE e NE-SW (e em menor proporção E-W e N-S) (Figura 5.3.5 a) e o Domínio Oeste para direções mais diversas, especialmente N-S, NW-SE e E-W, sendo também notável NE-SW (Figura 5.3.5 b).

Em relação as estruturas, a porção oeste da área apresenta como mais expressivas as formas em Z, as quais ocorrem principalmente em direções próximas de E-W, como as vistas nos rios Marapanim, Capiri e Maracanã (na porção sul) e forma em S do Rio Maracanã (na porção norte). Estas formas também são verificadas segundo NE-SW, NW-SE e N-S, indicando a presença de transcorrências nessas direções. Como mostrado anteriormente, as formas indicativas de cinemática dextral dominam em relação as sinistral. Também ocorrem escarpas principalmente nas margens dos vales dos rios principais, orientadas segundo N-S, evidenciando a presença de um componente trativo perpendicular a esta direção. Já na porção leste, as principais estruturas são escarpas com orientação NW-SE (e secundariamente N-S), com ocorrência mais localizada de formas em Z e S (sendo as em Z igualmente dominantes em relação a S) segundo NE-SW, E-W e N-S, estando as forças trativas orientadas em um eixo NE-SW (perpendicular às feições escarpadas).

Com isso, se propõe para a área de estudo a presença de dois regimes neotectônicos de características rúpteis. Na porção oeste, o regime seria caracterizado pela presença de falhas transcorrentes dextrais orientadas na direção E-W e NE-SW, com falhas transtativas dextrais segundo N-S. Já na porção leste, o quadro neotectônico seria marcado pela presença de falhas normais segundo NW-SE, interligadas por falhas transcorrentes dextrais orientadas nas direções NE-SE e E-W e transtrativas dextrais para N-S.

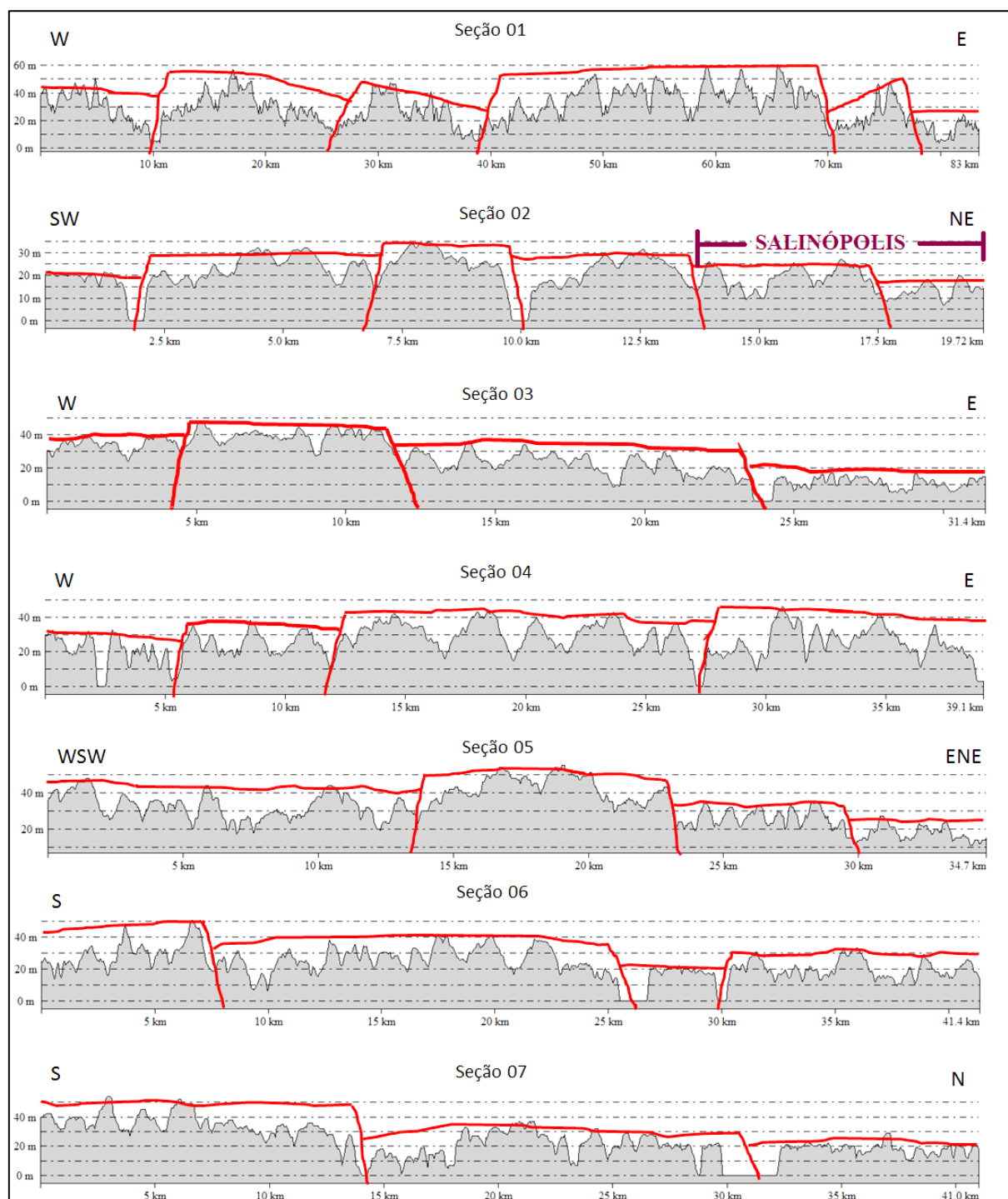
O quadro neotectônico proposto para a área apresenta semelhanças ao apresentado por outros trabalhos que abordam a neotectônica do Nordeste do Pará. Hasui (1996) atribuiu para a região amazônica um arcabouço morfoestrutural constituído por blocos. De forma similar, Costa (2004), Bandeira (2008), Palheta (2008) e Carmona (2013), definiram configurações também em blocos para a Região Metropolitana de Belém, Castanhal, Mosqueiro e Bacia Hidrográfica do Rio Tauá, respectivamente. Costa et al. (1996) realizaram uma análise regional da Região Amazônica, e definiram para o nordeste do Pará um quadro quaternário caracterizado por falhas dextrais ligadas por falhas normais em N-S e NW-SE. Por fim, Costa et al. (1991), que estudaram uma região localizada a leste da área de estudo deste presente trabalho, propuseram a existência de falhas transcorrentes nas direções WNW-ESE, NNE-SSW e NE-SW, e falhas normais em NW-SE.

