

Universidade de São Paulo

Instituto de Geociências

Condicionantes da Produtividade dos Aquíferos Fraturados na Região de Mombaça,  
Semiárido Cearense

Monografia

TF-18/21

Aluno: Juliana Alves Viana Aguiar

Orientador: Ricardo Hirata

Coorientadora: Daniela Barbaty Osório

Trabalho de formatura apresentado  
ao curso de Geologia da Universidade  
de São Paulo para obtenção do título  
de Bacharel em Geologia.

São Paulo (SP)

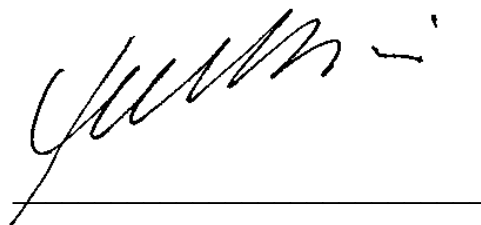
2018

Condicionantes da Produtividade dos Aquíferos Fraturados na Região de Mombaça,  
Semiárido Cearense.

De acordo,

---

Aluno: Juliana Alves Viana Aguiar



---

Orientador: Ricardo Hirata

Aos meus amados pais, por  
sempre acreditarem e investirem  
em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

A realização do sonho de me tornar geóloga tornou-se possível graças ao apoio, ajuda e participação de pessoas que tive o prazer de conhecer ao longo da minha caminhada, às quais registro aqui a minha sincera gratidão.

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, Rita e José Viana, por todo amor, apoio, dedicação e paciência que nunca faltaram ao longo da minha vida e pela enorme oportunidade de realizar um sonho. Sem o esforço de vocês, me tornar geóloga não seria possível.

À minha irmã Carolina, a quem me espelhei tantas vezes e que me serviu de exemplo para essa conquista. Obrigada pela ajuda e incentivo em minhas escolhas.

À minha família, em especial, vó Celina, vô Levino (in memoriam), vó Valda, vô José, minhas madrinhas, Zezé e Dete, e tia Cleide. Obrigada pelas orações e palavras de carinho.

Ao Theo, meu cachorrinho, pela companhia de todas as horas, pelos abraços e beijocas e pelo amor incondicional.

Ao meu melhor amigo e namorado, Denis, que compreendeu minha ausência pelo tempo dedicado aos estudos. Obrigada pela paciência, espera, compreensão, apoio e por proporcionar momentos agradáveis e inesquecíveis ante a esse ano de tensão.

Aos amigos de longa data, Thais, Daiana, Alisson, Vitória, Theo, Erika, Talita, Orlando, Ivan e Bruno, que participaram de todos os momentos e que sempre torceram e me apoiaram. Obrigada por permanecerem sempre comigo.

Aos bons amigos que fiz na graduação e que desde o princípio foram meus companheiros de quarto, almoço, campo e trabalhos. Obrigada Bruno (Tutu), Aghata e Bruna, pelas risadas, camaradagem e boa companhia. Para nós, eu desejo: “Alegria agora. Agora e amanhã. Alegria agora e depois. E depois e depois de amanhã”.

À Marcela (Crô), a quem tive oportunidade de conhecer melhor no nosso último ano de graduação, por sempre me ouvir, compartilhar histórias, sentimentos e reclamações, e colocar minha autoestima lá no alto.

Ao meu orientador Ricardo Hirata e coorientadora Daniela, pela orientação, sugestões, cuidado e conhecimentos transmitidos ao longo desse ano.

À Amélia Fernandes e André Negrão pelo tempo dedicado e pelas contribuições para o enriquecimento do conteúdo deste documento.



Ao geólogo Gustavo Moraes e sua esposa, Edlayne Pimentel, pela prestatividade em discutir os métodos aplicados nesse estudo.

Aos meus colegas, amigos e geólogos da turma 57 pela agradável convivência nesses 5 anos e por me proporcionarem momentos divertidos durante a rotina de faculdade. Estes são: Tom, Lucas Vinícius (Gretchen), Yuri (Mama), Jéssica (Indi), Elis (Pitolé), Danilo (Loló), Rafael (Bilbo), Kaun (Sacolé), Lucas (Carioca), Marília (Madre) e Luis Felipe (Brioco).

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, pela excelente infraestrutura e por todas as oportunidades que esta instituição me ofereceu ao longo da graduação e a seus funcionários e corpo docente que muito contribuíram para meu aprendizado.

“A felicidade aparece para aqueles que reconhecem a importância das pessoas que passam em nossas vidas”. (Clarice Lispector)

## RESUMO

Períodos de secas na região semiárida do Nordeste têm causado grandes perdas econômicas e de vidas. Nos recentes anos de 1980, mais de dois milhões de pessoas morreram em decorrência da seca. Em 2017, teve fim um de seus períodos mais agudos, que durou seis anos, mas que não causou mortes, devido às várias estratégias de governo de convivência com a seca. O estado do Ceará apresenta cerca de 95% de seus municípios inseridos na região do semiárido. Sua população, que tem elevado percentual rural e com alto índice de pobreza, sofre com a deficiência hídrica, com o regime de chuvas irregular e com as elevadas temperaturas. A falta de água na região é ainda mais grave em virtude do predomínio de aquíferos cristalinos de baixa produção, que perfazem 75% do território, e que não são totalmente compreendidos, principalmente devido à sua heterogeneidade e descontinuidade. Para identificar quais características regem seu fluxo, o presente estudo analisou a produtividade de poços tubulares instalados na região de Mombaça, por meio de técnicas envolvendo análise litológica e geomorfológica e interpretação de lineamentos. Gnaisses são mais produtivos quando comparados às rochas máficas e ultramáficas (capacidade específica mediana de 0,045 m<sup>3</sup>/h/m para os gnaisses e de 0,01 m<sup>3</sup>/h/m para as rochas máficas e ultramáficas) e, para a técnica aplicada, os fatores geomorfológicos apresentam os melhores resultados, demonstrando que regiões aplainadas, rebaixadas e com cotas baixas são as mais favoráveis à melhor produtividade dos poços. Já os lineamentos traçados em modelos digitais de terreno não demonstram uma clara relação com a produtividade dos poços, indicando que as técnicas de geoprocessamento precisam ser complementadas com mapeamento em campo, com medidas de direção e mergulho das famílias de fraturas, principalmente as geradas no período geológico mais recente.

**Palavras-chave:** aquíferos cristalinos, condicionantes da circulação da água subterrânea, semiárido.

## ABSTRACT

Drought periods in the semi-arid region of the Northeast have caused great economic and lives losses. In the late 1980s, more than two million people died as a result of the drought. In 2017, one of its most acute periods, which lasted six years, ended, but did not cause deaths, due to the various government strategies of coexistence with the drought. The state of Ceará presents about 95% of its municipalities in the semi-arid region. Its population, which has a high rural percentage and a high poverty rate, suffers from water deficiency, irregular rainfall and high temperatures. The lack of water in the region is even more serious because of the predominance of crystalline aquifers of low production, which make up 75% of the territory, and which are not fully understood, mainly due to their heterogeneity and discontinuity. In order to identify which characteristics rules its flow, the present study analyzed the tubular wells productivity installed in the Mombaça region, through techniques involving lithological and geomorphological analysis and interpretation of lineaments. Gneisses are more productive when compared to mafic and ultramafic rocks (median specific capacity of 0,045 m<sup>3</sup> / h / m for gneisses and 0,01 m<sup>3</sup> / h / m for mafic and ultramafic rocks) and, for the applied technique, the geomorphological factors show better results, demonstrating that flattened, lowered and low-lying regions are the most favorable for wells best productivity. However, the lineaments drawn in digital terrain models does not demonstrate a clear relation with well productivity, indicating that geoprocessing techniques need to be complemented with field mapping, with direction and dip measures of fracture families, especially those generated in the most recent geological period.

**Keywords:** crystalline aquifers, conditioners of groundwater circulation, semi-arid.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Localização da área de estudo.....                                                                                | 16 |
| Figura 2: Geologia da área de estudo.....                                                                                   | 19 |
| Figura 3: Hidrogeologia do semiárido cearense.....                                                                          | 23 |
| Figura 4: Os três modos de propagação de fraturas: I, opening, II, slinding e III, tearing. (Lawn e Wilshaw,1993).....      | 26 |
| Figura 5: Distribuição dos poços e produção.....                                                                            | 34 |
| Figura 6: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os poços da área de estudo.....             | 35 |
| Figura 7: Frequência (em %) dos valores de capacidade específica para os poços da área de estudo.....                       | 35 |
| Figura 8: Grupos litológicos e distribuição dos poços.....                                                                  | 37 |
| Figura 9: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os grupos litológicos.....                  | 38 |
| Figura 10: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para os grupos litológicos.....                                | 38 |
| Figura 11: Compartimentos geomorfológicos e distribuição dos poços.....                                                     | 40 |
| Figura 12: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os compartimentos geomorfológicos.....     | 41 |
| Figura 13: Frequência (%) e valor absoluto de poços secos por compartimento geomorfológico.....                             | 41 |
| Figura 14: Hipsometria e distribuição dos poços.....                                                                        | 43 |
| Figura 15: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para as classes altimétricas.....               | 44 |
| Figura 16: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos por classe altimétrica.....                                    | 44 |
| Figura 17: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para as diferentes feições geomorfológicas..... | 45 |
| Figura 18: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para as diferentes feições geomorfológicas.....                | 46 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 19: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções do conjunto total de lineamentos presentes na área de estudo. Intervalo de cada barra igual a 10°.....                                                                                | 47 |
| Figura 20: Diagrama de rosáceas com os valores do comprimento acumulado dos lineamentos (em metros) para cada direção, para o conjunto total de lineamentos presentes na área de estudo. Intervalo de cada barra igual a 10°.....                                      | 47 |
| Figura 21: Lineamentos regionais e compartimentos estruturais.....                                                                                                                                                                                                     | 50 |
| Figura 22: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os diferentes compartimentos estruturais.....                                                                                                                                         | 51 |
| Figura 23: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para os diferentes compartimentos estruturais.....                                                                                                                                                        | 51 |
| Figura 24: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s < 0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 14 dados de lineamentos.....             | 52 |
| Figura 25: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s$ entre 0,01-0,06 $\text{m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 42 dados de lineamentos.....   | 52 |
| Figura 26: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s$ entre 0,06-0,4 $\text{m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 26 dados de lineamentos.....    | 53 |
| Figura 27: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s$ entre 0,4-4,16 $\text{m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.....    | 53 |
| Figura 28: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s < 0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 10 dados de lineamentos.....           | 53 |
| Figura 29: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s$ entre 0,01-0,06 $\text{m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 24 dados de lineamentos..... | 54 |
| Figura 30: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe $Q/s$ entre 0,06-0,4 $\text{m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.....  | 54 |

|                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 31: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe Q/s entre 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual 10° e 10 dados de lineamentos..... | 54 |
| Figura 32: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento regional primário.....                                                                                                                                           | 55 |
| Figura 33: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento regional primário.....                                                                                                                                                 | 56 |
| Figura 34: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento regional secundário.....                                                                                                                                         | 56 |
| Figura 35: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento regional secundário.....                                                                                                                                               | 57 |
| Figura 36: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s < 0,01 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 16 dados de lineamentos.....          | 58 |
| Figura 37: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,01-0,06 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 49 dados de lineamentos.....       | 58 |
| Figura 38: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,06-0,4 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 29 dados de lineamentos.....        | 58 |
| Figura 39: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 16 dados de lineamentos.....        | 59 |
| Figura 40: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s <0,01 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.....         | 59 |
| Figura 41: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,01-0,06 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 47 dados de lineamentos.....     | 59 |
| Figura 42: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,06-0,4 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 28 dados de lineamentos.....      | 60 |

|                                                                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 43: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos..... | 60 |
| Figura 44: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento local primário.....                                                                                                                                         | 61 |
| Figura 45: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento local primário.....                                                                                                                                               | 61 |
| Figura 46: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento local secundário.....                                                                                                                                       | 62 |
| Figura 47: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento local secundário.....                                                                                                                                             | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Valores estatísticos de capacidade específica..... | 33 |
|--------------------------------------------------------------|----|

## SUMÁRIO

|                                                                              |           |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                                          | <b>14</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b>                                                           | <b>15</b> |
| <b>3 ÁREA DE ESTUDO</b>                                                      | <b>15</b> |
| 3.1 Localização                                                              | 15        |
| 3.2 Clima                                                                    | 17        |
| 3.3 Geologia                                                                 | 17        |
| 3.4 Geomorfologia                                                            | 21        |
| 3.5 Hidrogeologia                                                            | 21        |
| <b>4 CONDICIONANTES DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFEROS FRATURADOS</b> | <b>24</b> |
| 4.1 Litologia                                                                | 24        |
| 4.2 Compartimentos topográficos                                              | 24        |
| 4.3 Presença e espessura de cobertura sedimentar                             | 25        |
| 4.4 Clima                                                                    | 25        |
| 4.5 Tectônica                                                                | 26        |
| 4.5.1 Neotectônica                                                           | 27        |
| <b>5 TECTÔNICA CENOZÓICA DO NORDESTE BRASILEIRO</b>                          | <b>28</b> |
| <b>6 MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                 | <b>29</b> |
| 6.1 Revisão bibliográfica                                                    | 29        |
| 6. 2 Compilação e tratamento de dados hidrogeológicos                        | 29        |
| 6.3 Compartimentação litológica                                              | 30        |
| 6.4 Compartimentações e classificações geomorfológicas                       | 30        |



|                                                                                                |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>6.5 Traçado de lineamentos estruturais regionais e locais e compartimentação estrutural</b> | <b>31</b> |
| <b>7 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                                                               | <b>33</b> |
| <b>7.1 Características gerais dos poços</b>                                                    | <b>33</b> |
| <b>7.2 Produtividade segundo a litologia</b>                                                   | <b>36</b> |
| <b>7.3 Produtividade segundo a geomorfologia</b>                                               | <b>39</b> |
| 7.3.1 <i>Compartimentos geomorfológicos</i>                                                    | 39        |
| 7.3.2 <i>Classificação altimétrica</i>                                                         | 42        |
| 7.3.3 <i>Feições geomorfológicas</i>                                                           | 45        |
| <b>7.4 Produtividade segundo a geologia estrutural</b>                                         | <b>46</b> |
| 7.4.1 <i>Análise regional</i>                                                                  | 47        |
| 7.4.1.1 Compartimentos estruturais                                                             | 48        |
| 7.4.1.2 Análise dos lineamentos em escala 1: 100.000                                           | 52        |
| 7.4.2 <i>Análise local</i>                                                                     | 57        |
| 7.4.2.1 Análise dos lineamentos em escala 1:25.000                                             | 57        |
| <b>8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                                                            | <b>63</b> |
| <b>9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>                                                            | <b>64</b> |

## **APÊNDICES**

Apêndice A: Poços com capacidade específica x condicionantes físicos

## 1 INTRODUÇÃO

O semiárido cearense possui um reconhecido histórico de secas e recentemente enfrentou um dos períodos mais agudo já registrado (Funceme, 2016). A área expõe um quadro castigado pelos fatores climáticos adversos, com escassez e má distribuição das chuvas, evapotranspiração elevada e temperaturas relativamente altas (Silva et al., 2010), que impactam diretamente a disponibilidade hídrica superficial e subterrânea. Adicionado a isso, há predomínio de unidades geológicas cristalinas, cuja circulação das águas subterrâneas depende de fraturamentos, e que, no caso do Ceará, têm como características marcantes a baixa produtividade e alta salinidade na água (Medeiros et al., 2011).

Como estratégia de convívio com a seca, a água subterrânea tem sido umas das alternativas para suprir a demanda hídrica da população que vive no semiárido. O Governo do Estado do Ceará, por meio do Plano Estadual de Convivência com a Seca, perfurou novos poços tubulares, atingindo a meta de 100 poços perfurados a cada mês, como estratégia de minimização dos impactos da seca, de acordo com a sua política de oferta de água para abastecimento humano, consumo animal e atividades produtivas. O plano foi estabelecido em 2015 e constitui medidas emergenciais, estruturantes e complementares para cinco linhas de atuação: segurança hídrica, segurança alimentar, benefícios sociais, sustentabilidade econômica e conhecimento e inovação (Governo do Estado do Ceará, 2015). Para estabelecer as áreas mais críticas e prioritárias, esse programa conta com o apoio da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), do Comitê Integrado de Combate à Seca – CICS e da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). A COGERH é a instituição responsável pelo gerenciamento dos recursos hídricos do estado do Ceará e atua como gestora, promovendo apoio técnico e logístico para o processo de alocação negociada de água e formação de Comitês de Bacias e Comissões Gestoras (Lima e Sales, 2015). É parceira do CEPAS|USP (Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas) e disponibilizou dados contendo informações sobre localização, nível estático e dinâmico, vazão, perfuradores e ano de construção de 569 poços perfurados entre 2015 e 2018 na região de Mombaça. A área pertence ao semiárido do Ceará, está inserida no domínio de rochas cristalinas e, por conseguinte, enfrenta dificuldades de acesso à água.

Assim, esse projeto de pesquisa procurou definir quais variáveis geológicas possuem maior influência na produtividade de poços tubulares perfurados em terrenos cristalinos. Para tanto, avalia os condicionantes litológicos, estruturais e geomorfológicos da circulação da água subterrânea nos reservatórios subterrâneos fraturados na região de Mombaça.

## **2 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é estabelecer os condicionantes geológico-estruturais e geomorfológicos que controlam a produtividade de poços tubulares em aquíferos fraturados na região de Mombaça, no semiárido do estado do Ceará.

Os objetivos específicos são:

- Avaliar a produtividade de poços tubulares disponibilizados pela COGERH;
- Caracterizar a geologia, a geologia estrutural e a geomorfologia com base na compilação e análise de mapas, em escalas regionais e locais;
- Confrontar as interpretações dos dados hidrogeológicos com cartografias geológicas existentes e com os novos mapas produzidos.

## **3 ÁREA DE ESTUDO**

### **3.1 Localização**

A região estudada, que engloba Mombaça e parte de Pedra Branca e Boa Viagem, se localiza no centro oeste do estado do Ceará (Figura 1). Os principais acessos se dão a partir da BR 020 e BR 226, com Boa Viagem cerca de 221 km de distância de Fortaleza, capital cearense.

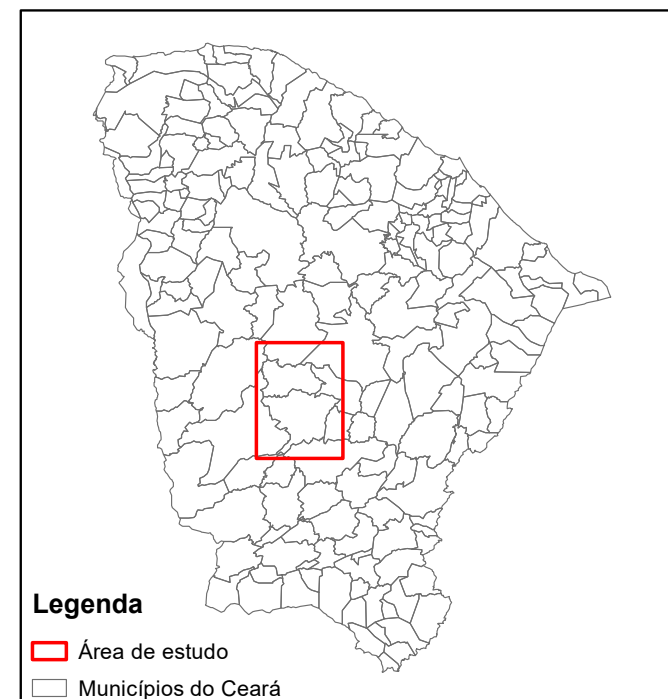
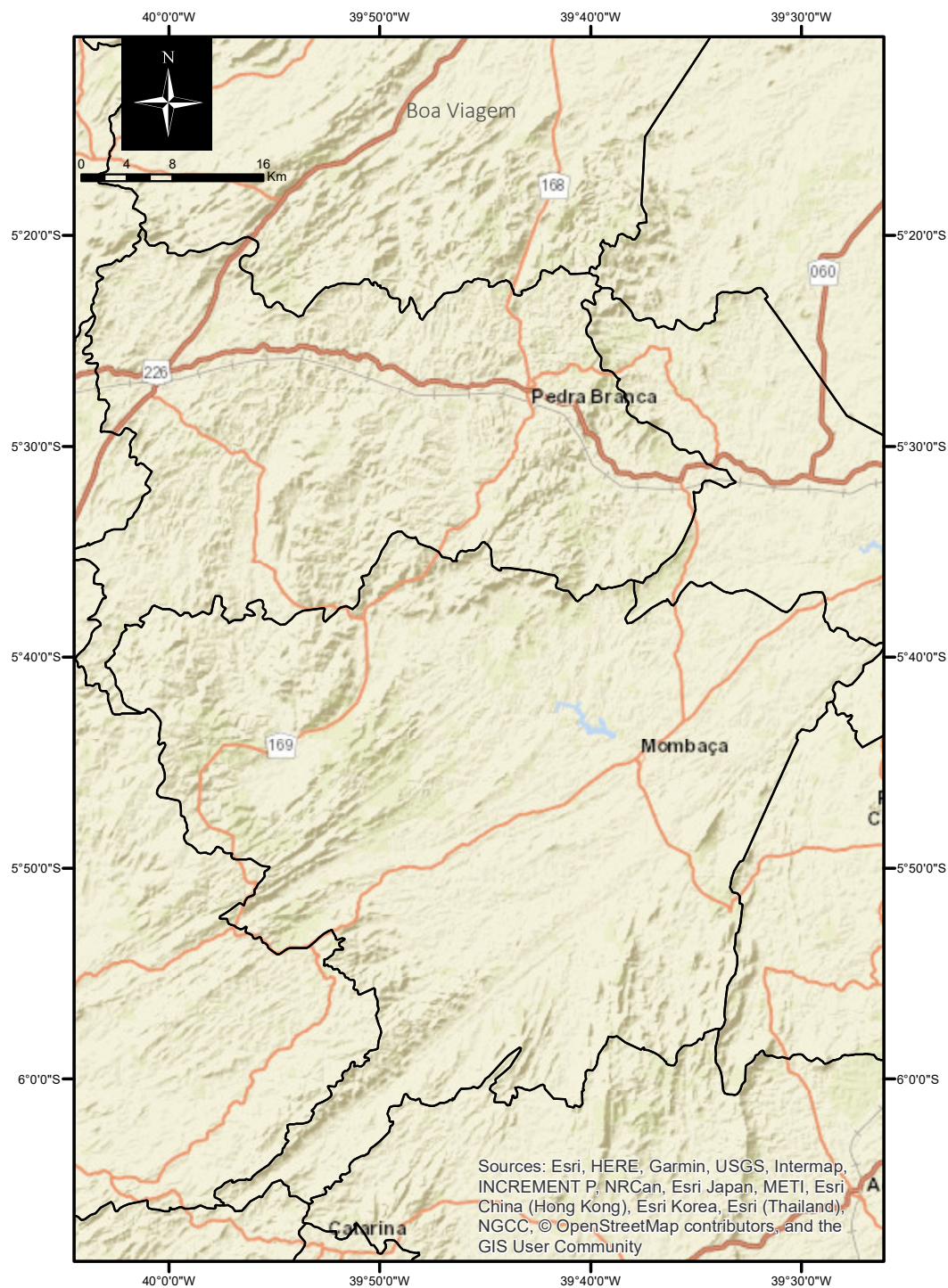


FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)  
GOOGLE EARTH- WORLD STREET MAP

### **3.2 Clima**

Localizada na porção centro oeste do estado do Ceará, a área de estudo está inserida na região do semiárido. A região semiárida brasileira foi delimitada em 1989, pela Lei Federal nº 7.827, de 27 de setembro de 1989 e, em conformidade com a Portaria Interministerial nº1, de 09 de março de 2005 e com as Resoluções do Conselho Deliberativo da Sudene de nº 107, de 27/07/2017 e de nº 115, de 23/11/2017, teve novos critérios para sua delimitação definidos. Além do critério estabelecido na Lei nº 7.827, de precipitação pluviométrica média anual igual ou inferior a 800 mm, os novos critérios definidores de clima semiárido estabelecem Índice de Aridez de Thornthwaite igual ou inferior a 0,50 e percentual diário de déficit hídrico igual ou superior a 60%, considerando todos os dias do ano.

A região é caracterizada por uma precipitação anual máxima de 800 mm, temperaturas relativamente altas, com médias anuais de 23 °C a 27 °C, elevada evapotranspiração e regime de chuvas concentrado e irregular, em média, de três a quatro meses e variabilidade interanual, provocando períodos prolongados e recorrentes de estiagem (Silva, 2010).

### **3.3 Geologia**

Tectonicamente, os municípios estudados estão inseridos no setor setentrional da Província Borborema, no Domínio Ceará Central. As principais unidades geológicas presentes na área de estudo podem ser vistas na Figura 2.

A Província Borborema foi definida por Almeida et al. (1997) como uma faixa móvel formada durante o ciclo Brasileiro-Pan-Africano, e é o resultado da aglutinação dos continentes da América do Sul, África, Austrália, Índia e Antártica, que culminou com a formação do Supercontinente Gondwana, durante o Proterozóico. A maior parte de sua área de exposição no Ceará corresponde a Subprovíncia Setentrional, que é dividida nos domínios Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte (Brandão e Freitas, 2014).

O Domínio Ceará Central é limitado pelas zonas de cisalhamentos Sobral Pedro II e Senador Pompeu e se compõe principalmente pelo Complexo Cruzeta, ou Complexo Cristalino, de faixas de metassedimentos proterozóicos, a exemplo da Série Ceará (Campelo, 1999), pelo complexo granítico-migmatítico Tamboril-Santa Quitéria, além de intenso plutonismo sin, tardi e pós-tectônicos.

O Complexo Cruzeta, formado pelas unidades Mombaça, Pedra Branca e Troia (Hasui, 2012), tem idade paleoproterozóica a arqueana e é constituído essencialmente por uma associação gnáissico-migmatítica, além de micaxistos, quartzitos, rochas calciosilicáticas, metacalcários, e intrusões de rochas ígneas básicas e ácidas (Sobrinho, 1941; Hasui, 2012).

A série Ceará, ou Complexo Ceará, como definido por Cavalcante et al. (2003), é formada pelas unidades Independência, Canindé, Arneiroz e Quixaramobim, de idade paleoproterozoica (Cavalcante et al., 2003). Representa uma sequência de rochas metavulcano-sedimentar dominada por metapelitos (Arthaud et al., 2008), constituída por paragneisses e micaxistos por vezes migmatíticos, quartzitos, metacalcários, rochas calcissiláticas, ortogneisses ácidos, metagabros, anfibolitos, metaultramáficas, formações ferríferas e manganésíferas e granulitos máficos (Cavalcante et al., 2003).

O Complexo granítico migmatítico tamboril Santa Quitéria, de idade neoproterozoica (Arthaud et al., 2008), representa um conjunto de migmatitos formados a partir, principalmente, da fusão de rochas supracrustais, intrudido por grande quantidade de rochas tonalíticas e graníticas e com enclaves de rochas calcissiláticas e anfibolitos (Arthaud, 2007).





|                                              |                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Supersuíte Granitóide Sintardi-<br>orogénica |  NP3δ3   | Suíte granitóide 3: dioritos, incluindo, subordinadamente, gabros e granitóides.                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|                                              |  NP3γ2i  | Suíte granitóide Itaporanga: granitos e granodioritos de granulação grossa e porfiríticos, à biotita +/- anfibólio, associados a dioritos e fases intermediárias de mistura; monzogranitos subordinados.                                                                                                                                                        |
|                                              |  NPy     | Granitóides diversos: biotita-granitos, monzogranitos, sienitos, quartzomonzonitos e granitos porfiríticos, em parte somados num mesmo espaço cartografado.                                                                                                                                                                                                     |
| Complexo Ceará                               |  PP2γ    | Ortognaisses granito-granodioríticos, acessoriamente tonalíticos, em parte facoidais, e/ou associados a migmatitos.                                                                                                                                                                                                                                             |
|                                              |  PPCi    | Unidade Independência: paragnaisses e micaxistos aluminosos (em parte migmatíticos), incluindo quartzitos, metacalcários, rochas calcissilicáticas e, mais raramente, anfibolitos (micaxistos, paragnaisses e quartzitos; paragnaisses e micaxistos).                                                                                                           |
|                                              |  PPcc    | Unidade Canindé: paragnaisses em níveis distintos de metamorfismo-migmatização, incluindo ortognaisses ácidos e rochas metabásicas.                                                                                                                                                                                                                             |
|                                              |  PPcar   | Unidade Arneiroz: paragnaisses diversos, em parte migmatíticos, e micaxistos, encerrando jazimento de dimensões variadas de quartzito, metacalcários, rochas calcissilicáticas, anfibolitos e talcoxistos.                                                                                                                                                      |
|                                              |  PPa     | Unidade Acopiara: paragnaisses e ortognaisses, parcialmente migmatíticos, incluindo, subordinadamente, micaxistos grafitosos, anfibolitos, rochas calcissilicáticas, por vezes, scheelitíferas, metaultramáficas e quartzitos.                                                                                                                                  |
|                                              |  APgn    | Ortognaisses granito-granodioríticos de tonalidade cinzenta, incluindo leucogranitóides gnáissicos, migmatitos e lentes de rochas anfibolíticas.                                                                                                                                                                                                                |
| Complexo Cruzeta                             |  Apγc  | Ortognaisses granito-granodioríticos de tonalidade cinzenta, incluindo leucogranitóides gnáissicos, migmatitos e lentes de rochas anfibolíticas.                                                                                                                                                                                                                |
|                                              |  Apcz  | Indiferenciado: Domínio de ortognaisses cinzentos (TTG), paragnaisses e migmatitos, encerrando lentes de anfibolito/metabasaltos, metagabros, metaultramáficas, metacalcários, micaxistos, gonditos, formações ferríferas/itabiritos e rochas calcissilicáticas.                                                                                                |
|                                              |  Apczm | Unidade Mombaça: ortognaisses granodioríticos, graníticos e tonalíticos, geralmente cinzentos, e migmatitos, dominando sobre anfibolitos, metagabros, metaultramáficas, charnockitos (raros), metacalcários e rochas calcissilicáticas.                                                                                                                         |
|                                              |  Apczt | Unidade Tróia: metagabros, metabasaltos e, acessoriamente, metaultramáficas, metadioritos e metatufos básicos (associados ou não a metassedimentos); quartzitos, xistos, metacherts, formações ferríferas, paragnaisses, gonditos, metacalcários impuros e rochas calcissilicáticas; segmento realçado pela existência de paragnaisses e micaxistos cianíticos. |



### **3.4 Geomorfologia**

O Ceará é dividido em diferentes domínios geomorfológicos, com especial destaque para a Depressão Sertaneja, os Maciços Residuais Cristalinos e os planaltos sedimentares de Ibiapaba, Araripe e Apodi (Brandão e Freitas, 2014).

A Depressão Sertaneja é o domínio de maior extensão e corresponde a aproximadamente 70% do território cearense (Vidal et al., 2005). Representa superfícies aplainadas ou levemente onduladas, com níveis altimétricos inferiores a 450m (Vidal et al., 2005). É composta pelas rochas do embasamento cristalino pré-cambriano – gnaisses e migmatitos (Claudino-Sales e Lira, 2011) e em meio as suas extensas áreas planas ressaltam-se maciços montanhosos e inselbergs.

Os maciços montanhosos e inselbergs são relevos residuais, formados por erosão diferencial e constituídos principalmente por sienitos, monzonitos, granitos e quartzitos, rochas mais resistentes aos processos de intemperismo e erosão (Brandão e Freitas, 2014). Atingem cotas topográficas entre 600 e 1000 m e muitas vezes estão alinhados, em razão do controle estrutural provocado por faixas miloníticas e por rochas com maior resistência (Brandão e Freitas, 2014).

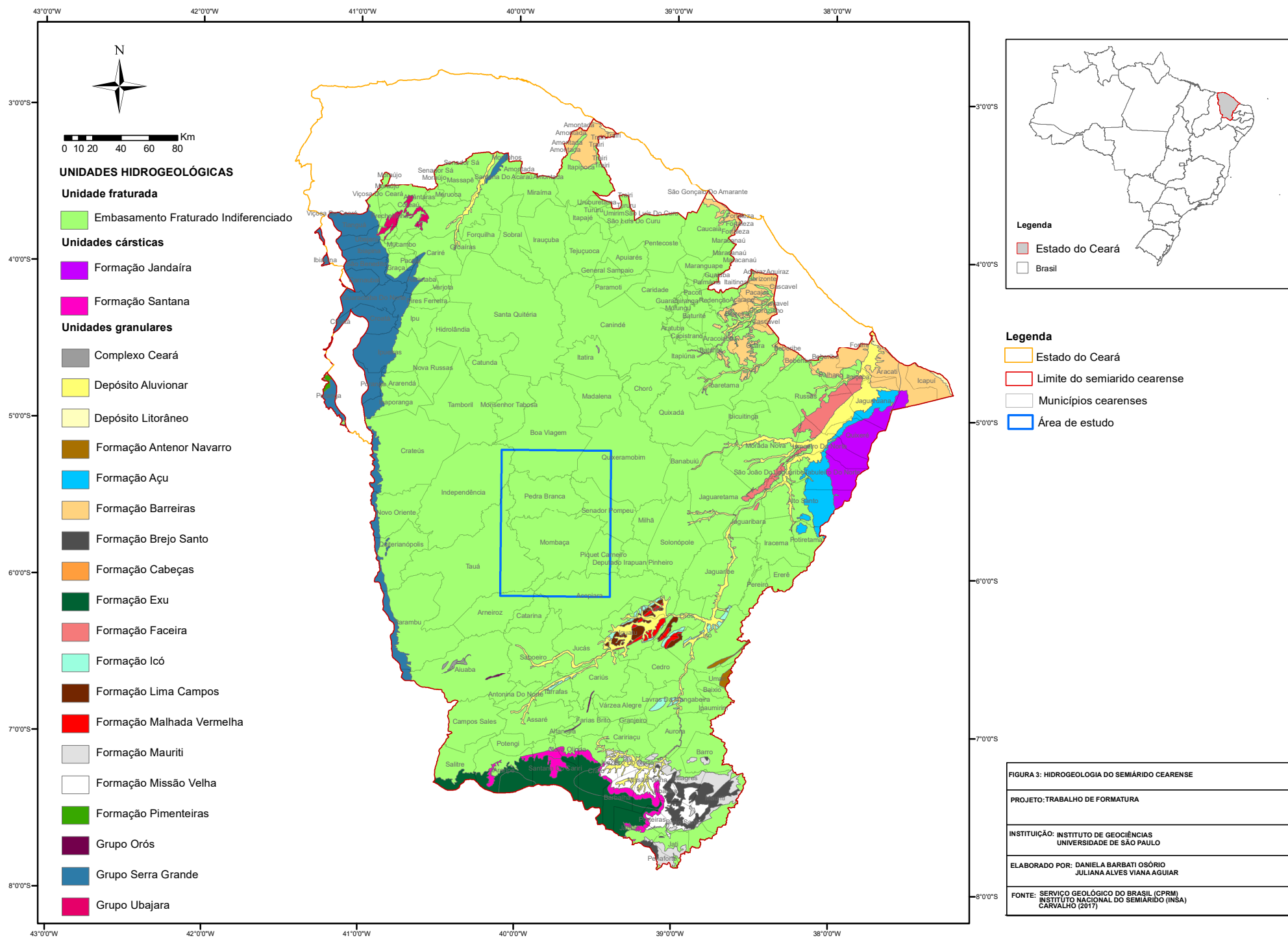
Em Boa Viagem e Mombaça, a região leste é dominada pelo relevo de formas suaves e pouco dissecadas da Depressão Sertaneja, com altitudes topográficas entre 200 a 400 m. A oeste, norte e sul, a depressão é ladeada por relevos serranos e colinosos dissecados, com altitudes variando de 400 a pouco mais de 700 m. Em Pedra Branca, o relevo predominante é de morros e colinas, com altitudes variando entre 400 e 800, ao lado da Depressão Sertaneja, que se situa principalmente na região sudeste do município.

### **3.5 Hidrogeologia**

No Ceará os aquíferos fraturados são os de maior ocorrência em área (Figura 3), visto que a geologia é dominada por rochas ígneas e metamórficas (aproximadamente 75% do território), que afloram predominantemente na região central do estado (Medeiros et al., 2011). Usualmente, a porosidade primária e a permeabilidade dessas rochas são baixas, e com isso, a priori, não possuem alta capacidade de armazenamento de água, comparativamente à aquíferos sedimentares. A porosidade total dessas rochas, e assim, a produtividade desses aquíferos, aumenta em função da densidade e abertura das fraturas. Além disso, o clima seco, com chuvas irregulares, temperaturas elevadas, alta taxa de evapotranspiração e solos pouco espessos resultam em baixas taxas de recarga dos aquíferos.

Na área de estudo, predominam os aquíferos fraturados, que, de modo geral, constituem importante alternativa de abastecimento, principalmente durante longos períodos de estiagem. Depósitos aluvionares também estão presentes na área, e constituem solução

complementar de abastecimento, que, no entanto, não configuram bons aquíferos para a região em virtude de sua extensão limitada e rápida exaustão devido à elevada evaporação da região e aos constantes bombeamentos (Suassuna, 2007). De acordo com o programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará (Feitosa, 1998a; Feitosa, 1998b; Feitosa e Gomes, 1998), nos municípios de Pedra Branca, Mombaça e Boa Viagem, os poços se concentram em regiões de rochas cristalinas, com a totalidade dos poços tubulares explotando o aquífero fraturado. Em Boa Viagem, observa-se, também, o domínio hidrogeológico das coberturas sedimentares terciário-quaternárias, que, no entanto, não configuram sistemas expressivos de captação. Dentre os novos poços perfurados pelo Governo do Estado, entre 2015 e 2018, todos se localizam no domínio de rochas cristalinas.



## **4 CONDICIONANTES DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA EM AQUÍFEROS FRATURADOS**

### **4.1 Litologia**

A natureza e distribuição de aquíferos é controlada pela litologia, estratigrafia e estrutura dos depósitos geológicos. Segundo Freeze and Cherry (1979) rochas ígneas e metamórficas não deformadas dificilmente ultrapassam 2% de porosidade e seus poros têm baixo grau de interconectividade. Desse modo, a permeabilidade primária destas rochas é extremamente baixa e o fluxo da água subterrâneas ocorre predominantemente devido à porosidade secundária, formada por fraturas. A permeabilidade por fraturas geralmente ocorre dentro de dezenas de metros e, em alguns casos, a poucas centenas de metros da superfície e normalmente é inversamente proporcional à profundidade, uma vez que as fraturas tendem a se fechar em profundidade devido às tensões verticais e laterais impostas por sobrecargas do soterramento e por tensões horizontais de fechamento de origem tectônica.

A capacidade de armazenamento de diferentes litotipos é outro aspecto considerado no estudo de fatores que atuam no aquífero fraturado. De acordo com Fernandes (2008), a litologia exerce influência na presença de descontinuidades pré-existentes (acamamento, bandamento, contatos) e no modo de propagação de fraturas. Em seu estudo realizados no Rio grande do Norte e na Paraíba, Costa (1986) observou que gnaisses, quartzitos e migmatitos orientados são os litotipos com as melhores capacidades específicas, seguidos por micaxistos, granitos, rochas granulares magmáticas e migmatitos e, por fim, filito, ardósia e xistos verdes. Fernandes (2008) considera que entre as rochas metamórficas de baixo grau, meta arenitos e quartzitos são mais favoráveis, enquanto filitos, ardósias e xistos, menos.

Conforme Fernandes et al. (2016), gnaisses, xistos, filitos e rochas metamórficas com foliação e bandamento são previstos como mais produtivas do que granitos maciços, uma vez que suas descontinuidades prévias podem favorecer a maior densidade de fraturas, já que, esforços tectônicos e neotectônicos tendem a reativar grande quantidade de fraturas paralelas às descontinuidades preexistentes. Além de exercer influência na presença de descontinuidades pré-existentes, como acamamento, bandamento ou contatos, a litologia também interfere no tipo de fratura formada (Morin e Savage, 2003), uma vez que a reologia da rocha aos esforços tectônicos depende de parâmetros inerentes a cada litotipo, como tamanho dos grãos, grau de metamorfismo e compactação.