Figura 5.3.1: Mapa Morfoestrutural, onde se observa um arranjo em blocos, cujos limites foram definidos ao longo dos principais trechos de canais retílineos e das quebras e alinhamentos de relevo.



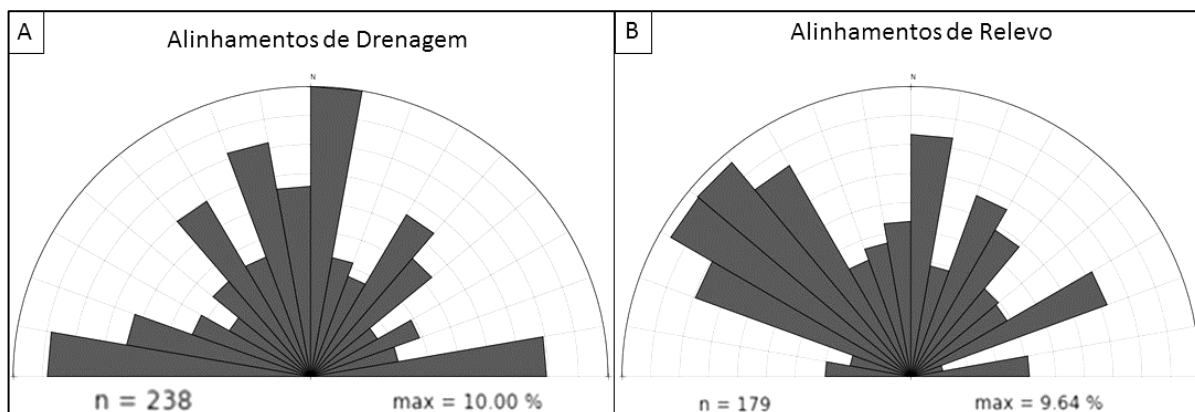
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.3.2: Seções ao longo da área de estudo, evidenciando uma configuração morfoestrutural em blocos.



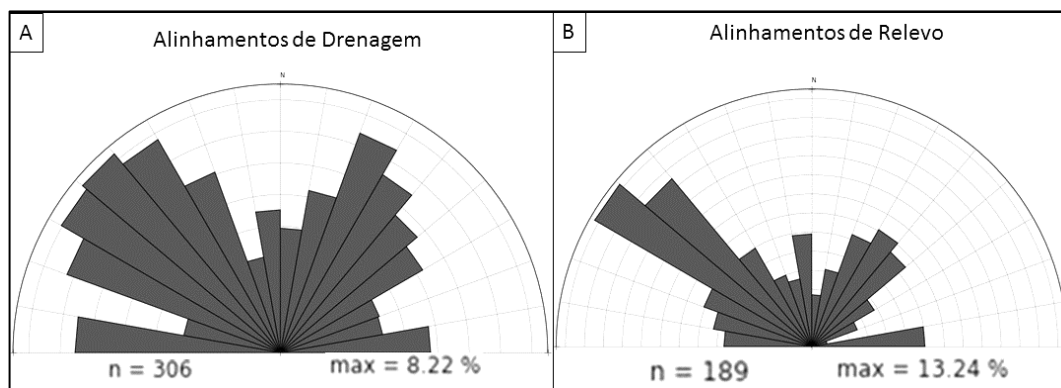
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de dados SRTM.

Figura 5.3.3: Rosáceas de alinhamentos de drenagem (a) e relevo (b) para o Domínio Oeste.



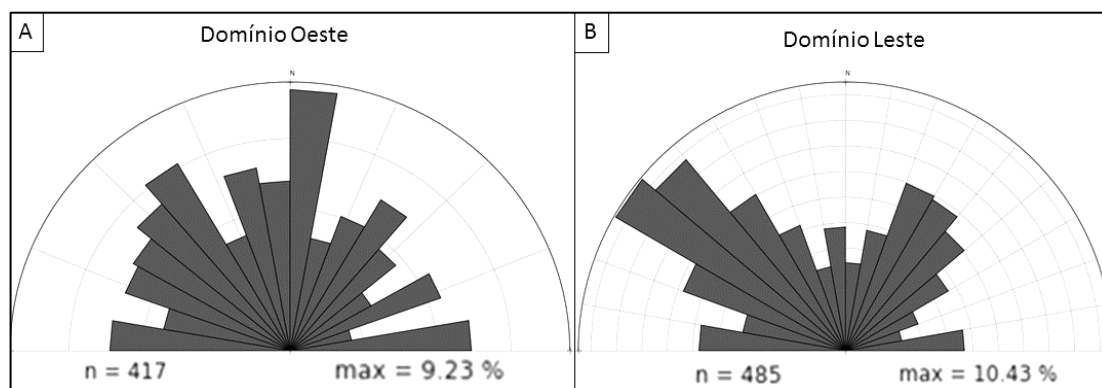
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.3.4: Rosáceas de alinhamentos de drenagem (a) e relevo (b) para o Domínio Leste.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 5.3.5: Rosáceas com dados integrados de alinhamentos de drenagem e relevo para os domínios Oeste (A) e Leste (B)



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

Os aquíferos associados a Formação Pirabas são normalmente descritos como livres ao longo de determinadas regiões onde esta unidade aflora, como em algumas localidades nos municípios de Salinópolis, Capanema e São João de Pirabas. No restante do nordeste do Pará, estes aquíferos são comumente referidos como confinados. De maneira similar, o sistema hidrogeológico no nordeste do Pará ligado ao Grupo Barreiras é descrito como livre (nos estratos mais superficiais) ou confinado (nas camadas mais profundas).

No caso dos aquíferos livres, a recarga seria dada pela infiltração direta das águas superficiais nas rochas expostas. Nos confinados, a recarga ocorreria nas áreas onde as suas rochas se encontram expostas, nas quais as águas exteriores penetrariam nas formações e migrariam através de fluxos predominantemente horizontais em direção a regiões onde esses aquíferos se encontram em maiores profundidades.

Entretanto, a presença de um controle tectônico na área de estudo deve exercer uma influência direta nos aspectos hidrogeológicos da região, de modo que a configuração estrutural da mesma deve ser levada em consideração durante a realização de estudos nesse campo de pesquisa.

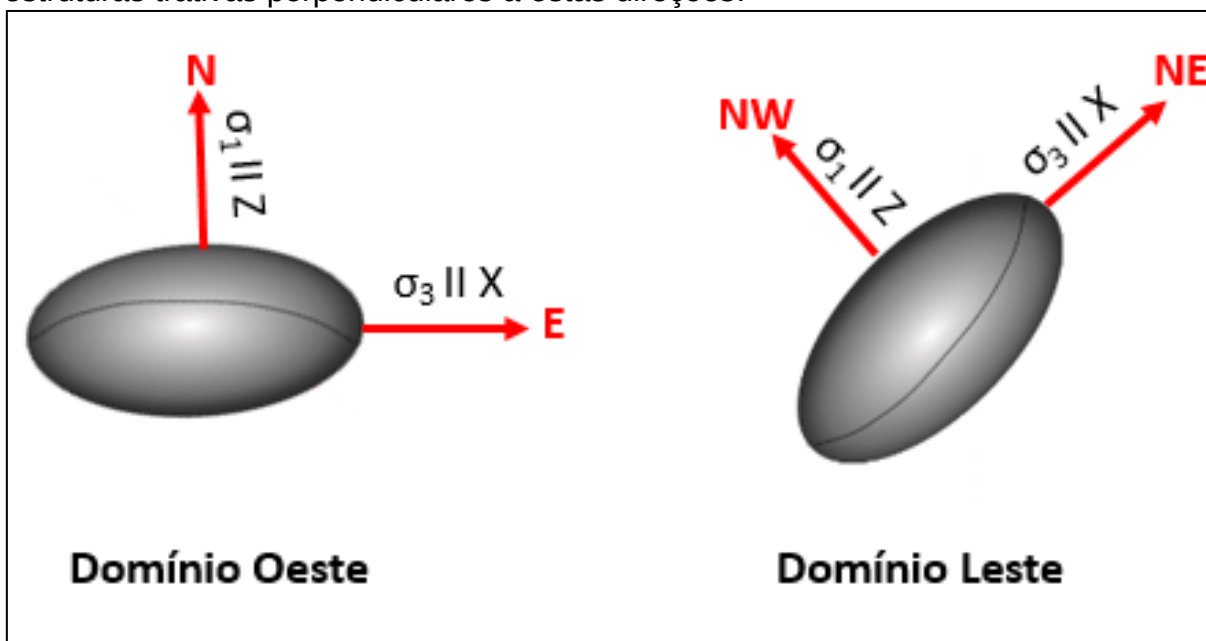
Como mostrado no capítulo anterior, ao longo da área existem indícios de estruturas trativas orientadas nas direções N-S e NW-SE (Figura 6.1). Isso traz consequências diretas ao arcabouço hidrogeológico da região.

Na área de estudo, as estruturas em questão correspondem principalmente a falhas normais, cujos rejeitos são da ordem de 10 metros, chegando a atingir 20 metros em alguns locais (conforme o visto nas seções 5.2 e 5.3), o que implica em uma mudança do arranjo espacial dos estratos sedimentares da região, os quais deixam de ser lateralmente contínuos. Isto vale inclusive para aquelas camadas mais profundas, que se encontram em profundidades de até aproximadamente 125 metros em Salinópolis (Figura 6.2), visto que juntas extensionais se estendem a profundidades máximas que variam de algumas centenas de metros a quase 3 km de profundidade (HOBBS et al., 1976), de modo que falhas normais podem se estender para níveis ainda mais profundos.

Neste sentido, uma camada horizontalmente persistente, quando afetada por essas estruturas, é segmentada em várias partes, as quais migram para diferentes níveis crustais. Com isso, em um mesmo nível pode ser encontrada uma camada arenosa realizando um contato lateralmente brusco com uma argilosa. Ademais, o desenvolvimento de falhas normais implica comumente em movimentos rotacionais associados aos verticais. Por conseguinte, não só a profundidade dos estratos é alterada, como também os seus gradientes de mergulho.

Esta situação não apenas deve ocorrer na área de estudo, como ao longo do nordeste do Pará de maneira geral, como mostram os trabalhos de Costa (2004), Bandeira (2008), Palheta (2008) e Carmona (2013). Os estudos de Freimann (2012) e Freimann (2014), apesar de não terem levado em consideração estes aspectos estruturais, determinaram o arranjo das camadas sedimentares na região de Salinópolis fazendo a utilização de perfis geofísicos localizados em um único bloco morfoestrutural – no caso o bloco mais a oeste, localizado entre os rios Sampaio e Urindeua (figuras 5.3.1 e 6.3) –, de modo que os resultados apresentados se mantêm válidos, porém apenas para este bloco em questão, e não para o outro (bloco mais a leste) compreendido entre o Rio Sampaio e o Oceano Atlântico.

Figura 5.31: Elipsóides de deformação para a região oeste e leste da área de estudo, nos quais o estiramento ocorre nas direções E-W e NE-SW, respectivamente, gerando estruturas trativas perpendiculares à estas direções.