### **4.2 Compartimentos topográficos**

A comparação dos valores de capacidade específica de poços localizados em diferentes compartimentos topográficos mostra que esse é outro aspecto importante. Bertachini (1987) obteve para a região de Jundiá, que a capacidade específica dos poços é maior em vales do que em topos. O autor acredita que isso se deve a maior possibilidade do

fundo do vale estar encaixado em uma zona fraturada. Costa (1986) também verificou, nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, que poços em talvegues (vales) tem capacidade específica média maior quando comparado com poços em encostas e elevações. Para Fernandes (2008), os vales têm maior produtividade porque possuem nível d'água mais raso, e, por isso, as fraturas, próximas à superfície do terreno, se tornam saturadas e, também porque as coberturas sedimentares mais espessas, nessa região, favorecem a recarga do aquífero. No entanto, no Ceará, as circunstâncias climáticas não permitem a geração de solos espessos, que sejam propícios à recarga dos aquíferos.

#### **4.3 Presença e espessura de cobertura sedimentar**

Aquíferos fraturados possuem baixas taxas de infiltração devido à irregularidade da rede de fraturas e à quase impermeabilidade das rochas cristalinas, que privilegia o escoamento superficial da água ao invés da infiltração e recarga do aquífero (Coriolano, 2002). Por esse motivo, coberturas sedimentares são importantes para a recarga do aquífero, uma vez que, a recarga efetiva ocorre por infiltração de águas subterrâneas armazenadas nas coberturas sedimentares sobrepostas (Coriolano, 2002). No entanto, a influência das coberturas sedimentares só é percebida em estudos mais locais, já que essas coberturas são descontínuas e de difícil mapeamento (Fernandes, 2008). Assim sendo, espessura do solo não será considerada neste estudo, em virtude da delgada espessura das coberturas sedimentares formadas em clima semiárido, bem como da inexistência de mapas geológicos de detalhe que as comtemple.

#### **4.4 Clima**

O clima influencia tanto na quantidade como na qualidade da água subterrânea (Coriolano, 2002). Costa e Silva (2000) consideram que a principal influência é na qualidade da água, visto que em regiões com maior pluviosidade os sais solúveis são diluídos, enquanto que em regiões com baixa taxa pluviométrica e elevada evaporação, como no caso de algumas localidades no semiárido nordestino, os sais se concentram e a água subterrânea se torna salina.

A pluviosidade atua também na quantidade de água infiltrada e, indiretamente, na formação de solos. Para Costa e Silva (2000), a influência do clima na recarga de aquíferos fraturados, se dá principalmente pela produção de manto de intemperismo, que como mencionado anteriormente, funciona como uma zona de recarga.

Segundo Scanlon et al. (2002), o clima tem um papel importante no controle da recarga e isso é evidenciado pelas diferenças de recarga entre regiões áridas e úmidas. Em regiões de clima úmido, o lençol freático normalmente é raso, os rios são influentes e a recarga é difusa. Já as regiões de clima seco, normalmente, possuem superfície freática profunda, rios influentes e recarga concentrada. No semiárido cearense, as taxas de recarga são limitadas

pela disponibilidade de água na superfície, que ou são escassas em função da alta taxa de evapotranspiração ou se acumulam em um curto intervalo de tempo, em função do regime de chuvas concentrado e irregular, ultrapassando a capacidade de armazenamento do solo e favorecendo o escoamento superficial.

#### 4.5 Tectônica

A tectônica é importante no controle da abertura de fraturas e, de acordo com a Lei Cúbica (Snow, 1969, apud Fanti, 2015), esse é o parâmetro que tem maior controle sobre a condutividade hidráulica das fraturas. No entanto, segundo Fernandes (2008), é difícil de ser determinado porque nem sempre o que se observa em superfície é o que ocorre em profundidade. Além disso, aberturas não visíveis a olho nu também possuem grande influência sobre a permeabilidade.

Para Lawn e Wilshaw (1993), a abertura de fraturas depende principalmente de seu mecanismo de propagação e, conseqüentemente, dos esforços principais máximo e mínimo ( $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) que atuam na rocha. Os autores distinguem três modos de propagação de esforços, conforme descrito a seguir.

O primeiro modo de propagação (opening mode) é por esforços de tração, em que ocorre a abertura normal aos planos de ruptura. O segundo modo (sliding mode), corresponde ao cisalhamento longitudinal das paredes da fissura em uma direção normal à frente da fissura e o terceiro (tearing mode), corresponde ao deslizamento lateral paralelo à frente da quebra. Pelo primeiro mecanismo, se formam juntas ou fraturas extencionais, perpendicularmente ao esforço mínimo principal ( $\sigma_3$ ). Já no segundo e terceiro modos, as fraturas formadas são denominadas fraturas de cisalhamento e formam ângulo agudo com o esforço máximo-  $\sigma_1$  e ângulo obtuso com o esforço mínimo-  $\sigma_3$ .

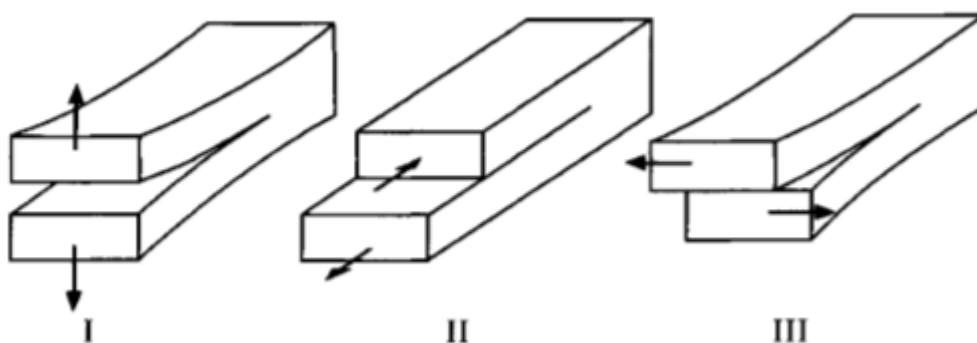


Figura 4: Os três modos de propagação de fraturas: I, opening, II, slinding e III, tearing. (Lawn e Wilshaw, 1993).

Além da abertura das fraturas, a tectônica também é importante no controle da orientação e posição, densidade, extensão e conectividade da rede de fraturas (Fernandes, 2008 e Costa e Silva, 2000). Ademais, tanto o campo de esforços que atuou na época da geração das principais fraturas, como os campos posteriores e/ou atuais, são igualmente controladores dessas características.

#### 4.5.1 Neotectônica

A definição de neotectônica, assim como seus limites e marco inicial, causam controvérsias no meio científico e, portanto, comumente são verificadas definições distintas de acordo com cada autor. O termo neotectônica surgiu em 1948 e foi definido pelo geólogo Obrushev como os movimentos recentes da crosta terrestre que ocorreram entre o Neógeno e o Quaternário, com papel determinante na configuração morfológica contemporânea (Gomes Neto, 2007). A partir de então, outras definições surgiram, como a proposta pela INQUA-Comissão de Neotectônica da Associação Internacional de Estudos do Quaternário (Fernandes, 1997), que considera os movimentos neotectônicos como “qualquer movimentação da Terra ou deformação do nível de referência geodésico, seus mecanismos, origem geológica e suas implicações para várias aplicações e suas extrapolações futuras” e que não estabeleceu limites fixos, adotando que os movimentos neotectônicos correspondem desde os movimentos instantâneos até os com idade superior a 10 Ma (Gomes Neto, 2007).

Apesar das divergências quanto a definição e seus limites, a relação entre neotectônica e a configuração da morfologia atual do relevo é aceita como algo mais plausível pelos estudiosos (Gomes Neto, 2007), assim como, a interferência da neotectônica nas redes de drenagem, blocos soerguidos e rebaixados, processos de intemperismo e deposição de coberturas sedimentares (Sá, 2000). Assim, dados morfotectônicos podem ser ferramentas para conhecer o sistema de tensão recente, bem como, as coberturas cenozoicas fraturadas (marcadores litoestratigráficos), escarpas de falhas, basculamento e dados sismológicos (Sá, 2000).

Segundo Coriolano (2002), o entendimento do comportamento neotectônico de uma região tem grande aplicabilidade na hidrogeologia de aquíferos fraturados, uma vez que, segundo a autora, o processo de percolação de água explotável em subsuperfície geralmente é atual e controlado por zonas de fraturas submetidas ao campo de tensão atual. Tal campo de tensão, é responsável pela criação de novas estruturas ou reativação de antigas e dita o comportamento “aberto” ou “fechado” das fraturas, implicando diretamente na produtividade do aquífero, já que a abertura das fraturas na sua posição atual não tem relação, a princípio, com a cinemática vigente na época em que foram formadas. Para Sá (2000) o potencial hídrico é uma combinação entre as feições originais das fraturas (orientação, geometria, conectividade) e seu comportamento atual, que é reflexo dos movimentos neotectônicos e pelos efeitos de descompressão causado por erosão e pelo intemperismo.

Estudos como os de Morin e Savage (2003), Barton et al. (1995), Ferril et al. (1999) e Talbot e Sirat (2001) tentam compreender o comportamento de fraturas submetidas ao campo de tensão atual. Morin e Savage (2003) criaram um modelo para explicar a influência do estresse atual no fluxo da água na Bacia de Newark e constataram que a resposta

hidrogeológica do aquífero se relaciona com os tipos de fraturas e também com a relação destas com o campo de estresse atual. Segundo Barton et al. (1995), as fraturas ativas parecem ser os caminhos por onde a água flui de modo preferencial e têm permeabilidade maior do que das fraturas que não estão orientadas de modo a sofrer influência do campo de tensão atual. De acordo com Ferril et al. (1999), aquíferos fraturados têm sua transmissividade controlada pelas propriedades condutivas de falhas e fraturas, que por sua vez, são parcialmente controladas pelo campo de estresse in situ.

## 5 TECTÔNICA CENOZÓICA DO NORDESTE BRASILEIRO

As principais fases da evolução tectônica do Nordeste brasileiro são o Ciclo Brasileiro, a ruptura do Gondwana, no Cretáceo, e as reativações cenozoicas (Maia e Bezerra, 2014a).

No Cretáceo, as zonas de cisalhamento transcorrentes brasileiras com direção E-W e NE-SW foram reativadas formando *trends* de falhamentos com as mesmas direções (de Castro et al., 2012). No Cenozoico não foi diferente e, segundo Saadi (1993), a Plataforma Brasileira foi toda afetada por deformações tectônicas que aproveitaram preferencialmente linhas de fraqueza preexistentes.

Muitos trabalhos abordam as evidências diretas e indiretas da deformação neotectônica no Nordeste (Moura-Lima et al., 2010; Lima, 2010; Maia e Bezerra, 2012; Maia e Bezerra, 2014b, Bezerra et al., 2001). Dentre os indícios de atividade tectônica cenozoica citam-se falhas e juntas cortando unidades neógenas; estruturas de deformação, como estruturas de liquefação em conglomerados e estruturas de fluidificação no contato entre arenitos e lamitos; anomalias de drenagem, com cursos retilíneos, orientados e com mudanças abruptas no curso; altos topográficos, predominantemente com direção NW-SE, constituídos por arenitos silicificados da Formação Barreiras e vales e depósitos aluviais antigos orientados segundo a direção de falhas do embasamento pré-cambriano.

Para Maia e Bezerra (2012), as estruturas com direção NE-SW e SE-NW que controlam o rio Apodi-Mossoro e as falhas com *trends* NE e NW que ocorrem na zona litorânea entre Natal e João Pessoa, são compatíveis com os modelos neotectônicos regionais que propõem um campo atual com  $\sigma_1$  E-W. Lima (2010), com a análise de falhas e juntas, obteve um campo de esforço principal máximo ( $\sigma_1$ ) na direção NW-SE para a planície costeira do rio São Francisco, para o litoral norte e sul do Sergipe e para o litoral norte da Bahia e na direção NE-SW no extremo norte do litoral da Bahia. Segundo Maia e Bezerra (2014b), o domeamento observado no centro da Bacia Potiguar se formou em resposta a compressão ( $\sigma_1$ ) E-W e NW-SE miocênica quaternária, resultante da atuação do atual campo de tensões, com  $\sigma_1$  orientado na direção NW-SE. Para Silva e Sá (2000) no campo de tensões neotectônico, a compressão ( $\sigma_1$ ) se orienta na direção E-W e a extensão ( $\sigma_3$ ), N-S.



A identificação de evidências de deformação cenozoica e do campo de tensão que as gerou, auxilia na determinação dos caminhos preferenciais de fluxo em aquíferos fraturados. Fraturas com tendência à abertura são paralelas ao esforço compressivo neotectônico, enquanto que fraturas “fechadas” são perpendiculares. Além disso, fraturas de cisalhamento também apresentam boa potencialidade, principalmente nas zonas de transtensão e intersecção de fraturas (Silva e Sá, 2000). Em seu estudo no aquífero cristalino da região centro-sul do Rio Grande do Norte, Silva e Sá (2000) propõem que poços associados com fraturas E-W, que funcionam como fraturas de extensão, NE e NW, que funcionam como fraturas de cisalhamento dextral e sinistral, possuem melhores vazões. Já os poços associados a sistemas de fraturas com direção NNE, “fechadas”, possuem produtividade menor.

## **6 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **6.1 Revisão bibliográfica**

A consulta ao acervo bibliográfico foi realizada no decorrer do trabalho e consistiu na pesquisa de trabalhos que tenham a temática relacionada ao contexto geológico, hidrogeológico, estrutural e geomorfológico do Ceará e da região estudada. Além disso, materiais que disponham sobre o comportamento hidráulico em aquíferos fraturados, neotectônica, histórico de secas do Nordeste e estudos sobre produtividade de poços em terrenos cristalinos e regiões semiáridas no Brasil e no mundo foram consultados. Essa etapa foi essencial para dar suporte aos métodos aplicados e interpretações no presente estudo.

### **6.2 Compilação e tratamento de dados hidrogeológicos**

Os dados hidrogeológicos foram disponibilizados pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e representam poços perfurados pelo governo do Ceará entre 2015 e 2018, em resposta a longa seca dos últimos anos. Em um primeiro momento, os dados foram consistidos, para verificar se havia existência de valores não condizentes, e organizados e separados em três bases de dados distintas: poços secos, poços com capacidade específica, cujos valores foram calculados a partir das informações de vazão, nível dinâmico e nível estático, assim como o grupo de poços com informações incompletas.

A capacidade específica foi o parâmetro escolhido, pois é reflexo primeiramente das características locais do poço e, secundariamente, depende das características construtivas dos mesmos, portanto, é um parâmetro que indica mais diretamente o potencial do aquífero (Fernandes, 2016; Fernandes et al., 2007).

O grupo de poços com informações incompletas foi descartado das análises, enquanto os demais dados foram adicionados na plataforma ArcGIS (Sistema de Informação Geográfica produzido pelo Environmental Systems Research Institute- ESRI) para análise da relação da situação do poço, se produtivo ou seco, e do valor da capacidade específica com os diferentes compartimentos litológicos, geomorfológicos e estruturais definidos, assim como com os lineamentos traçados. Para isso, gráficos da frequência acumulada dos valores de capacidade específica e histogramas contendo a porcentagem de poços secos, em relação ao total de poços por classe, foram gerados para cada compartimento analisado, bem como rosáceas relacionando a direção dos lineamentos com os valores de capacidade específica e gráficos de dispersão relacionando distância do lineamento ao poço e comprimento de lineamentos com a produtividade.

### **6.3 Compartimentação litológica**

A compartimentação litológica se baseia em Madrucci (2004), que em seu estudo em Lindóia (SP), a partir do mapa geológico da região, agrupou as unidades geológicas em função do tipo litológico predominante e as correlacionou com a produtividade de poços, obtendo que os maiores valores de capacidade específica são de poços instalados em rochas deformadas, como gnaisses, migmatitos, milonitos e granitóides.

Nesse trabalho a compartimentação litológica foi feita com base nos arquivos SIG do Mapa de Geodiversidade estadual do Ceará (CPRM, 2014), em escala 1: 1.000.000, por meio de técnicas de geoprocessamento, considerando as informações dos campos LITOTIPO1 e UNIGEO da tabela de atributos. O campo LITOTIPO1 representa os tipos litológicos que correspondem a mais de 10% da unidade litoestratigráfica e o campo UNIGEO descreve as unidades geológicas-ambiental, agrupadas de acordo com características semelhantes, definindo os tipos litológicos predominantes.

### **6.4 Compartimentações e classificações geomorfológicas**

A análise por compartimentação geomorfológica, que subdivide o relevo em diferentes compartimentos de acordo, principalmente, com as formas de relevo e com a hipsometria, também foi realizada. Essa classificação tem grande importância para a hidrogeologia de aquíferos fraturados, visto que alguns estudos já demonstram a relação entre a compartimentação do relevo e a produtividade de poços (Fernandes, 1997; Costa, 1986; Madrucci, 2004).

Neste trabalho a análise envolveu a classificação da geomorfologia em relação às formas geomorfológicas, à altimetria e às feições topográficas. A compartimentação em relação às formas geomorfológicas foi feita com base na interpretação do modelo digital de elevação (MDE) e no mapa hipsométrico. O modelo digital de elevação foi gerado a partir da ferramenta hillshade do ArcMap (aplicativo do software ArcGIS, destinado à criação, edição e

análise de dados geoespaciais), com iluminação artificial nas direções 315° e 45°, do sistema azimutal, enquanto que o mapa hipsométrico foi gerado com a ferramenta Reclass by ASCII File, também no ArcMap. O MDE é uma representação matemática da topografia do terreno que traz informações importantes de relevo, enquanto que mapa hipsométrico é uma representação da elevação do terreno por meio de cores, onde os intervalos de altitudes são discriminados com diferentes tonalidades.

A compartimentação altimétrica foi feita a partir do mapa hipsométrico gerado para a área de estudo e classificou a área em 4 classes de elevação topográfica: 100 a 400 m, 400 a 500 m, 500 a 600 m e 600 a 700 m. Já a classificação quanto às feições topográficas, diferenciou as regiões de encosta, topo e talvegue, tendo como critérios a altitude e inclinação do terreno. Desse modo, o mapa do modelo digital de elevação, o mapa hipsométrico e o mapa de declividade do terreno foram as ferramentas que auxiliarem essa classificação. O mapa de declividade do terreno é uma representação temática da distribuição espacial dos diferentes graus de inclinação do terreno (Colavite e Passos, 2012) e foi gerado com a ferramenta Slope do ArcMap.

#### **6.5 Traçado de lineamentos estruturais regionais e locais e compartimentação estrutural**

O principal método aplicado nesse estudo, que é a análise de lineamentos estruturais, se baseia em Fernandes (1997) e parte do pressuposto que a tectônica cenozoica condiciona a natureza “aberta” ou “fechada” da rede de fraturas. Outros estudos aplicaram essa metodologia, correlacionando a capacidade específica ou vazão com a proximidade, densidade, extensão, direção e intersecção de lineamentos (Fernandes 1997; Bertachini, 1987, Madrucci, 2004). Bertachini (1987) obteve maiores valores de capacidade específica para os lineamentos de maior extensão, no entanto, segundo o autor, a extensão dos lineamentos é um dos critérios ainda debatidos pelos hidrogeólogos. Para Fernandes (2008) a intersecção de lineamentos reflete conectividade de fraturas e está associada à maior produtividade. Fernandes (2008) ainda observa que, de fato, poços mais próximos a lineamentos tendem a ser mais produtivos, fato corroborado pelo estudo de Bertachini (1987).

A escala de traçado dos lineamentos é um fator relevante e deve ser escolhida de acordo com o detalhamento desejado. Escalas pequenas (<1:25.000) não permitem distinguir quais fraturas então, de fato, mais próximas dos poços e, por isso, apenas é possível inferir que o poço pode estar na zona de influência do lineamento e que pode estar atravessando fraturas com diferentes direções e que não foram identificadas como lineamentos. Isso não acontece em escalas maiores ( $\geq 1:25.000$ ), em que é possível inferir que o poço tem maior probabilidade de interceptar fraturas com mesma direção que o lineamento traçado (Fernandes, 2008).

No presente estudo o traçado dos lineamentos foi feito em escala de 1:25.000, para análise local, e em escala 1:100.000, para análise regional, a partir de imagens de sensoriamento remoto ALOS PALSAR adquiridas na plataforma eletrônica ASF (Alaska Satellite Facility). Esse conjunto de imagens foi obtido pela missão ALOS, lançada pela Japan Aerospace Agency (JAXA), que ficou em atividade de 2006 a 2011 (JAXA, 2008). O propósito inicial era a produção de dados cartográficos que pudessem auxiliar o estudo de temas relacionados ao desenvolvimento sustentável, monitoramento de desastres e recursos naturais no Japão e países da Ásia do Pacífico (JAXA, 2008). O PALSAR (Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar), que é um radar de abertura sintética que opera na Banda L, foi um dos sensores a bordo do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite- 1), capaz de registrar inúmeras e repetidas imagens, diurnas, noturnas e em quaisquer condições atmosféricas, entre os paralelos 87,8° N e 75,9° S (JAXA, 2008).

As imagens obtidas foram processadas pelo software ArcGIS e os lineamentos foram traçados conforme alinhamentos de cristas (altos topográficos lineares) e fundos de vales, de acordo com interpretação dos mapas de sombreamento gerados com iluminações das direções 315° e 45°, do sistema azimutal, para realce de estruturas.

Uma compartimentação estrutural regional foi realizada com base nas direções e padrões dos lineamentos traçados em escala 1:100.000, buscando identificar *trends* e distinguir áreas com o mesmo padrão estrutural, para correlação com a produtividade de poços.

Para o conjunto total de lineamentos regionais e para os lineamentos de cada compartimento estrutural, diagramas de rosáceas foram produzidos para análise estatística da frequência das direções dos lineamentos e do comprimento acumulado dos lineamentos para cada direção. Para isso, as direções e os comprimentos de cada lineamento foram extraídos pelo ArcMap, subdivididos em 18 classes, com intervalo de 10 graus cada e inseridos no software Oriana, para a produção das rosáceas. Tais diagramas são histogramas de frequência circular utilizados para analisar a frequência de dados vetoriais (Landim, 2003). As direções e os comprimentos dos lineamentos foram extraídos com a ferramenta COGO, que retorna os comprimentos em metros e a direção em azimute (0-360°). Como lineamentos são feições que podem ser indicadas apenas pelas suas direções, não necessitando a indicação da orientação, as medidas entre os quadrantes 90°-180° e 180°-270° foram recalculadas para seus contra-azimutes (somando-se ou subtraindo-se 180°).

Para correlação entre a produtividade e as direções estruturais, comprimentos dos lineamentos e distância entre poço e lineamento, tanto os lineamentos regionais como os locais foram analisados tratando cada poço individualmente. Para tal, a partir de um raio máximo de 1 km ao redor de cada poço, os dois lineamentos mais próximos à cada poço, denominados aqui de lineamento primário e secundário, tiveram sua distância ao poço, seu

comprimento e sua direção medidos. As direções e comprimentos foram extraídos com a ferramenta COGO do ArcMap, enquanto que as distâncias, medidas com a ferramenta Measure.

Para avaliação da influência das direções, os poços foram subdivididos em 4 classes de acordo com seu valor de capacidade específica, sendo elas: Q/s menor que 0,01 m<sup>3</sup>/h/m, Q/s entre 0,01-0,06 m<sup>3</sup>/h/m, Q/s entre 0,06-0,4 m<sup>3</sup>/h/m e Q/s entre 0,4-4,16 m<sup>3</sup>/h/m. Para cada classe foram construídos diagramas de rosáceas da frequência das direções dos lineamentos, tanto para o lineamento primário como para o secundário, buscando identificar a quais possíveis *trends* os diferentes intervalos de capacidade específica se associam. Esse procedimento foi realizado tanto para escala regional, 1:100.000, como para escala local, 1:25.000.

Para avaliação da influência do comprimento dos lineamentos e da distância até eles, gráficos de dispersão relacionando capacidade específica com o comprimento e com a distância até os lineamentos foram construídos também para os lineamentos regionais e locais, tanto para lineamentos primários como para os secundários.

## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 7.1 Características gerais dos poços

A área de estudo contém no total 275 dados de poços, com 155 (56%) poços distribuídos em Mombaça, 119 (47%) em Pedra Branca e 1 poço (0,36%) em Boa Viagem (Figura 5). Dentre o total de poços, 70 (25%) são secos e apenas 110 possuem valores de nível estático, nível dinâmico e vazão.

Os poços estudados foram perfurados entre 2015 e 2018, com profundidade média de 79 m e instalados preferencialmente em áreas rurais (cerca de 61% do total). A seguir são apresentados os valores estatísticos para os 110 poços que tiveram a capacidade específica calculada (Tabela 1). A razão entre a vazão e a diferença entre os níveis estático e dinâmico, ou rebaixamento, representa a capacidade específica, parâmetro considerado para avaliar a produtividade dos poços.

Tabela 1: Valores estatísticos de capacidade específica.

|                      |        |
|----------------------|--------|
| <b>Máximo</b>        | 4,1666 |
| <b>Mínimo</b>        | 0,0029 |
| <b>Média</b>         | 0,2298 |
| <b>Mediana</b>       | 0,0382 |
| <b>Desvio padrão</b> | 0,5313 |
| <b>Tamanho (n)</b>   | 110    |



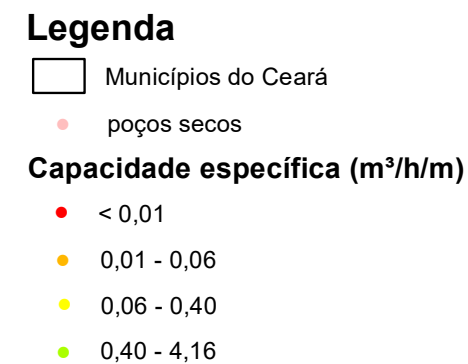
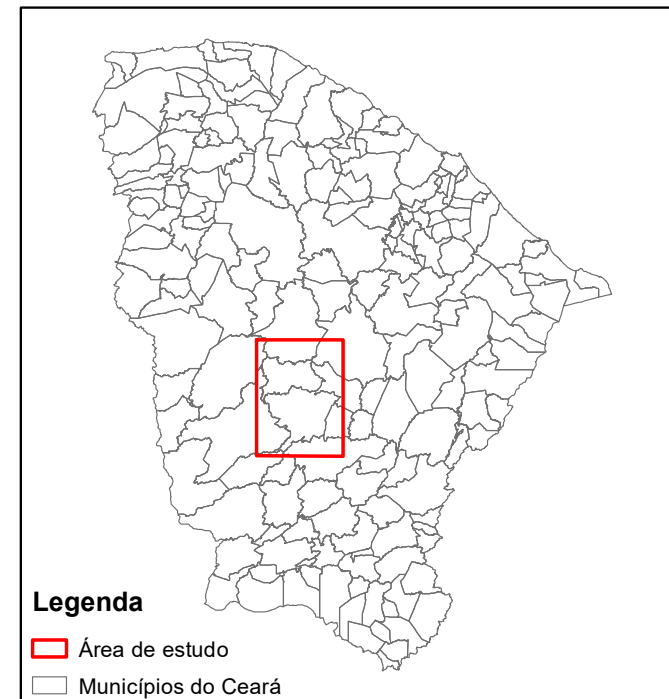
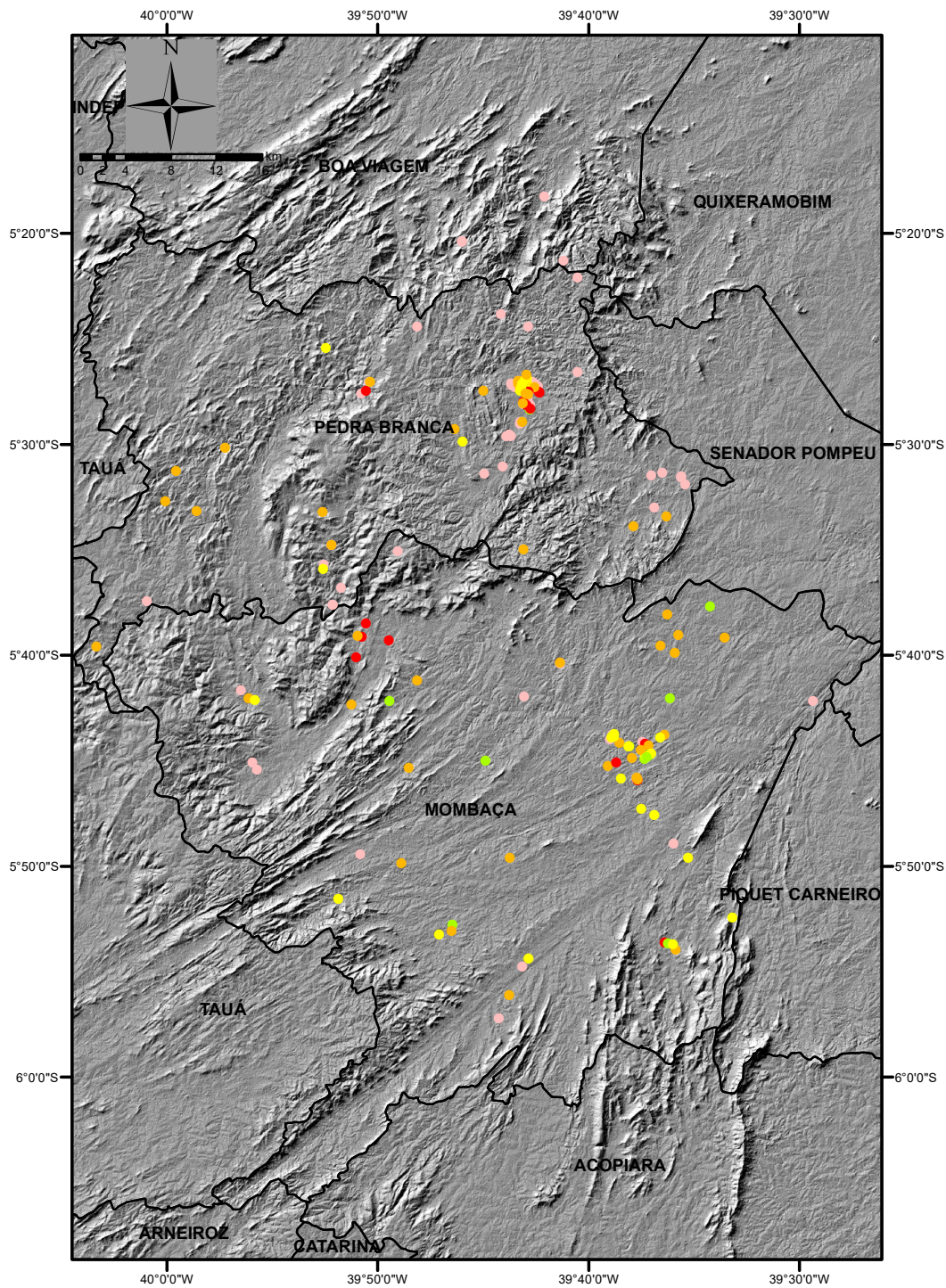


FIGURA 5: DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS E PRODUÇÃO

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)  
ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF)  
COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH)

Os valores de capacidade específica, de um modo geral, são valores baixos e apresentam uma média de 0,23 m<sup>3</sup>/h/m. Os gráficos (Figuras 6 e 7) mostram que aproximadamente 45% dos poços possuem capacidade específica com valores entre 0,01-0,06 m<sup>3</sup>/h/m e que 90% possuem capacidade específica inferior a 0,6 m<sup>3</sup>/h/m.

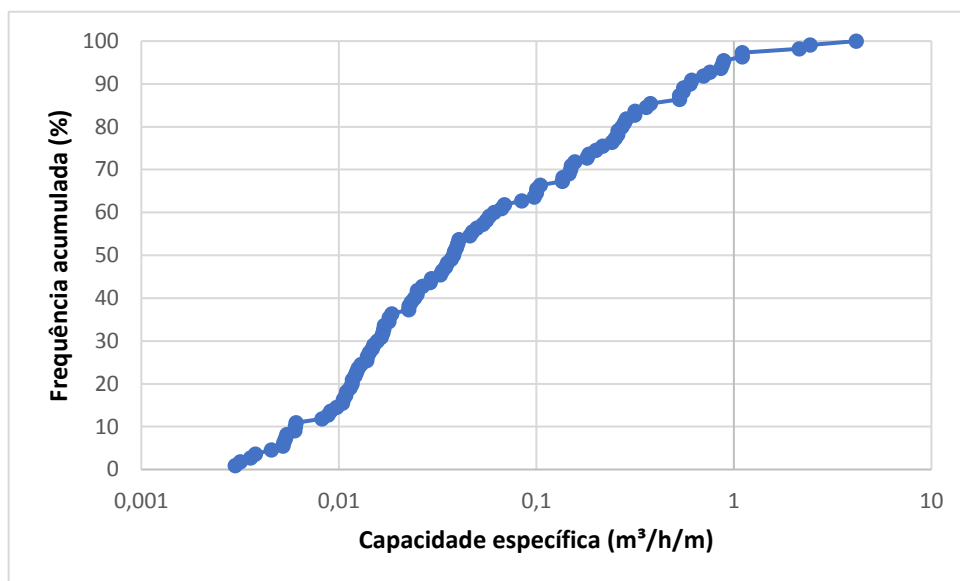


Figura 6: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os poços da área de estudo.

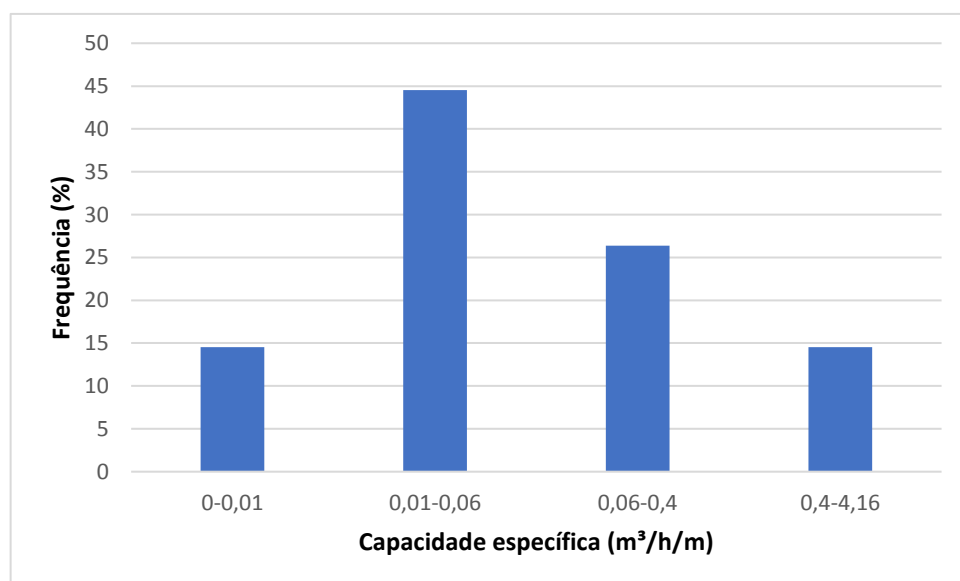


Figura 7: Frequência (em %) dos valores de capacidade específica para os poços da área de estudo.

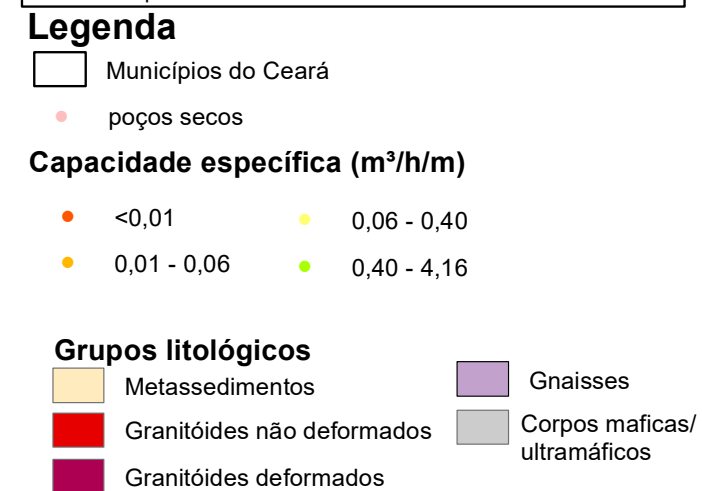
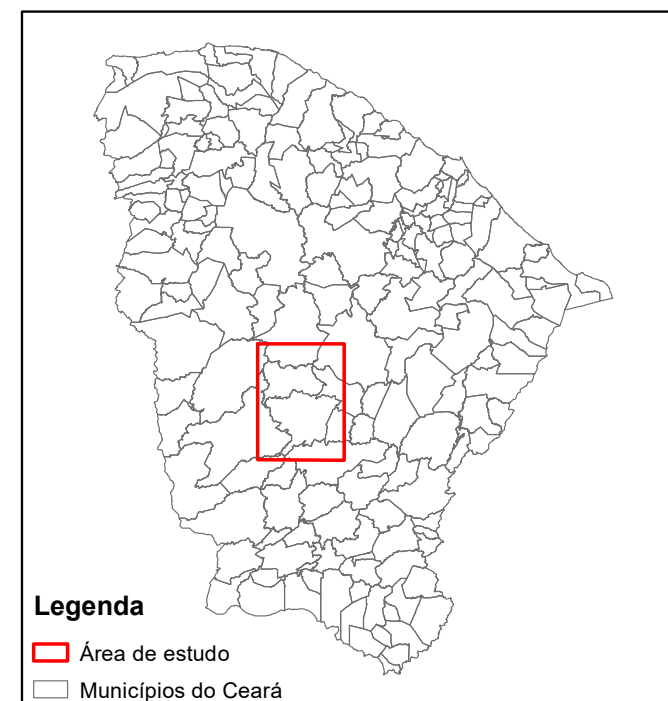
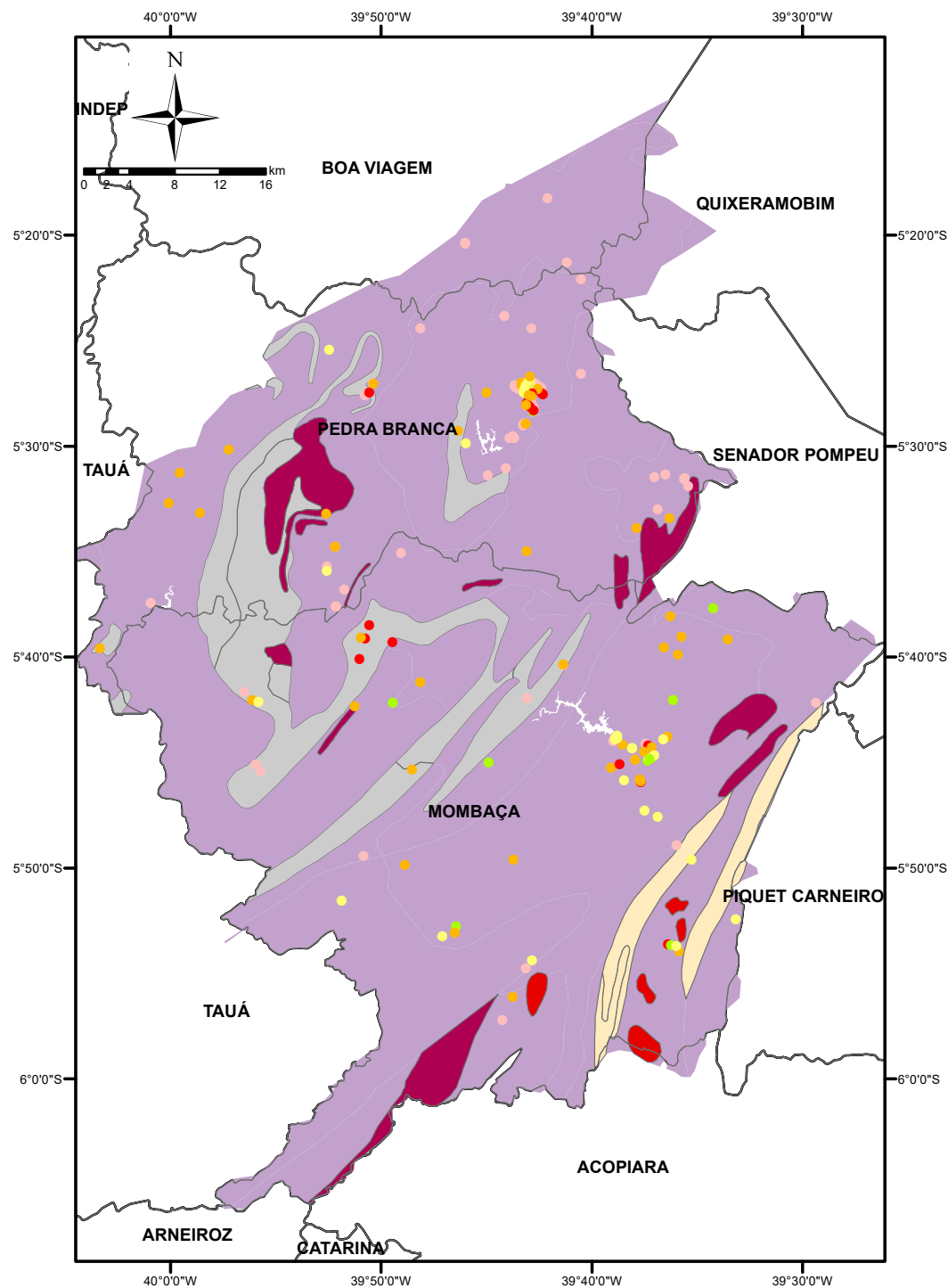
## **7.2 Produtividade segundo a litologia**

Conforme descrito no capítulo de 3, a área de estudo está inserida em um domínio de rochas cristalinas, ígneas e metamórficas, formado principalmente por orto e paragneisses, migmatitos, granitos e rochas máficas e ultramáficas. De modo geral, esses tipos de rochas apresentam pouca diferença quanto as características hidrodinâmicas. Segundo Freeze and Cherry (1979), em rochas metamórficas e rochas ígneas plutônicas, não fraturadas, a porosidade primária, que raramente ultrapassa 2%, e a permeabilidade são muito baixas e, por isso, essas rochas são impermeáveis à água subterrânea. Sendo assim, a permeabilidade dessas rochas fica a cargo de fraturas e/ou foliações e bandamentos.