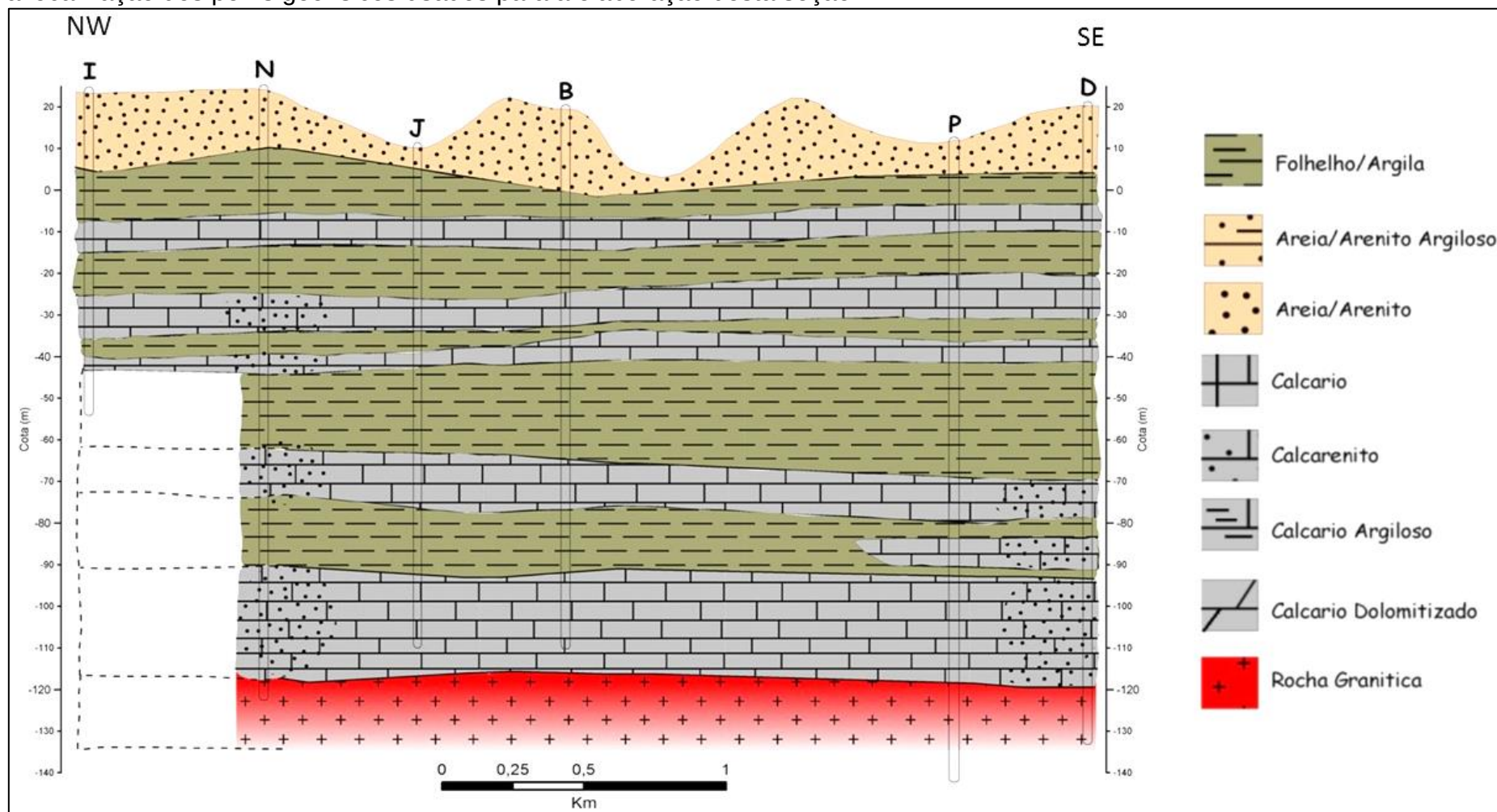
Fonte: Elaborado pelo autor.

Deste modo, levando em consideração os aspectos estruturais, o modelo que descreve a recarga dos aquíferos mais profundos da região ocorrendo em lugares mais distantes, onde suas rochas afloram, torna-se pouco plausível. A segmentação lateral dos estratos rochosos em diferentes partes apresentando deslocamentos verticais relativos entre si, coloca rochas com porosidades e permeabilidades diferentes em um mesmo patamar horizontal. Assim, uma massa hídrica subterrânea, ao se deslocar lateralmente através de uma camada permeável podem terminar por se deparar com uma outra impermeável, cessando o fluxo horizontal. Esta situação muito provavelmente ocorre em Salinópolis, visto que ali ocorrem dois blocos morfoestruturais (conforme o exposto na seção 5.3, nas figuras 5.3.1 e 5.3.2) com desnível de aproximadamente 15 metros entre eles (seção 2 na Figura 5.3.2), o que colocaria na mesma profundidade camadas permeáveis e impermeáveis, já que elas apresentam espessuras entre 5 a 30 metros - como foi mostrado por Freimann (2012) e Freimann (2014) no bloco oeste (Figura 6.2).

Existe, porém, um outro modelo para explicar a questão da recarga dos aquíferos mais profundos. Estruturas como falhas normais e juntas extensionais consistem em zonas de baixa pressão, propícias para a infiltração de fluidos em direção a níveis mais profundos. Em outras palavras, estas estruturas constituem áreas de recarga para os aquíferos presentes no subsolo da região, incluindo aqueles localizados em estratos em maiores profundidades, abaixo de 100 metros. Sendo assim, baseado nos aspectos geomorfológicos, geológicos e da rede de drenagem da área de estudo, acredita-se que esta hipótese é a mais adequada para explicar o mecanismo de recarga dos aquíferos mais profundos da região.

Desta forma, na área de estudo, pressupõe-se que os sistemas hidrogeológicos sejam recarregados de duas maneiras principais. Nos aquíferos livres, a recarga é realizada majoritariamente pela infiltração direta das águas superficiais nas formações rochosas expostas. Já nos mais profundos, a recarga seria dada diretamente pela infiltração ao longo de estruturas trativas, cujas principais são mostradas na Figura 6.3. Isso implica dizer que os aquíferos mais profundos associados aos sistemas Pirabas e Barreiras, apresentam, de maneira geral, características semi-confinadas, e não confinadas, como geralmente são descritos.

Figura 5.32: Seção NW-SE ao longo do bloco oeste (entre os rios Sampaio e Urindeua) em Salinópolis. I, N, J, B, P e D referem-se a localização dos perfis geofísicos usados para a elaboração desta seção.



Fonte: Modificado de Freimann (2014).

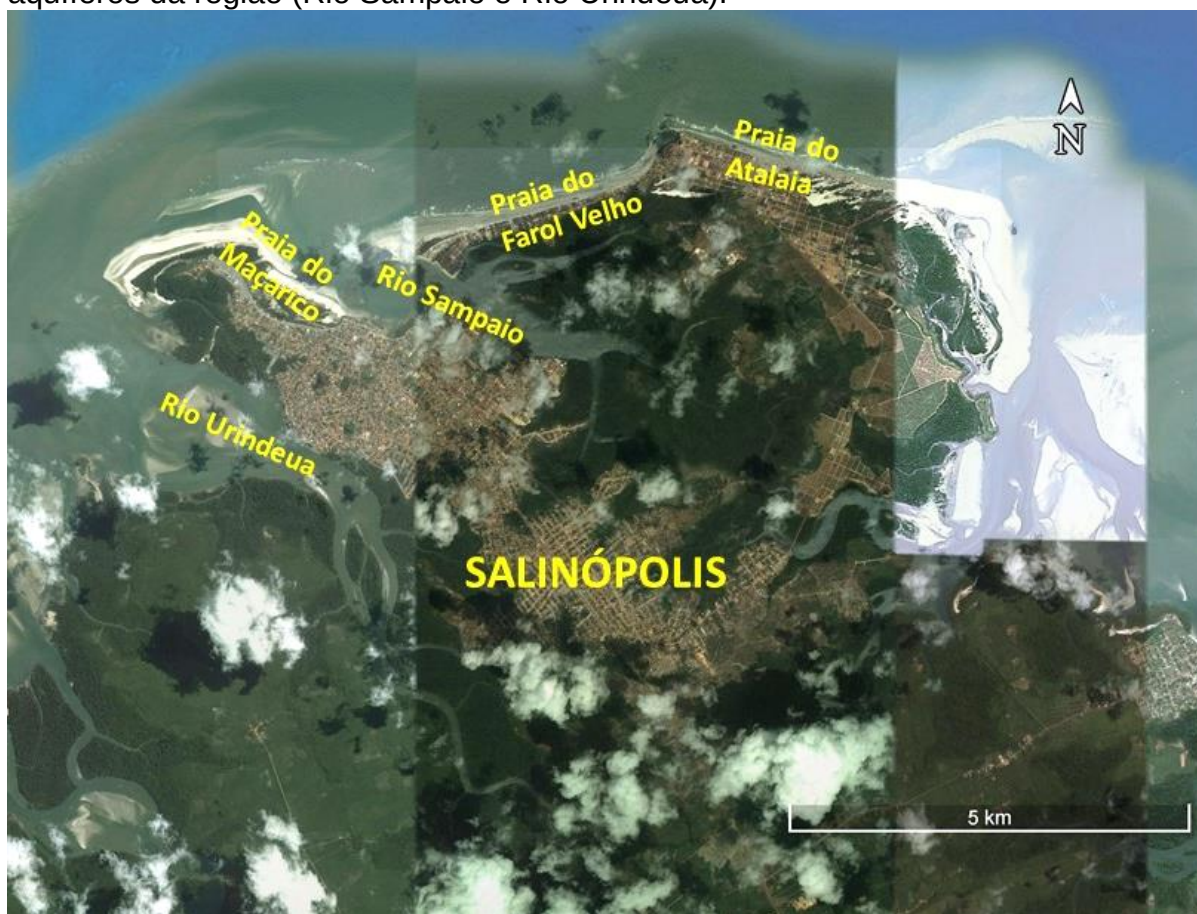
Figura 5.33: Mapa mostrando as principais áreas de recarga localizadas ao longo de estruturas tratativas presentes na área de estudo.



Fonte: Elaborado Pelo autor.

No município de Salinópolis, por exemplo, a Formação Pirabas aflora ao longo das praias do Maçarico, Atalaia e Farol Velho, sendo estes lugares já tradicionalmente reconhecidos como zonas de recarga dos aquíferos livres associados a esta unidade. A análise estrutural realizada neste presente trabalho sugere a presença de ao menos outras duas zonas de recarga nesta região, estando elas localizadas ao longo dos rios Urindeua e Sampaio, nos quais se identificou evidências da presença de zonas tratativas (figuras 6.3 e 6.4). Estas zonas permitiriam a percolação de água para os aquíferos mais profundos da região, associados tanto ao Grupo Barreiras quanto a Formação Pirabas.

Figura 5.34: Imagem de satélite do município de Salinópolis, destacando as áreas de recarga da Formação Pirabas (praias do Farol Velho, Maçarico e Atalaia) e dos demais aquíferos da região (Rio Sampaio e Rio Urindeua).



Fonte: Imagem GeoEye do Google Earth Pro.