De acordo com as informações do Mapa Geodiversidade do estado do Ceará (CPRM, 2014), os tipos litológicos que afloram na área de estudo mapeados em escala 1:1.000.000 foram classificados em 5 grupos: corpos máficos/ultramáficos, granitóides deformados, granitóides não deformados, metassedimentos e gnaisses.

Do total de 180 poços analisados, 162 estão instalados em gnaisses, litologia predominante na área de estudo, 1 em rochas máficas/ultramáficas, e 2 em granitóides deformados. Não há poços em granitóides não deformados e em metassedimentos (Figura 8).





|                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FIGURA 8: GRUPOS LITOLÓGICOS E DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS                                                                                                     |
| PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA                                                                                                                            |
| INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO                                                                                         |
| FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)<br>SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM)<br>COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH) |

As figuras 9 e 10 apresentam, respectivamente, o gráfico de frequência acumulada dos valores de capacidade específica e a frequência de poços secos para cada grupo litológico.

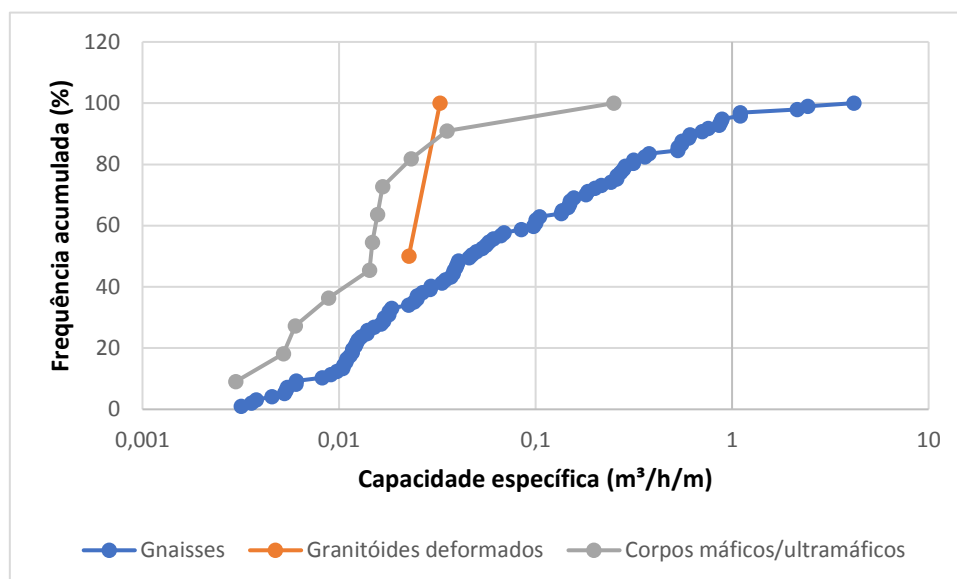


Figura 9: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os grupos litológicos.

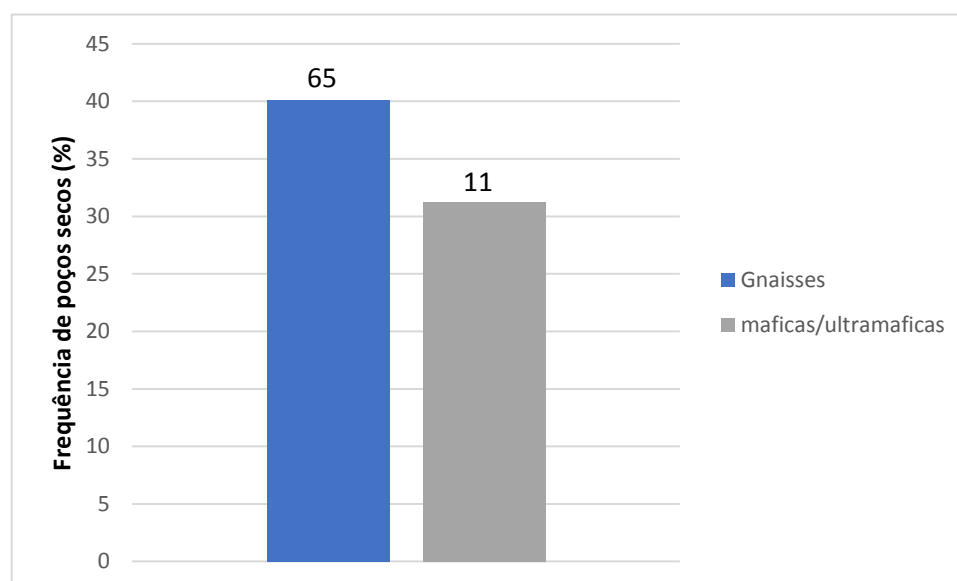


Figura 10: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para os grupos litológicos.

O estudo entre produtividade em função da litologia possibilitou apenas a comparação entre gnaisses e rochas máficas/ultramáficas. Apesar de possuírem maior porcentagem de poços secos (Figura 10), os gnaisses se apresentaram mais produtivos do que os corpos máficos/ultramáficos (Figura 9), o que é esperado, de acordo com Costa (1986) e Fernandes et al. (2016). Isso pode ser explicado devido a comum ocorrência de bandamentos em gnaisses, que são estruturas favoráveis à reativação quando submetidas à esforços

tectônicos. As fraturas que resultam da reativação de bandamentos, por sua vez, são estruturas favoráveis à circulação da água subterrânea e aumentam a capacidade de armazenamento dos gnaisses.

É importante destacar que o mapeamento geológico regional não permitiu distinguir os tipos litológicos de maneira mais minuciosa, não sendo possível distinguir os tipos de rochas que formam os corpos máficos e ultramáficos e nem diferenciar, em relação às estruturas, os gnaisses. Além disso, alguns litotipos não puderam ser analisados em virtude da concentração dos poços na região formada por gnaisses. Ademais, a quantidade de dados nos corpos de rochas máficas e ultramáficas e nos granitóides deformados é muito inferior à quantidade de dados nos gnaisses, o que torna o comportamento desses grupos pouco representativo.

### **7.3 Produtividade segundo a geomorfologia**

#### *7.3.1 Compartimentos geomorfológicos*

O modelo digital de terreno e o mapa hipsométrico permitiram diferenciar 5 compartimentos geomorfológicos: planaltos, com cotas superiores a 600 metros, superfícies degradadas, com cotas intermediárias (entre 400 e 500 metros), serras alongadas e orientadas (cotas entre 300 e 700 metros), morros e colinas não alinhados (cotas entre 300 e 900 metros) e superfícies aplainadas com cotas baixas (entre 100 e 400 metros), representantes da depressão sertaneja (Figura 11). Para cada grupo, foram construídos gráficos de frequência acumulada para os valores de capacidade específica (Figura 12) e de frequência de poços secos (Figura 13) por compartimento.

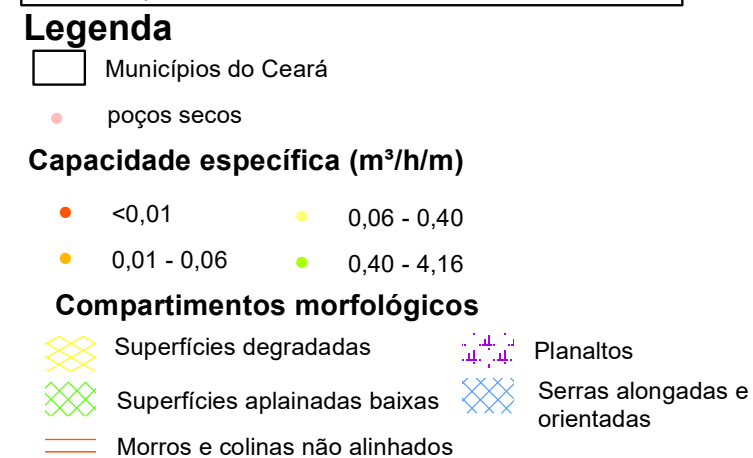
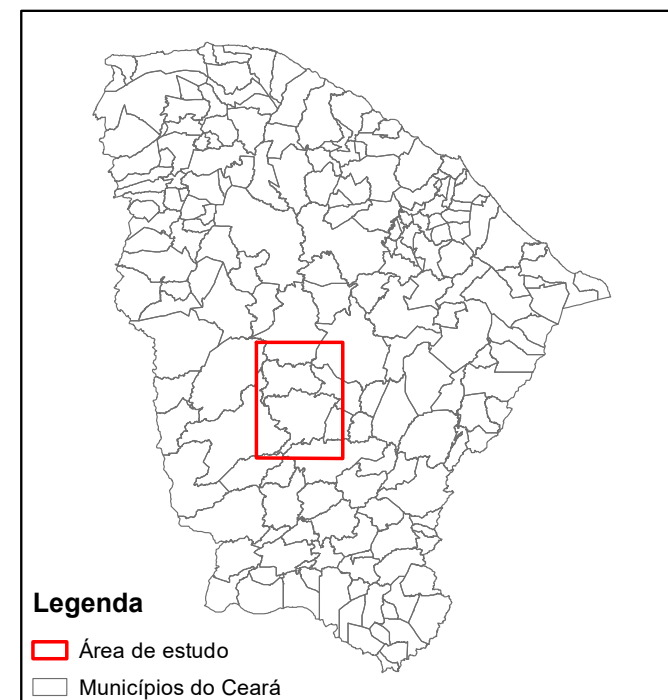
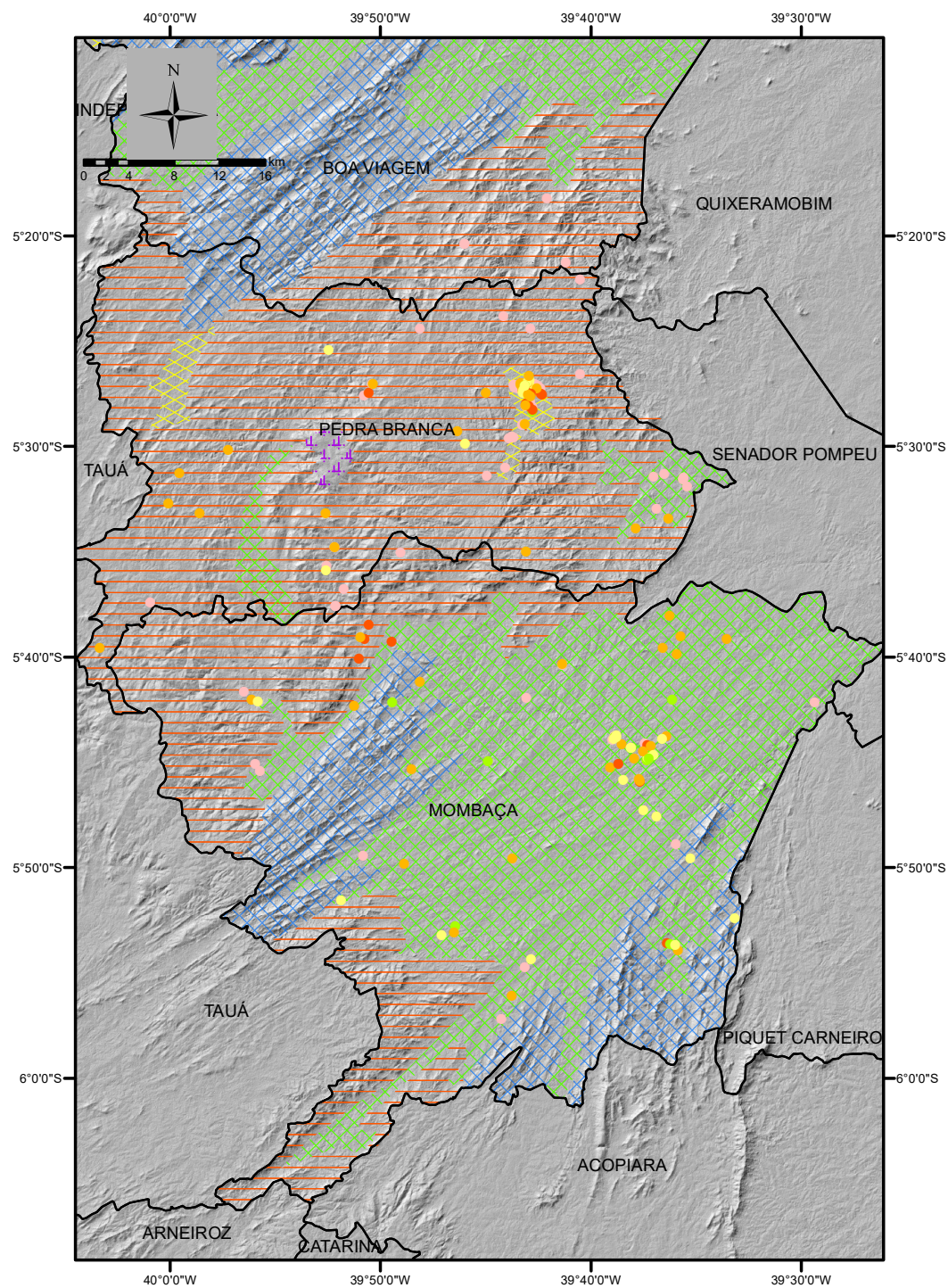


FIGURA 11: COMPARTIMENTOS MORFOLÓGICOS E DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)  
ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF)  
COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH)

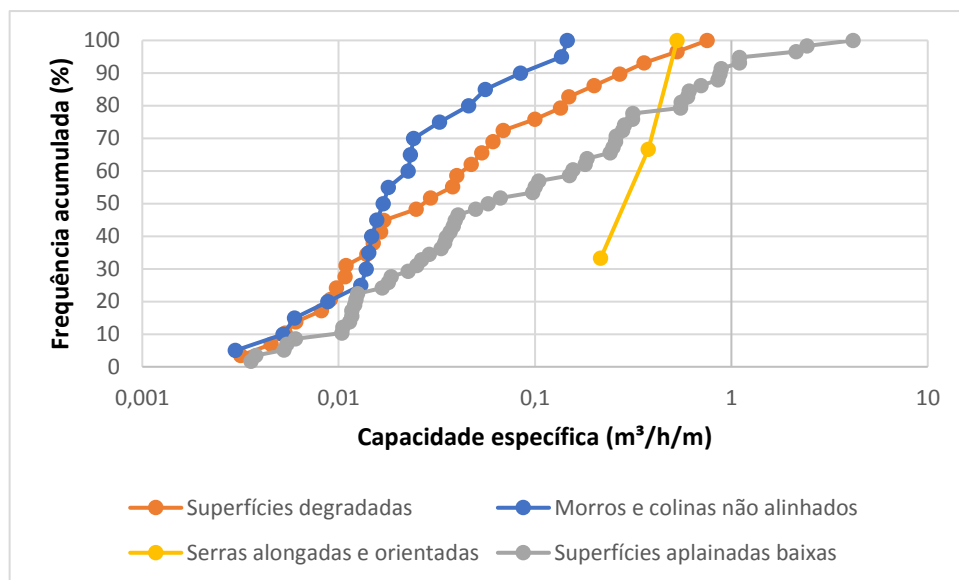


Figura 12: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os compartimentos geomorfológicos.

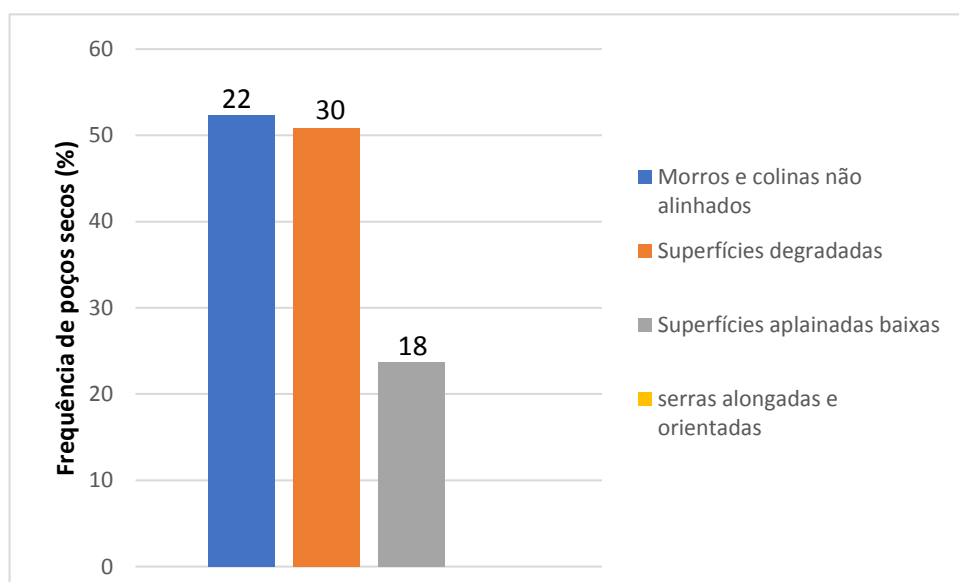


Figura 13: Frequência (%) e valor absoluto de poços secos por compartimento geomorfológico.

A área classificada como planalto não possui poços, enquanto que a região de serras alongadas e orientadas possui apenas 3 poços. Já nas áreas classificadas como superfícies aplainadas e superfícies degradadas, se encontram a maior quantidade de poços. Isso se deve a maior extensão territorial dessas morfologias dentro da área de estudo e ao fato de serem as regiões mais habitadas e que, portanto, demandam maior quantidade de água. O apêndice E traz o mapa morfológico produzido, contendo a distribuição dos poços.

A produtividade em função dos compartimentos geomorfológicos (Figuras 12 e 13), demonstrou que os poços instalados nas superfícies aplainadas e degradadas são os mais produtivos (mediana de 0,06 m<sup>3</sup>/h/m para superfícies aplainadas baixas e de 0,02 m<sup>3</sup>/h/m para superfícies degradadas), enquanto na região de colinas e morros são verificadas as menores produtividades (mediana de 0,01 m<sup>3</sup>/h/m). Esse resultado foi condizente com o previsto, dado que os compartimentos de superfícies aplainadas e superfícies degradadas são relativamente rebaixados. Nessas regiões, o nível d'água é mais elevado e, assim, a espessura de zona saturada é maior. Desse modo, há mais chance de haver fraturas mais transmissivas (Fernandes, 2008). Além disso, o relevo condiciona o tempo de concentração da água e a velocidade de escoamento (Ribeiro, 2010) e, assim, em terrenos acidentados a taxa de infiltração é restrita, devido ao maior escoamento da água superficial, que proporciona menor contado entre água e solo/rocha. Já áreas planas favorecem o contado entre água superficial e solo, proporcionando maiores taxas de infiltração.