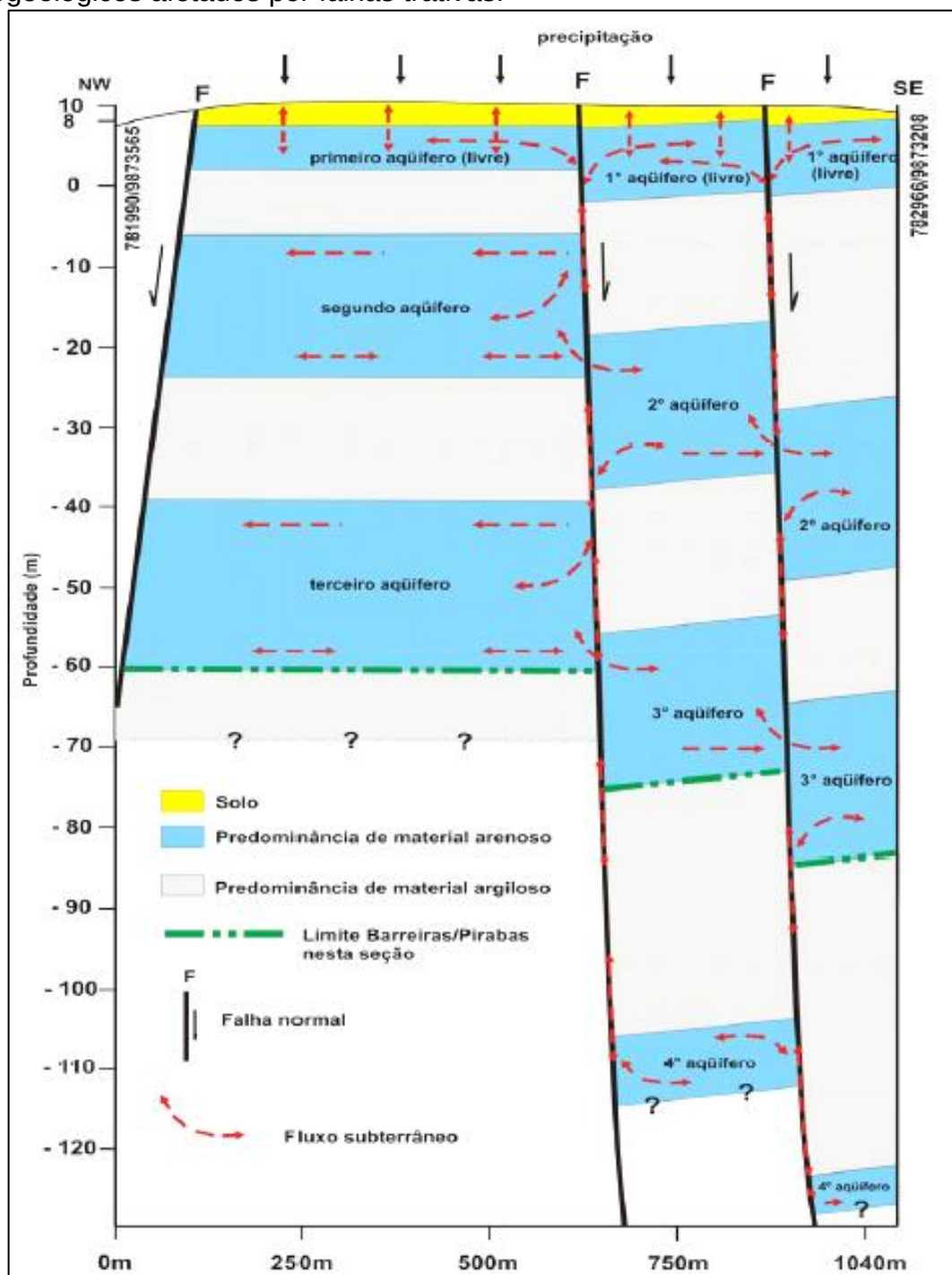
A presença de estruturas trativas atuando como zona de recarga de aquíferos mais profundos implica que os mesmos apresentam uma maior interação (em relação ao que se afirma normalmente) com os processos ocorridos na superfície e com os aquíferos mais rasos (Figura 6.4). Paranhos (2010) realizou um estudo que buscou a caracterização dos aspectos hidroquímicos dos sistemas aquíferos Pirabas e Barreiras em Icoaraci (região metropolitana de Belém). Este trabalho mostrou a ocorrência de uma “mistura” entre as águas de ambos os sistemas, o que corroborou a hipótese de Costa (2004), de que os aquíferos naquela região estão sendo abastecidos ao longo de falhas extensionais presentes naquela área. Assim, é de se esperar que algo similar esteja ocorrendo na área de pesquisa deste presente trabalho.

A incidência de um controle tectônico sobre a área de estudo também implica em modificações nos padrões de fluxo hidráulico subterrâneo. A presença de falhas deslocando camadas rochosas para diferentes patamares horizontais, a alteração da inclinação destas camadas e a exposição de rochas porosas (seja elas ao longo das paredes das falhas ou aflorando no solo) provoca, a nível macroscópico, a ocorrência de diferentes pressões uma mesma camada ou até em uma mesma profundidade. Consequentemente, os fluxos se tornam bem mais complexos do que normalmente se acredita, podendo ocorrer movimentos laterais (para as mais variadas direções), ascendentes e descendentes, mesmo em pequenas distâncias (Figura 6.5). Contudo, em meio a esta complexidade, é de se esperar a ocorrência de alguns padrões. Ao longo dos blocos, nos aquíferos insaturados, o fluxo tende a ocorrer na direção do caimento das camadas e será um tanto mais rápido quanto maior for o basculamento. Na seção 1 (Figura 5.3.2), por exemplo, se observa um possível padrão lístrico dos blocos, os quais apresentam caimentos aparentes para leste (no caso dos blocos mais a ocidentais) e para oeste (no caso dos blocos mais orientais). Em Salinópolis, acredita-se que o fluxo seja predominantemente de nordeste para sudeste, visto que a seção 2 (Figura 5.3.2) mostra um aparente arranjo lístrico dos dois blocos para esta direção (neste caso específico, a seção mostrada Figura 6.2 não mostra essa inclinação de maneira evidente, provavelmente por ter sido elaborada perpendicularmente a direção de caimento).

A provável modificação dos fluxos subterrâneos e a maior interação entre os corpos hídricos mais superficiais com os aquíferos mais profundos levaria a uma maior vulnerabilidade destes à contaminação em relação ao que se acreditava, visto que estes contaminantes podem percolar diretamente através das discontinuidades presentes para maiores profundidades, alterando a qualidade físico-química-biológica das águas ali armazenadas. Portanto, estas áreas devem ser preservadas da mesma maneira que aquelas onde afloram as rochas de alguma unidade que encerra um sistema hidrogeológico. Esta preservação deve ser no sentido de evitar ocupações urbanas nas proximidades das zonas de recarga, visto que isso normalmente acarreta em problemas como impermeabilização do solo, desmatamento (retirando uma proteção natural contra contaminantes) e destinação inadequado de resíduos de origem antrópica. Também deve se evitar a exploração irracional dos aquíferos através de poços, visto que estes, ao retirarem água da subsuperfície, aceleram os

fluxos da superfície em direção as camadas mais profundas no sentido de repor esta água que está sendo removida, o que, conseqüentemente, faz com que os contaminantes tendam a se disseminar para estas regiões de maneira igualmente mais rápida.

Figura 5.35: Modelo proposto por Palheta (2008) para a descrição dos mecanismos de infiltração, fluxo, recarga e interação de volumes aquosos em sistemas hidrogeológicos afetados por falhas trativas.



Fonte: Extraído de Palheta (2008).