### *7.3.2 Classificação altimétrica*

A partir do resultado anterior, optou-se por verificar a influência da altimetria da superfície do terreno na produtividade dos poços, tentando diferenciar as superfícies degradadas das superfícies aplainadas, em função de suas altitudes. Para isso, a partir do mapa hipsométrico (Figura 14), a superfície foi dividida em 4 classes de elevação topográfica: 100 a 400 m, 400 a 500 m, 500 a 600 m e 600 a 700 m.



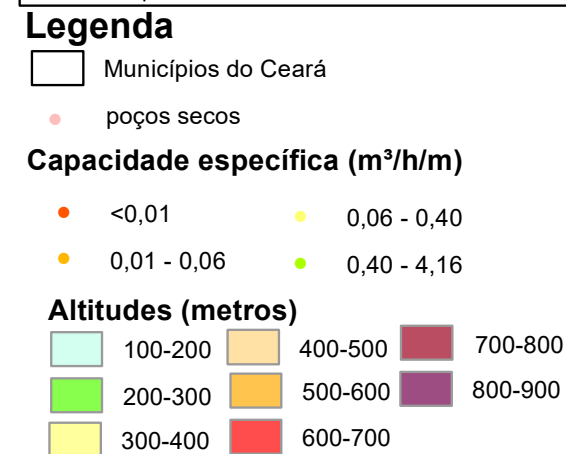
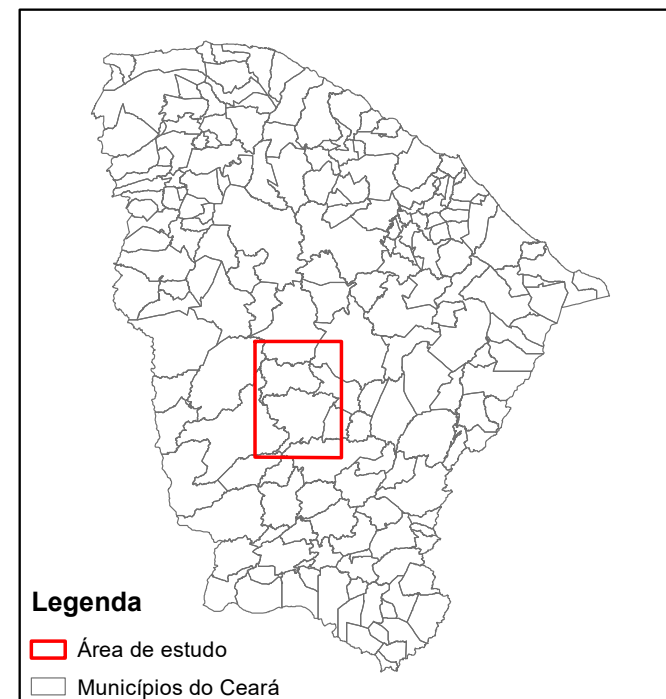
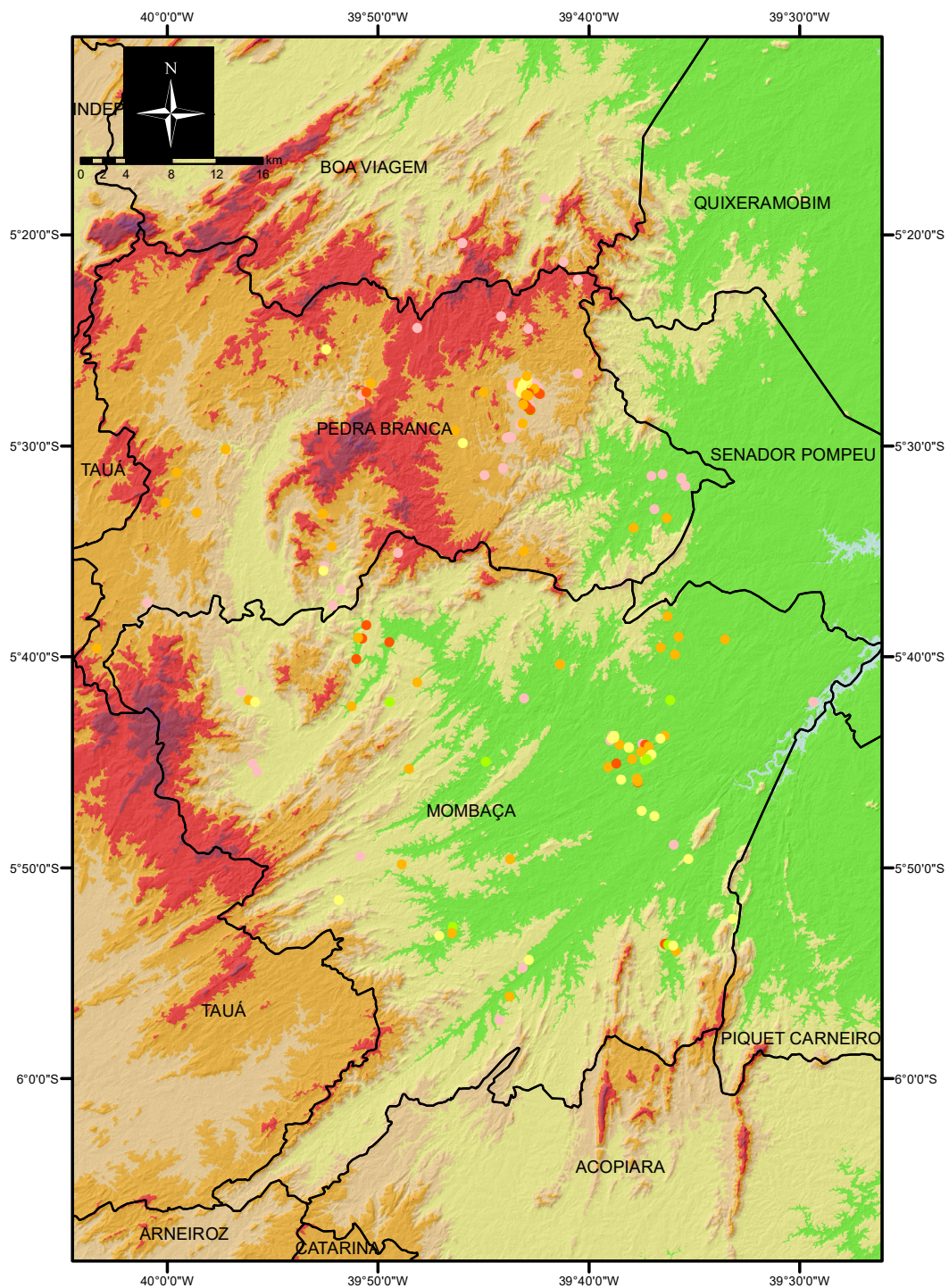


FIGURA 14: HIPSONETRIA E DISTRIBUIÇÃO DOS POÇOS

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)  
ALASKA SATELLITE FACILITY (ASF)  
COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH)

As figuras 15 e 16 apresentam, respectivamente, o gráfico de frequência acumulada dos valores de capacidade específica e a frequência de poços secos para cada classe altimétrica.

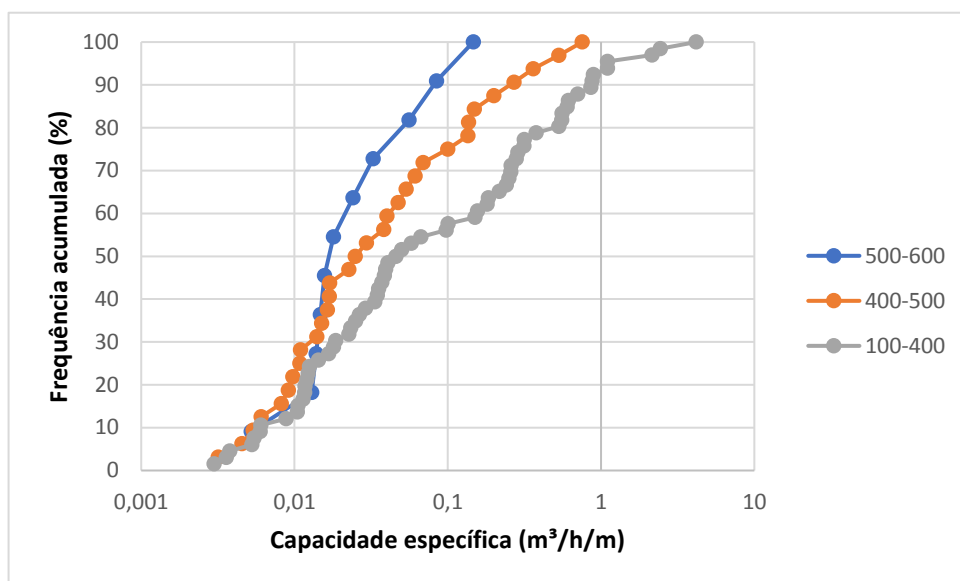


Figura 15: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para as classes altimétricas.

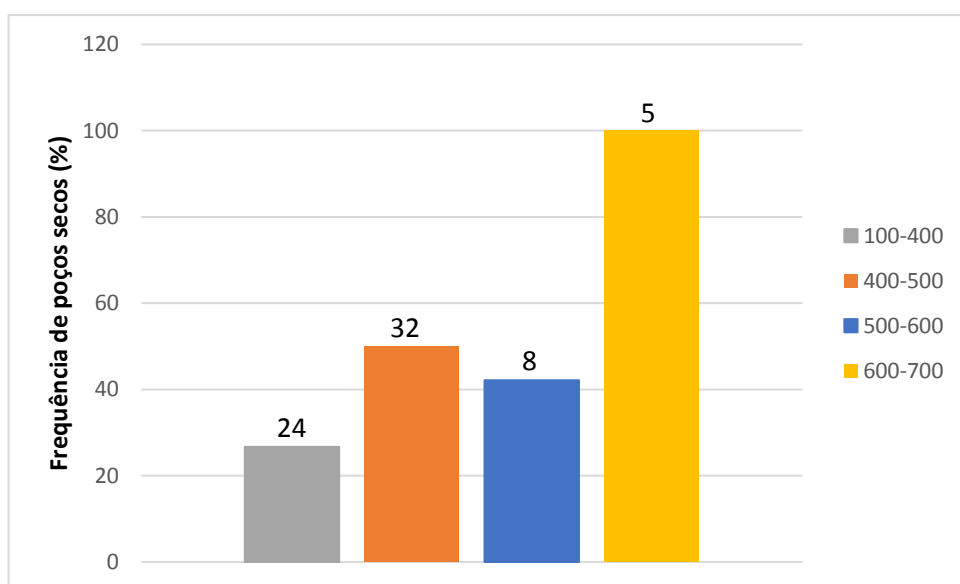


Figura 16: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos por classe altimétrica.

O resultado da produtividade dos poços em relação à altimetria (figuras 15 e 16) corrobora com o obtido para os compartimentos geomorfológicos, demonstrando que de fato áreas de menor altimetria são mais produtivas. Isso provavelmente está atrelado ao fato de que em áreas de menor altitude o nível d'água está mais próximo à superfície (Fernandes, 2008) e, como as fraturas se desenvolvem principalmente próximo à superfície (Freeze and Cherry, 1979), uma maior quantidade de fraturas está saturada.



### 7.3.3 Feições geomorfológicas

Com base no modelo digital de terreno, no mapa hipsométrico e no mapa de declividade, foram distinguidas as regiões de topo, encosta e talvegue. Os poços instalados em encostas apresentam as menores produtividades e poços em talvegues, as melhores (Figura 17). Como comentado anteriormente, terrenos mais acidentados favorecem uma recarga mais limitada, pois há escoamento superficial e menor disponibilidade de água a ser infiltrada; enquanto terrenos mais planos favorecem maiores taxas de infiltração. Além disso, há maior chance de talvegues estarem encaixados em zonas fraturas, como propõem Bertachini (1987), bem como de possuírem solo mais espesso e nível d'água mais raso (Fernandes, 2008). Os topos apresentam um comportamento intermediário, mas, a baixa quantidade de dados não permite uma boa representatividade de seu comportamento. Sua produtividade superior às regiões de encosta pode ser devido à pouca representatividade de seus dados e ao fato de que, na área de estudo, as regiões de topo são predominantemente área planas (Apêndice A) e, portanto, as condições de infiltração das águas são melhores do que em topos pontiagudos e/ou encostas.

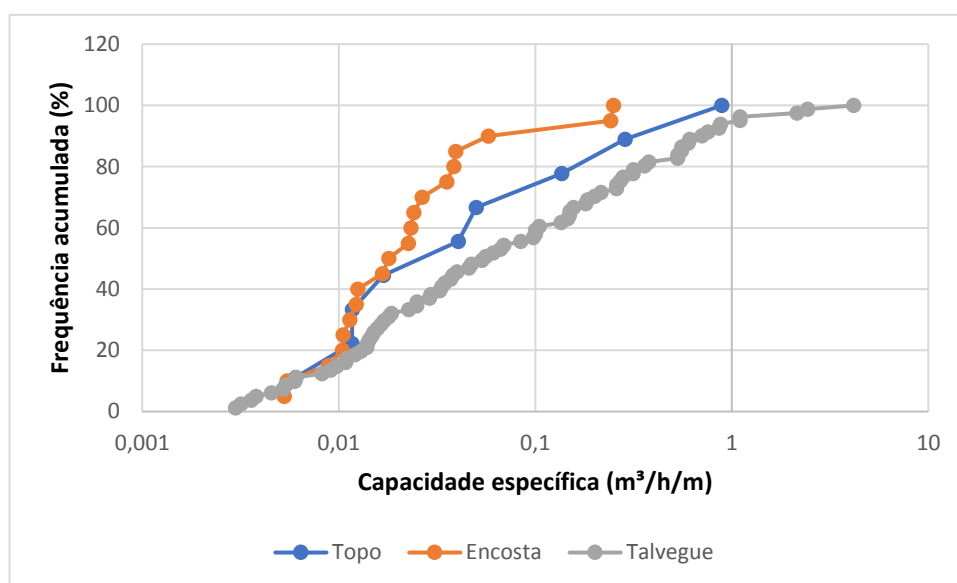


Figura 17: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para as diferentes feições geomorfológicas.

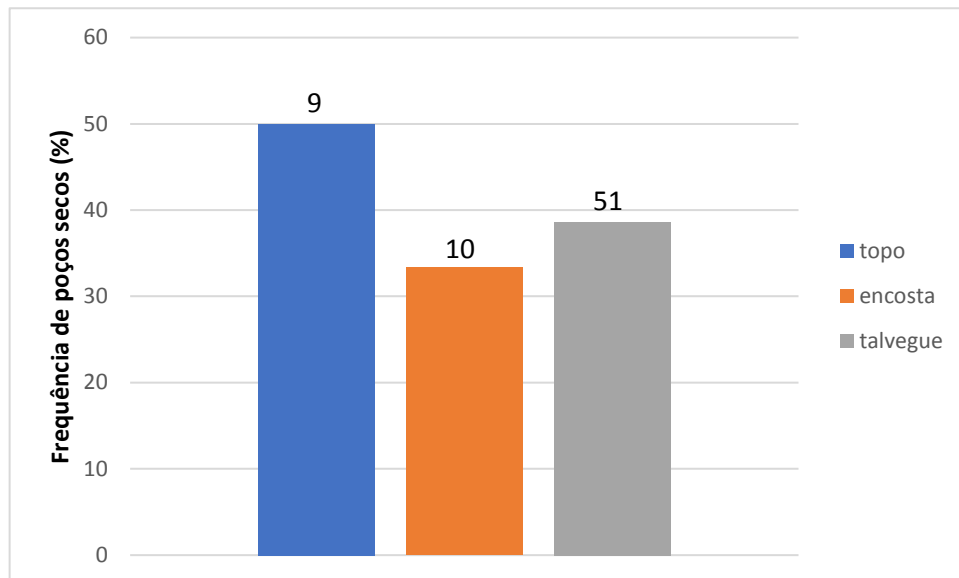


Figura 18: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para as diferentes feições geomorfológicas.

Ademais, analisando as curvas de frequência acumulada da produtividade em relação às formas geomorfológicas, à altimetria e às feições topográficas (Figuras 12, 15 e 17), nota-se, porém, que o comportamento das curvas são semelhante para todas as categorias nos valores de capacidade específica mais baixos, isso porque, valores baixos de capacidade específica ou poços secos podem ser encontrados em todas as regiões, mesmo onde melhores produtividades são esperadas, como no caso dos talwegues, que apesar de terem as maiores produtividades, possuem uma significativa quantidade de poços secos (Figura 18).

#### 7.4 Produtividade segundo a geologia estrutural

O estudo da geologia estrutural consistiu em análises locais e regionais. Para ambas as escalas, local 1:25.000 e regional 1:100.000, os lineamentos tiveram suas direções, comprimentos e distâncias aos poços relacionadas aos valores de capacidade específica, enquanto que somente a escala regional deu origem a compartimentos estruturais, que por sua vez também foram relacionados com a produtividade dos poços.

A seguir são apresentados os resultados das análises estruturais efetuadas para as duas abordagens.

#### 7.4.1 Análise regional

Com base na interpretação do mapa do modelo digital de elevação foi confeccionado o mapa de lineamentos regionais com 1019 traços, em escala 1:100.000. A partir desses lineamentos foram determinadas as direções estruturais principais da área de estudo e o comprimento acumulado dos lineamentos para cada direção, os quais estão apresentados a seguir nas figuras 19 e 20.

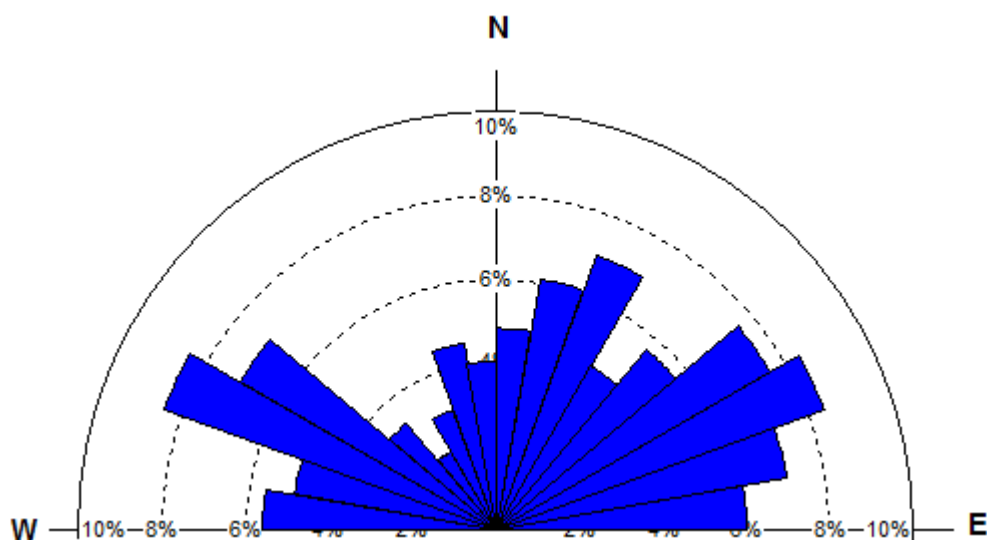


Figura 19: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções do conjunto total de lineamentos presentes na área de estudo. Intervalo de cada barra igual a 10°.

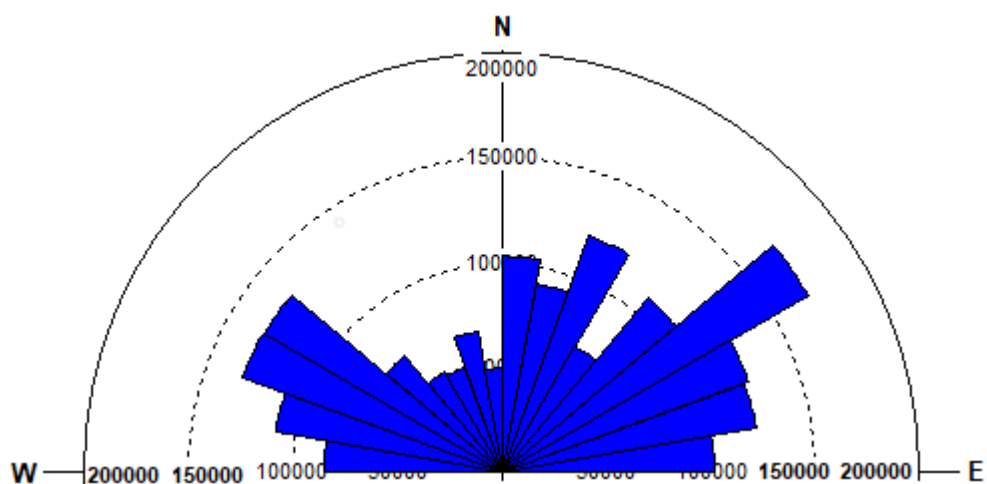


Figura 20: Diagrama de rosáceas com os valores do comprimento acumulado dos lineamentos (em metros) para cada direção, para o conjunto total de lineamentos presentes na área de estudo. Intervalo de cada barra igual a 10°.

Com os diagramas (Figuras 19 e 20), nota-se que os *ranges* N50-80E, N50-70W e N10-30E são os mais significativos da área, correspondendo, respectivamente, a aproximadamente 22%, 15% e 13% dos lineamentos traçados e que dentre as direções predominantes, o *trend* N50-60E possui os maiores comprimentos acumulados.

#### 7.4.1.1 Compartimentos estruturais

Com base no mapa de lineamentos regionais, a área de estudo foi compartimentada em 7 áreas, de acordo com os padrões de lineamentos observados (Figura 21). A seguir, os compartimentos estruturais são descritos, de acordo com o observado no mapa de lineamentos e nos diagramas de rosáceas, e são apresentados os gráficos da frequência acumulada dos valores de capacidade específica (Figura 22) e da frequência de poços secos (Figura 23), por compartimento.

C1: Localizada a sudeste de Mombaça, foi distinguida como uma área com predomínio de lineamentos NE, com comprimentos relativamente maiores e com menor valor angular, em relação aos lineamentos dos compartimentos adjacentes. Lineamentos NE e NW, com maior valor angular e menor comprimento cortam esses lineamentos.

C2: Localizada a sudoeste de Mombaça, representa uma área com predomínio de lineamentos NE, com alto valor angular e comprimentos medianos, e com maior número de lineamentos NW, também com alto valor angular e comprimentos medianos. As direções N60-70E, identificadas pelo diagrama de rosáceas (Figura 21), são as principais direções estruturais para essa área, no entanto, lineamentos com direções N70-80W são significativos quanto ao comprimento acumulado.

C3: Estende-se por uma faixa de direção NE-SW, na região central de Mombaça, que contém longos lineamentos NE, com ângulos mais abertos (em relação ao compartimento 1, adjacente). Para o compartimento 3, as rosáceas (Figura 21) mostram predomínio das direções N50-70E, que, como visto no mapa de compartimentos estruturais ((Figura 21), também possuem os maiores valores de comprimento acumulado.

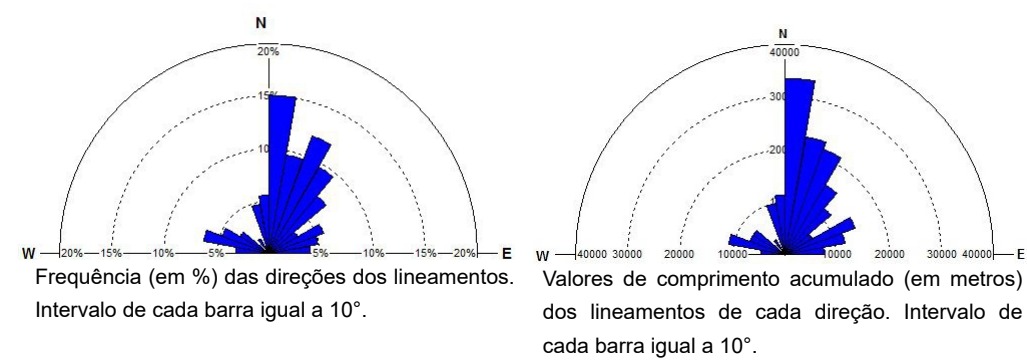
C4: É uma região que se destaca por lineamentos NE relativamente longos, de baixo ângulo, cortados por lineamentos NE e NW com altos valores angulares. As rosáceas (Figura 21) mostram que as direções N20-30E são de maior frequência e que o *trend* N20-50E representa as direções com os maiores comprimentos acumulados.

C5: Engloba o noroeste de Mombaça e a região sudoeste e central de Pedra Branca. Na área há predomínio de lineamentos NW, com comprimentos variados. Os diagramas de rosáceas (Figura 21) mostram que os lineamentos com direções N50-70W perfazem pouco mais 25% do total de lineamentos e possuem as maiores frequências acumuladas. Ademais, as direções N70-90E, também possuem comprimentos acumulados significativos.

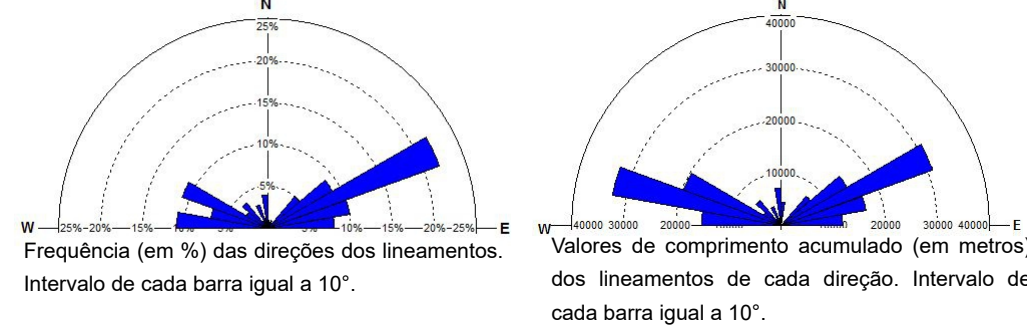
C6: No compartimento 6, localizado a leste de Pedra Branca, não há um nítido predomínio de uma direção sobre as outras. Os diagramas de rosáceas (Figura 21) mostram que os *trends* N- N30W e N70-90E são de maior frequência e também de maior comprimento acumulado.

C7: O compartimento 7 compreende o norte/nordeste de Pedra Branca e sudeste de Boa Viagem. Nessa área se destacam lineamento NE, de baixo ângulo, e lineamentos NW de alto ângulo. O *trend* N-N40E se destaca pelos maiores comprimentos acumulados.

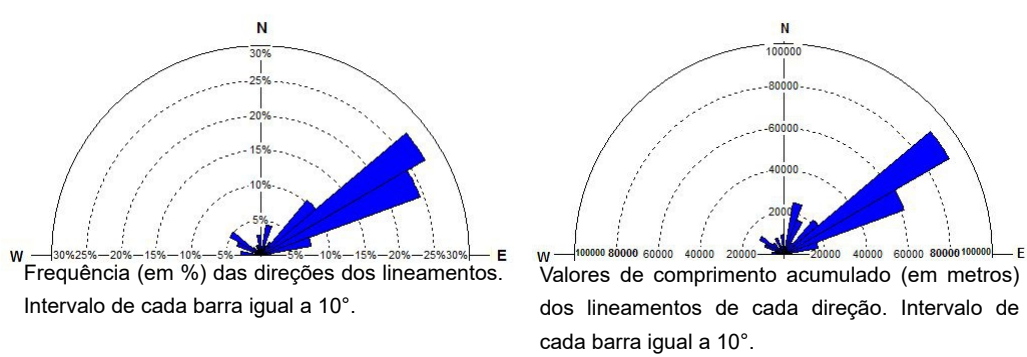
Compartmento 1



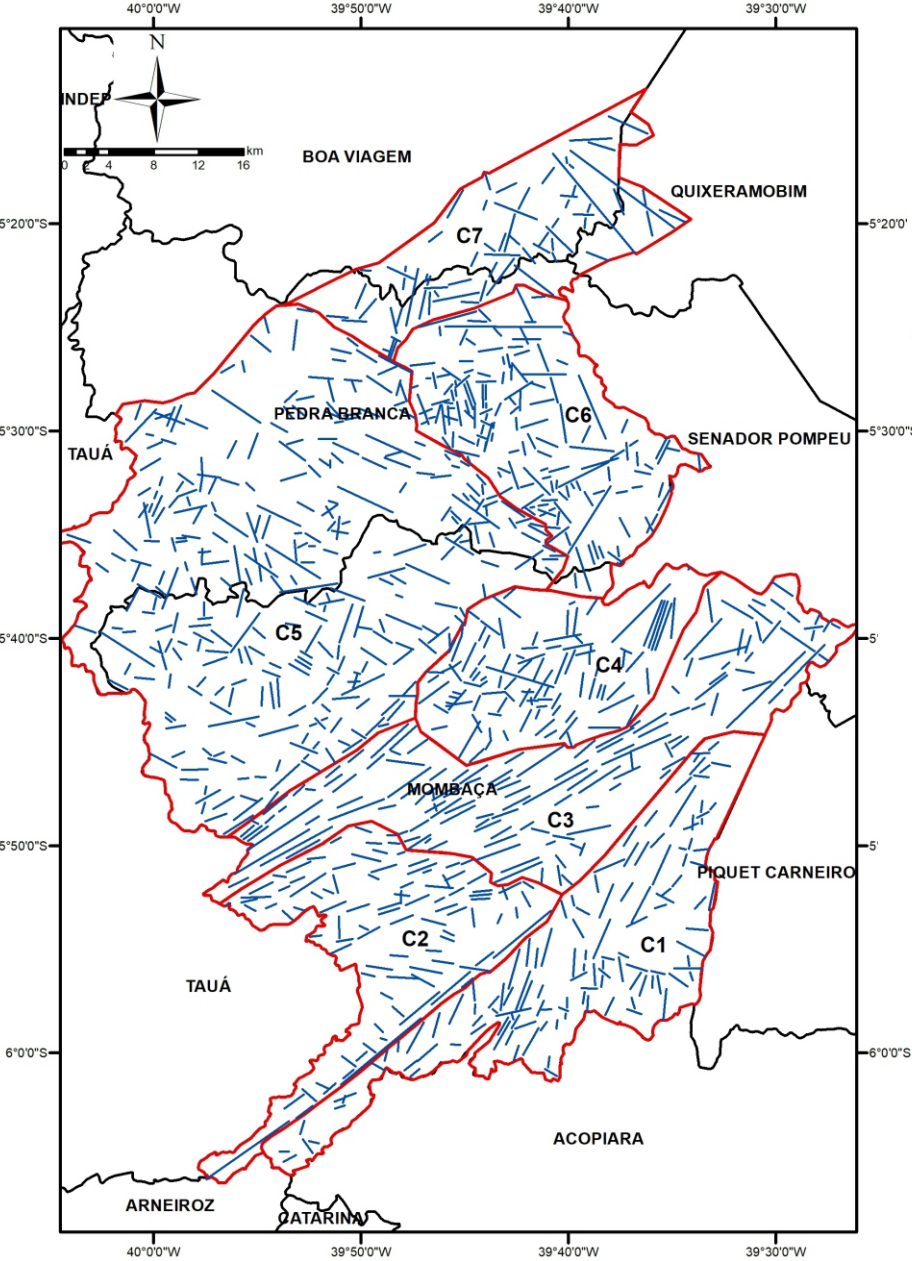
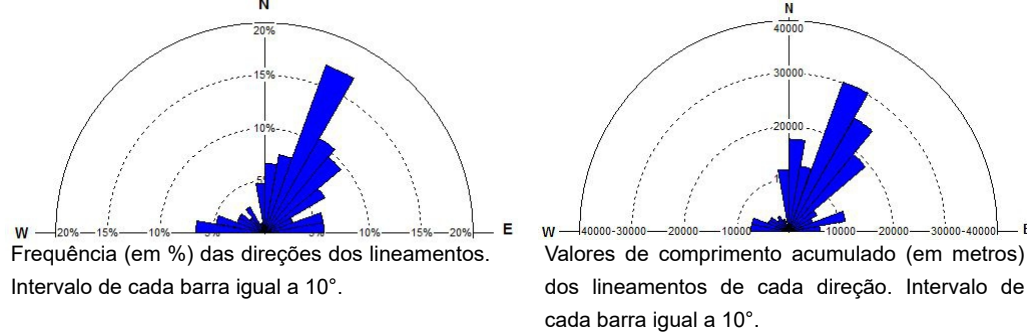
Compartmento 2



Compartmento 3

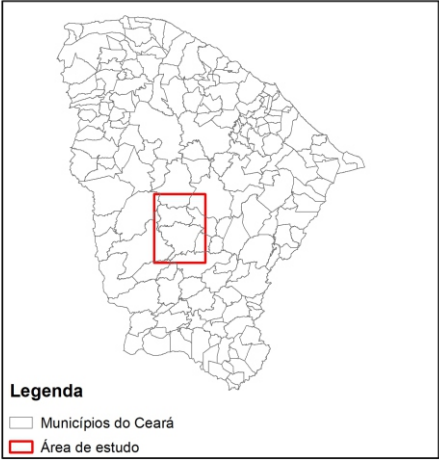


Compartmento 4

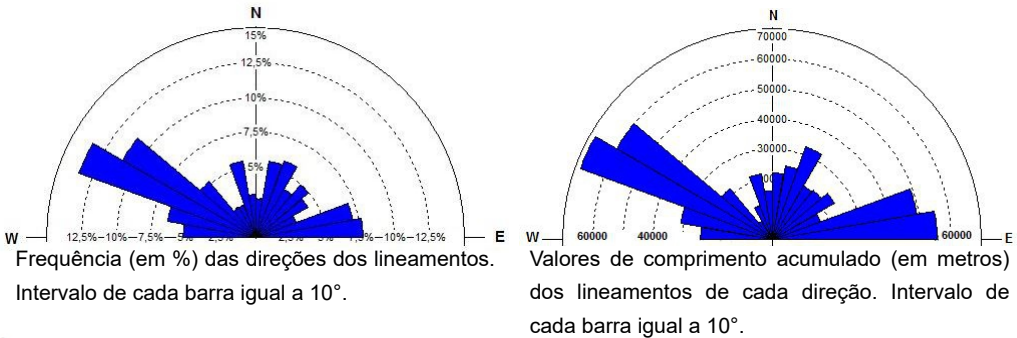


Legenda

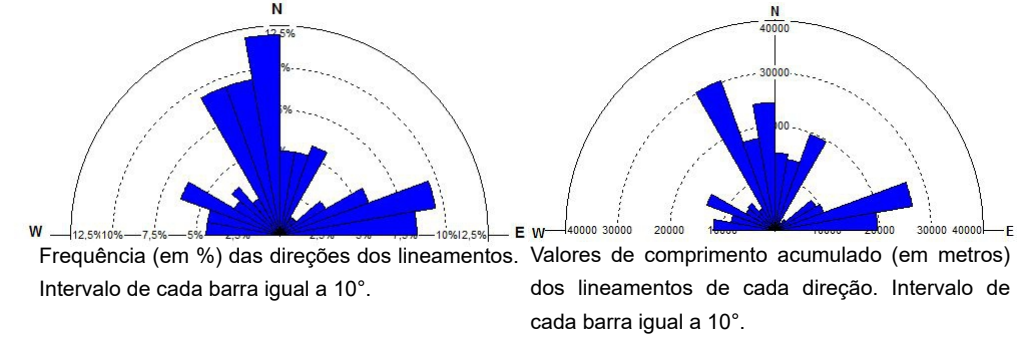
- Municípios do Ceará
- Compartmentos estruturais
- Lineamentos regionais



Compartmento 5



Compartmento 6



Compartmento 7

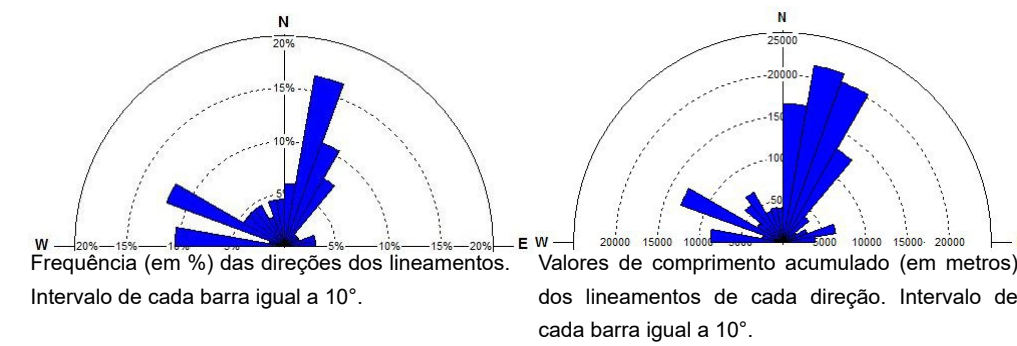


FIGURA 21: LINEAMENTOS REGIONAIS E COMPARTIMENTOS ESTRUTURAIS

PROJETO: TRABALHO DE FORMATURA

INSTITUIÇÃO: INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

FONTE: INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE)

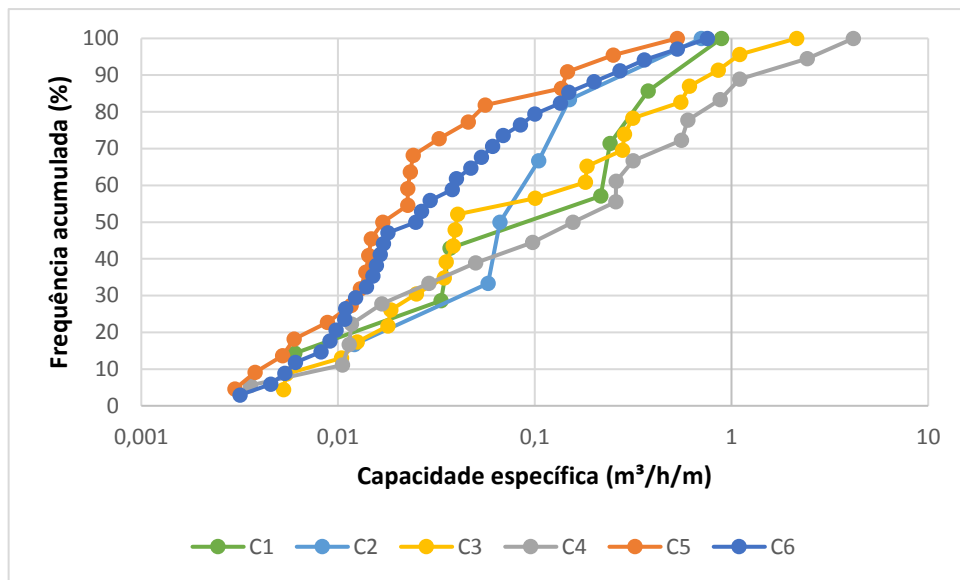


Figura 22: Frequência acumulada (em %) dos valores de capacidade específica para os diferentes compartimentos estruturais.

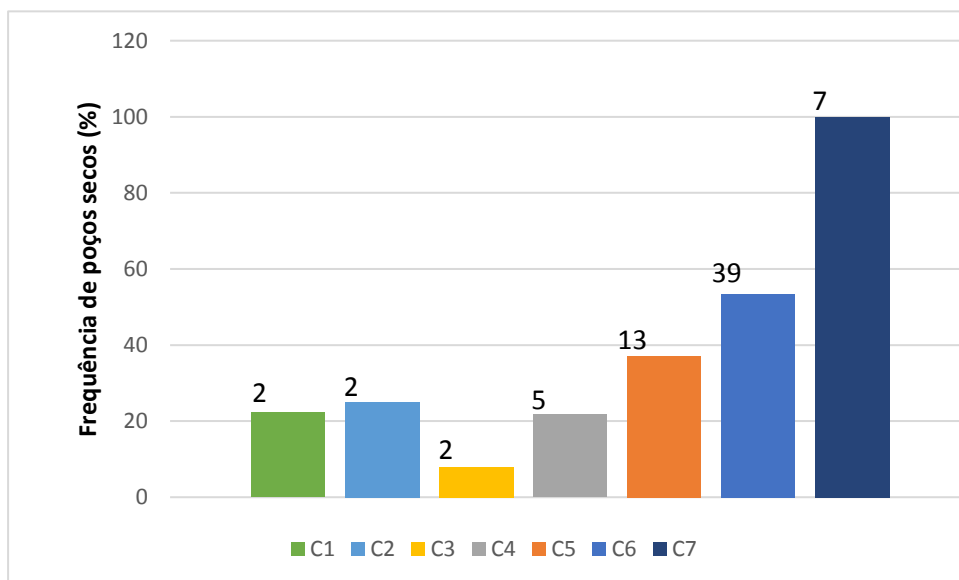


Figura 23: Frequência (em %) e valor absoluto de poços secos para os diferentes compartimentos estruturais.