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos no decorrer desse estudo foram adquiridos pela análise do relevo e da drenagem através de diferentes técnicas de sensoriamento remoto, o que constitui de uma metodologia essencialmente indireta, de modo que as evidências de atividades neotectônicas obtidas também são. Ainda assim, a metodologia utilizada se apoia em numerosos trabalhos que já demonstraram a eficiência dessas ferramentas, sendo um consenso de que a análise geomorfológica e da drenagem constitui um dos mais importantes instrumentos para estudos relacionados a manifestações neotectônicas, visto que as configurações desses elementos sofrem uma forte influência dos aspectos estruturais de uma determinada região. Além disso, os resultados alcançados são bastante similares aos de outros estudos realizados nas proximidades da área de pesquisa.

A utilização de um ambiente SIG para a inserção dos dados levantados no decorrer deste trabalho e dos disponíveis em outras bases se mostrou de grande utilidade, pois permitiu uma análise mais dinâmica e integrada dos mesmos.

Os resultados sugerem indícios de que a região de Salinópolis, assim como todo o nordeste do Pará, vem sofrendo a atuação de um regime neotectônico de características transtrativas, o que pode estar associado a rotação da Placa Sul-Americana para oeste, causada pela atuação de um binário dextral E-W, conforme o trabalho de Costa et al. (1991).

A presença de um controle estrutural apresenta consequências diretas nos aspectos hidrogeológico da região. A provável atuação de falhas trativas orientadas nas direções N-S e NW-SE modificaria os padrões de fluxo subterrâneo, tornando-os bem mais complexos em relação ao que normalmente se acreditava, além de aumentar a interação entre as massas hídricas armazenadas em aquíferos localizados em diferentes profundidades.

Ressalta-se que as prováveis falhas trativas presentes na região constituem importantes áreas de recarga para o sistema hidrogeológico como um todo. Deste modo, caso sejam comprovadas, recomenda-se que as regiões no entorno destas estruturas sejam preservadas, no sentido de evitar a penetração de contaminantes em direção as águas armazenadas em subsuperfície, as quais constituem um

importante recurso natural, por ocorrerem em volumes maiores e com melhores qualidades físico-químicas quando comparados aos mananciais superficiais. Ademais, vale advertir que, uma vez comprometidos, a recuperação destes recursos é bem mais difícil e custosa em relação aos que ocorrem expostos na superfície. Também deve-se ter um maior cuidado no dimensionamento de grandes construções ao longo destas estruturas, pois além de representarem potenciais contaminantes, elas estarão sujeitas a atividades sísmicas mais elevadas, o que a médio prazo pode gerar danos ao arcabouço das mesmas.

Por fim, para estudos posteriores na região, recomenda-se:

- A realização de atividades de campo sistemáticas que visem detectar com maior detalhe e precisão e a ocorrência dessas estruturas neotectônicas.
- Utilização de métodos geofísicos para definir a extensão e a profundidade que atingem estas feições estruturais, bem como a geometria dos pacotes sedimentares e como eles estão sendo afetados pelas mesmas. Para este fim, destaca-se algumas técnicas envolvendo sísmica de reflexão, magnetometria, gravimetria e tomografia de resistividade elétrica.
- Elaboração de mapas de fluxo subterrâneo para se definir os padrões de circulação hidráulicos no subsolo, podendo auxiliar a gestão dos recursos hídricos.
- Realização de análises geocronológicas de isótopos como Trítio e Carbono-14 para a determinação da idade das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, F. P. C.; MATTA, M. A. S.; SILVA, L. S. E.; PINHO, B. C. P.; RODRIGUES, E. S. F.; OLIVEIRA, H. C. S.; CARMONA, K. M.; NOVAES, L. F. R.; ASSIS, J. F. P. 2012. Problemas ambientais da ocupação urbana de Salinópolis - Pará e sua influência no abastecimento de água local. In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17., 2012, Bonito, MS. *Anais...* Bonito, MS: ABAS, 2012.
- BANDEIRA, I. C. N. *Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal / PA*. 2008. 144 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.
- BOULHOSA, M. B. M.; SOUZA FILHO, P. W. M. Reconhecimento e mapeamento dos ambientes costeiros para geração de mapas de ISA ao derramamento de óleo, Amazônia Oriental. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, p. 1-14, 2008.
- CARMONA, K. M. *Hidrogeoquímica e Neotectônica da Bacia Hidrográfica do Rio Tauá, Nordeste do Pará*. 2013. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2013.
- CENTENO, V. V.; SILVA JR., O. G. Utilização dos softwares Google Earth Pro e Zoner Photo Studio para a obtenção de imagens 3D. 2015. In: JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DOS GRUPOS PET, 11., 2015, Belém, PA. *Anais...* Belém, PA: PET Farmácia UFPA, 2015.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1980. 101 p.
- CLIMATEMPO. 2016. *Climatologia, Salinópolis – PA*. Disponível em < <http://www.climatempo.com.br/climatologia/1212/salinopolis-pa> >. Acesso em: 2 ago. 2016.
- COSTA, F. R. DA. *Influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na Região Metropolitana de Belém*. 2004. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.
- COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; BORGES, M. S.; JUNIOR, C.R.P.F.; BEZERRA, P. E. L.; COSTA, M. L.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica da região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, v.4, n. 2, p. 23-44, 1996.
- COSTA, J. B. S.; BORGUES, M. S.; BEMERGUY, R. L.; IGREJA, H. L. S.; PINHEIRO, R. V. L. 1991. Aspectos da Tectônica Cenozóica na Região do Salgado, Litoral NE do Estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 3., 1991, Belém, PA. *Anais...* Belém, PA: SBG-NO, 1991.
- EL-ROBRINI, M.; MORENO, M. A. M. S.; SOUZA FILHO, P. W. M. E.; EL-ROBRINI, M. H. S.; SILVA JÚNIOR, O. G.; FRANCA, C. F. Atlas de erosão e progradação da Zona Costeira do Estado do Pará - Região Amazônica: Áreas Oceânicas e Estuarinas. In: MUEHE, D. (Org.). *Atlas de Erosão e Progradação da Zona Costeira Brasileira*. São Paulo: [s. n.], 2006. p. 1-34.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J. *Hidrogeologia: conceitos e aplicações*. 2 ed. Fortaleza: CPRM, 2008, 391 p.

FERREIRA, C. S. 1982. Notas Estratigráficas sobre o Cenozóico marinho do estado do Pará. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 1., 1982, Belém, PA. *Anais...* Belém, PA: SBG, 1982.

FITZ, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 160 p.

FOSSEN, H. *Geologia Estrutural*. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012, 584 p.

FREIMANN, B. C. *Correlação de perfis geofísicos de poços – Salinópolis-Pa*. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2012.

FREIMANN, B. C. *Estudo hidrogeológico através de perfis geofísicos de poços e sondagens elétricas verticais (SEV's) – Salinópolis-PA*. 2014. 47 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) - Belém: Universidade Federal do Pará. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2014.

GÓES, A. M.; ROSSETTI, D. F.; NOGUEIRA, A. C. R.; TOLEDO, P. M. Modelo deposicional preliminar da Formação Pirabas no nordeste do estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 2, n. 1, p. 3-15, 1990.

HASUI, Y. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. 1990. In: WORKSHOP SOBRE NEOTECTÔNICA E SEDIMENTAÇÃO CENOZÓICA CONTINENTAL NO SUDESTE BRASILEIRO, 1., 1990, Belo Horizonte, MG. *Anais...* Belo Horizonte, MG: SBG-MG, 1990.

HASUI, Y. Evolução geológica da Amazônia. 1996. In: SIMPÓSIO DA GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 5., 1996, Belém, PA. *Boletim de resumos expandidos*. Belém, PA: SBG, 1996.

HASUI, Y. Regimes tectônicos. In: HASUI, Y; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (Org.). *Geologia do Brasil*. 1 ed. São Paulo: Beca, 2012, p. 47-64.

HOBBS, B. E.; MEANS, W. D; WILLIAMS, P. F. *An Outline of Structural Geology*. 1 ed. New York: John Wiley & Sons, 1976. 512 p.

IBGE. 2013. *Mapeamento Sistemático*. Disponível em <ftp://geofp.ibge.gov.br/mapeamento_sistematico/>. Acesso em: 2 ago. 2016.

LIMA, C. C. U. O neotectonismo na costa do Sudeste e do Nordeste brasileiro. *Revista de Ciência & Tecnologia*, v. 8, n.15, p. 91-101, 2000.

LIMA, M. I. C. *Análise de Drenagem e seu Significado Geológico-Geomorfológico*. 2002. Apostila Digital. Disponível em <<http://www.neotectonica.ufpr.br/geomorfologia/1.pdf>>. Acesso em: 4 ago. 2016.

LOPES, P. C.; DUARTE, K. A. C.; CUNHA, B. J. C.; MELO, G. T. M. Mapeamento da Vulnerabilidade de Aquíferos: Subsídio Gerencial dos Recursos Hídricos Subterrâneos de Salinópolis/PA. 2012. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 17., 2012, Bonito, MS. *Anais...* Bonito, MS: ABAS, 2012.

LISBOA FILHO, J.; IOCHPE, C. 1996. *Introdução a Sistemas de Informações Geográficas com Ênfase em Banco de Dados*. Apostila Digital. Disponível em < <http://www.dpi.ufv.br/~jugurta/papers/sig-bd-jai.pdf> >. Acesso em: 4 ago. 2016.

MATTA, M. A. S. Perigo de Salinização da Água Subterrânea de Salinópolis/PA. *Abastece*, v. 2, n. 8, p. 16-16, 2001.

MATTA, M. A. S. *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. 2002. 292 p. Tese de Doutorado (Doutorado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2002.

OLIVEIRA, J. R.; MATTA, M. A. S.; VIEIRA, R.; PONTES, A. Exploração dos aquíferos costeiros em Salinópolis e arredores. 2006. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 14., 2006, Curitiba, PR. *Anais...* Curitiba, PR: ABAS, 2006.

PALHETA, E. S. DE M. *Estudo da compartimentação e arcabouço neotectônico da ilha de Mosqueiro, Pará, empregado na prospecção hídrica subterrânea*. 2008. 269 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2008.

PARANHOS, P. F. *Caracterização hidroquímica do sistema aquífero Pirabas na região de Icoaraci, Região metropolitana de Belém - Estado do Pará*. 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2010.

REBOUÇAS, A. C. *Fundamentos de Gestão de Aquíferos*. 1994. Curso Pré-Congresso. In: CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 2., 1994. ALHSUD. Santiago/Chile. 35 p.

ROSSETTI, D. F. Evolução Sedimentar Miocênica nos estados do Pará e Maranhão. *Geologia USP. Série Científica*, v. 6, p. 7-18, 2006.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. Geologia. In: ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. (Org.). *O Neógeno da Amazônia Oriental*. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2004, p. 13-52.

SAADI, A. Neotectônica da Plataforma Brasileira: esboço e interpretação preliminares. *Geonomos*, v.1, n. 1, p. 1-15, 1993.

SILVA, J. M. L.; OLIVEIRA JUNIOR, R. C.; RODRIGUES, T. E. 1994. Levantamento de reconhecimento de alta intensidade dos solos da Folha Salinópolis. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, v. 6, p. 59-90, 1994.

SOARES, P. C; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícia Geomorfológica*, v. 16, n. 32, p. 71–104, 1976.

STEWART, L. S.; HANCOCK, P. L. Neotectonics. In: HANCOCK, P.L. (Org.). *Continental Deformation*. New York: Pergamon Press, 1994, p. 370 – 409.

TÁVORA, V. A.; FERNANDES, A. C. S.; FERREIRA, C. S. 2002. Ilha de Fortaleza, PA- Expressivo registro de fósseis do Cenozóico marinho do Brasil. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D. A.; QUEIROZ, E. T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. L. C. (Org.). *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília: Departamento nacional da Produção Mineral, 2002, v. 1, p. 139-145.

TÁVORA, V. A.; SANTOS, A. A. R.; ARAÚJO, R. N. Localidades fossilíferas da Formação Pirabas (Mioceno Inferior). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais*, v. 5, n. 2, p. 207-224, 2010.

TÁVORA, V. A.; SANTOS, A. A. R.; NOGUEIRA NETO, I. L. A. Eventos biológicos da Formação Pirabas (Mioceno Inferior). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 40, n. 2, p. 256-264, 2010.

USGS. 2015. *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. Disponível em <<https://lta.cr.usgs.gov/SRTM>>. Acesso em: 2 ago. 2016.