A figura 22 mostra que até valores de 0,01  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$  para a capacidade específica, todos os compartimentos estruturais apresentam comportamento semelhante. Para maiores valores, as curvas representantes dos compartimentos 5 e 6, que possuem predomínio de lineamentos com direção NW, se distanciam das demais e passam a apresentar as menores produtividades. Segundo a figura 23, esses compartimentos ainda são os que possuem maior percentual de poços secos. Já o restante dos compartimentos, entre os valores de 0,01 e 0,05  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ , não apresentam um comportamento regular, principalmente os compartimentos 1 e 2, provavelmente em virtude da menor quantidade de poços. No entanto, a partir de 0,05  $\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$  é possível notar que o compartimento C4 apresenta maior produtividade que o



compartimento C3. Desse modo, a análise por compartimentos estruturais permitiu definir que áreas onde há predomínio de estruturas NW estão associadas às menores produtividades, enquanto que em áreas com predomínio de lineamentos NE, se verifica as melhores. Ainda é possível inferir que para as direções NE, menores rumos estão associados à maior produtividade.

#### 7.4.1.2 Análise dos lineamentos em escala 1: 100.000

Para análise da relação entre as direções dos lineamentos regionais e a produtividade dos poços, no total, foram analisados 110 lineamentos primários (mais próximos aos poços) e 59 lineamentos secundários (maior distância ao poço), considerando os lineamentos localizados em um raio de até 1 km ao redor de cada poço. Essa diferença se deve ao fato de que muitos poços estão próximos somente a um lineamento regional, considerando o raio estabelecido. A direção e distâncias desses lineamentos aos poços podem ser vistas no Apêndice A.

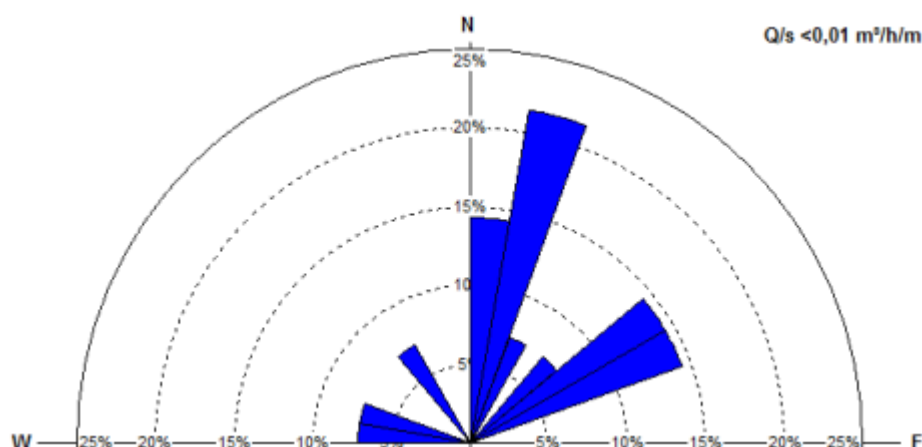


Figura 24: : Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe  $Q/s < 0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 14 dados de lineamentos.

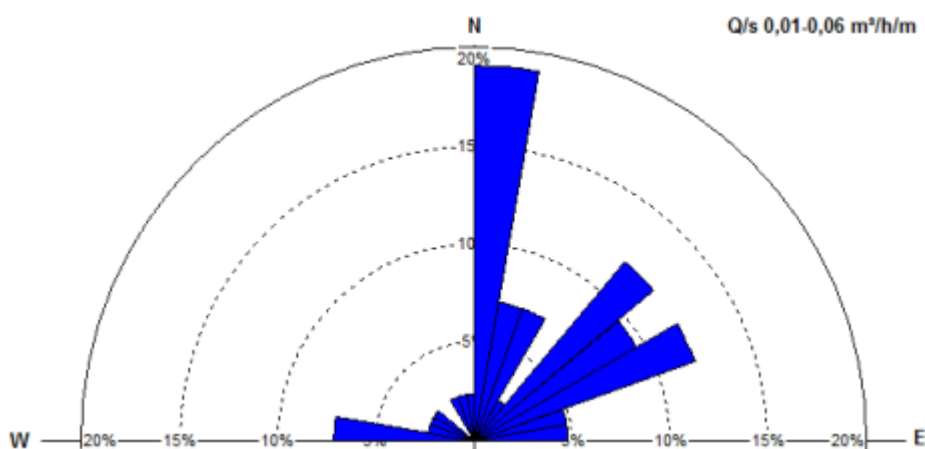


Figura 25: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe  $Q/s$  entre  $0,01-0,06 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 42 dados de lineamentos.



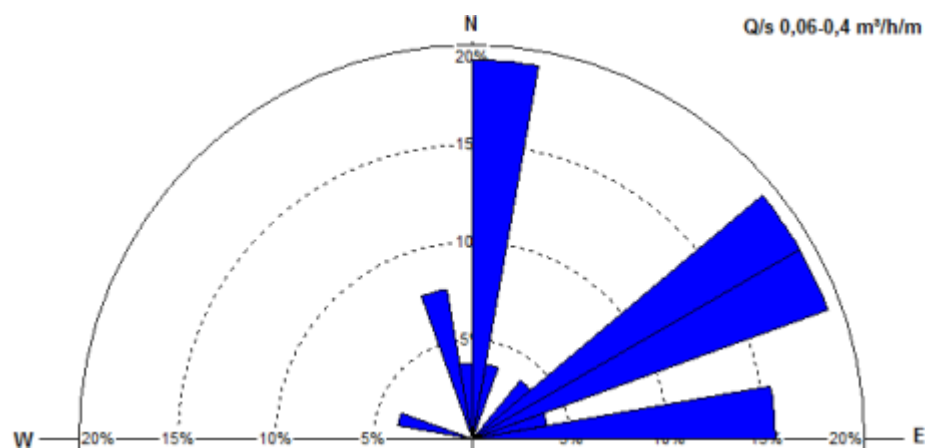


Figura 26: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe  $Q/s$  entre  $0,06-0,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 26 dados de lineamentos.

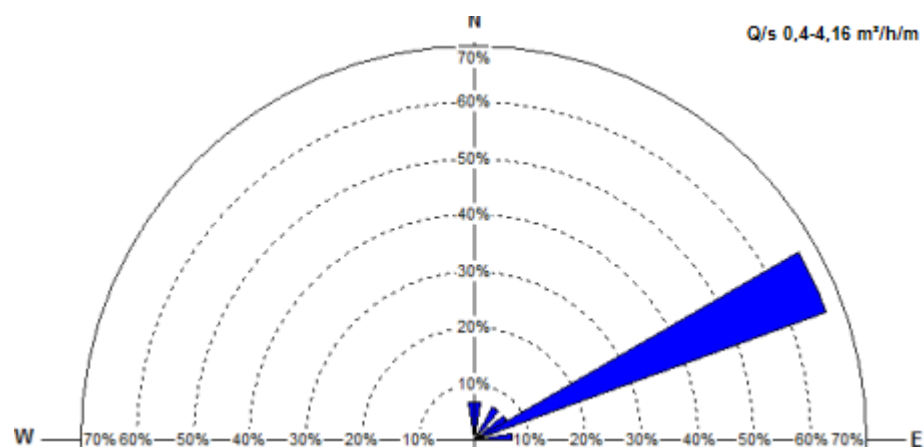


Figura 27: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:100.000) associados à classe  $Q/s$  entre  $0,4-4,16 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 15 dados de lineamentos.

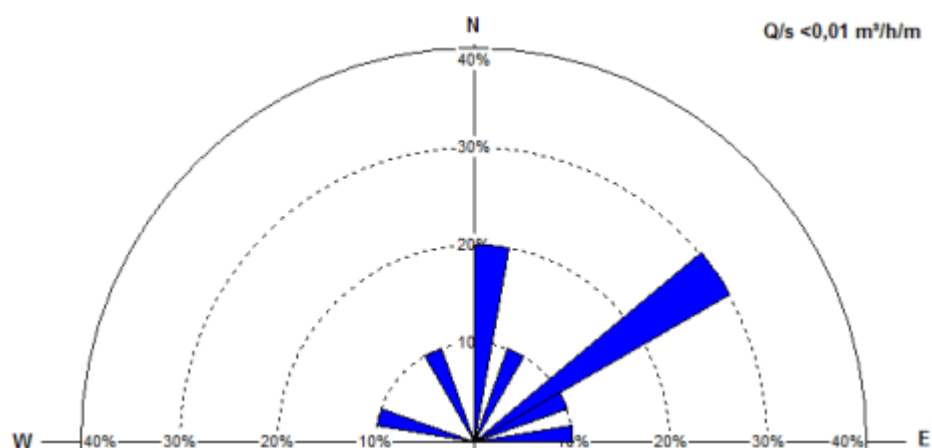


Figura 28: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe  $Q/s < 0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 10 dados de lineamentos.

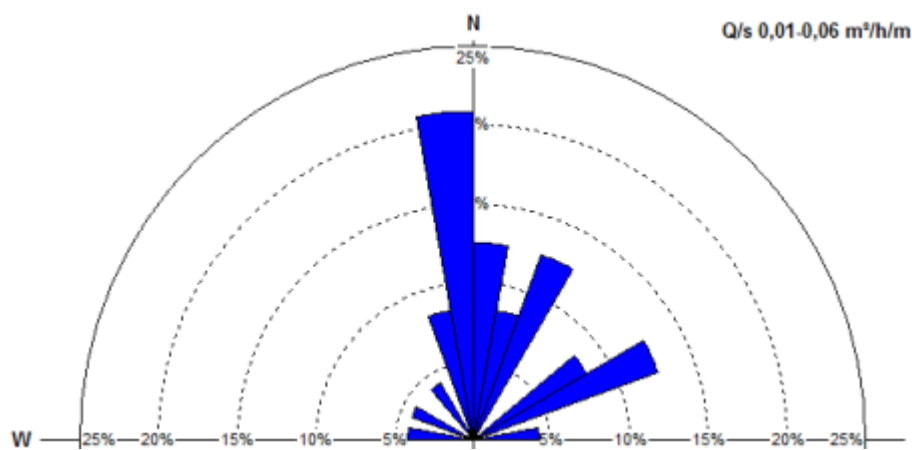


Figura 29: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe Q/s entre 0,01-0,06 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 24 dados de lineamentos.

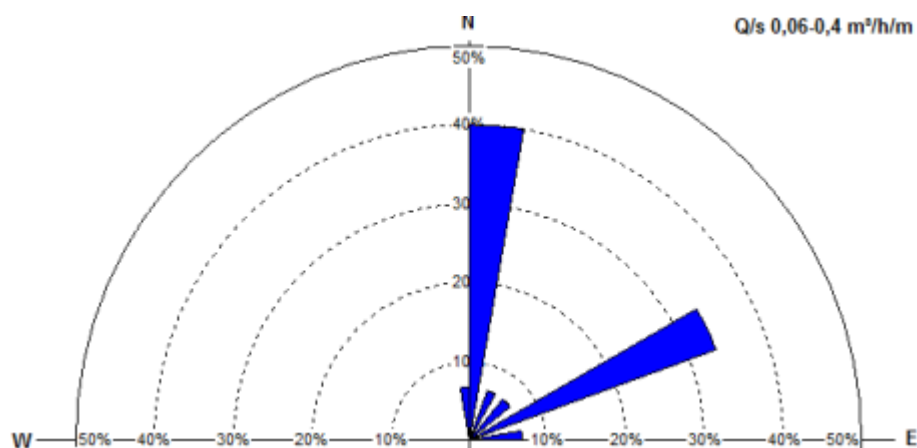


Figura 30: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe Q/s entre 0,06-0,4 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.

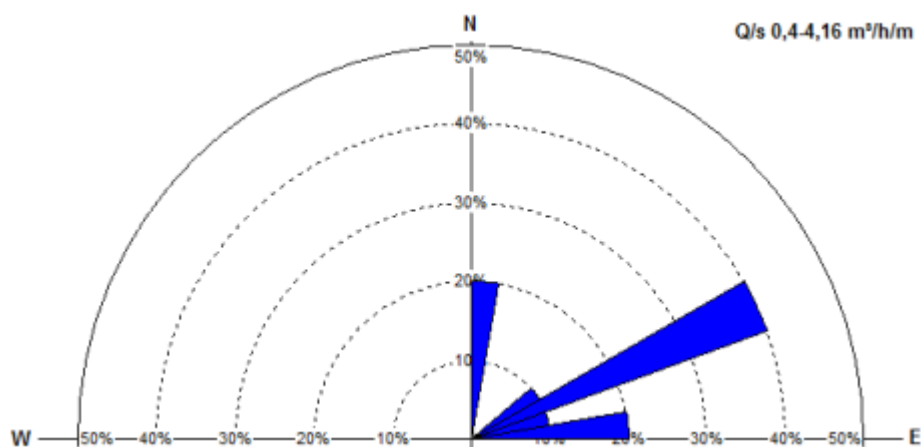


Figura 31: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:100.000) associados à classe Q/s entre 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual 10° e 10 dados de lineamentos.

De acordo com as figuras 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31, é possível verificar que os poços estão próximos predominantemente a lineamentos com direção NE e que não há *trends* que estejam associados a uma classe de capacidade específica em particular. Comparando-se cada classe de capacidade específica em relação aos seus lineamentos primários e secundários, nota-se que na maioria dos casos (com exceção da classe Q/s 0,01-0,06 m³/h/m) as direções predominantes dos lineamentos primários se repetem para os lineamentos secundários. Já a comparação entre as diferentes classes de capacidade específica revela que elas possuem, sem pormenorizar, a predominância das mesmas direções, estando elas situadas entre os ranges N- N10E e N50-70E.

Com base no resultado anterior, em que não se verificou correlação entre as direções dos lineamentos regionais com a produtividade dos poços, a análise da relação entre distância do lineamento ao poço e comprimento do lineamento com a capacidade específica foi realizada para os lineamentos primários e secundários, sem estabelecer uma direção fixa. Desse modo, foram considerados todos os lineamentos.

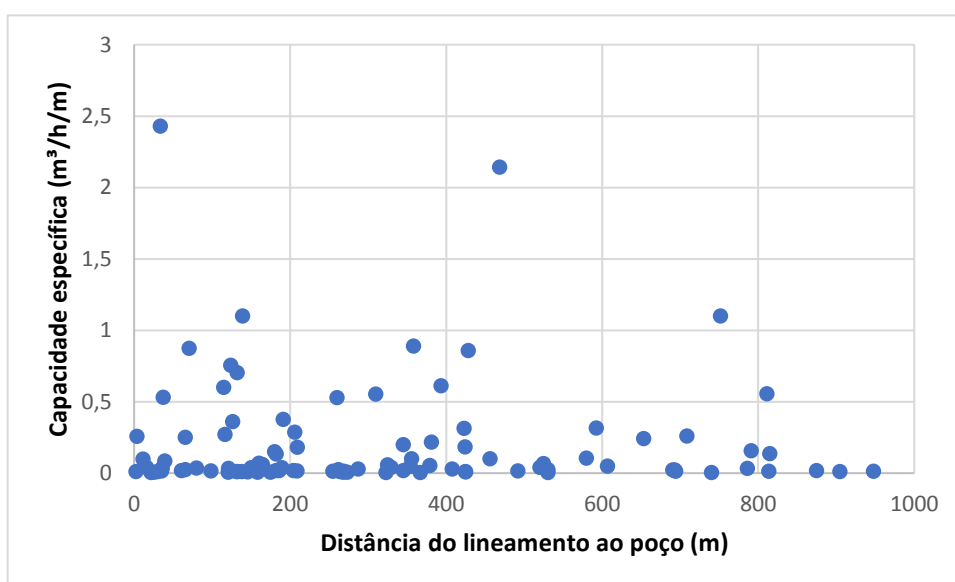


Figura 32: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento regional primário.

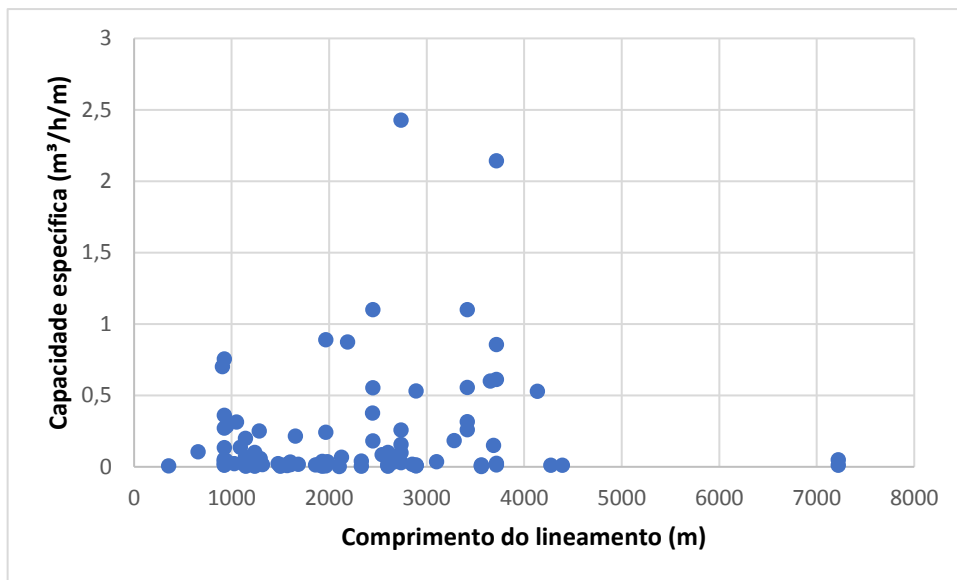


Figura 33: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento regional primário.

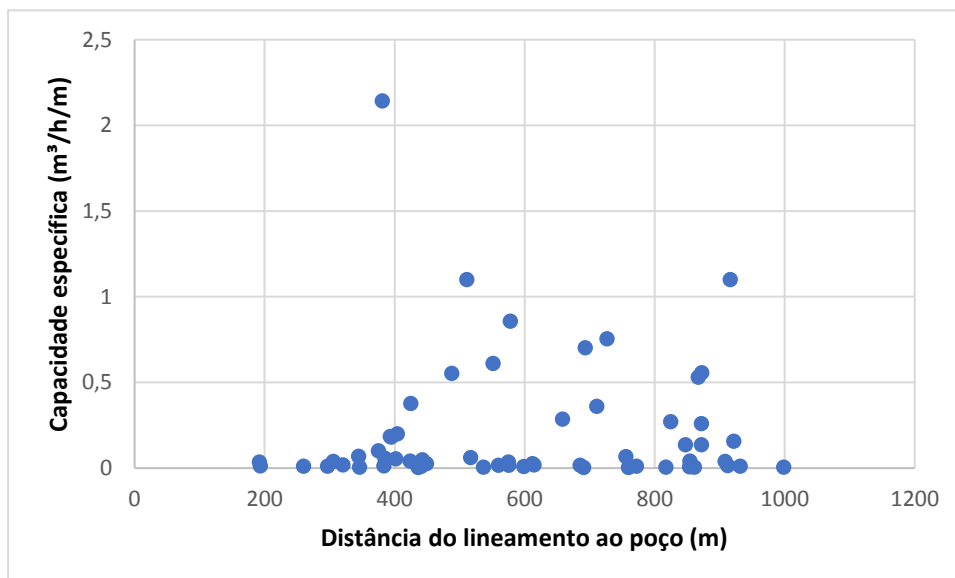


Figura 34: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento regional secundário.

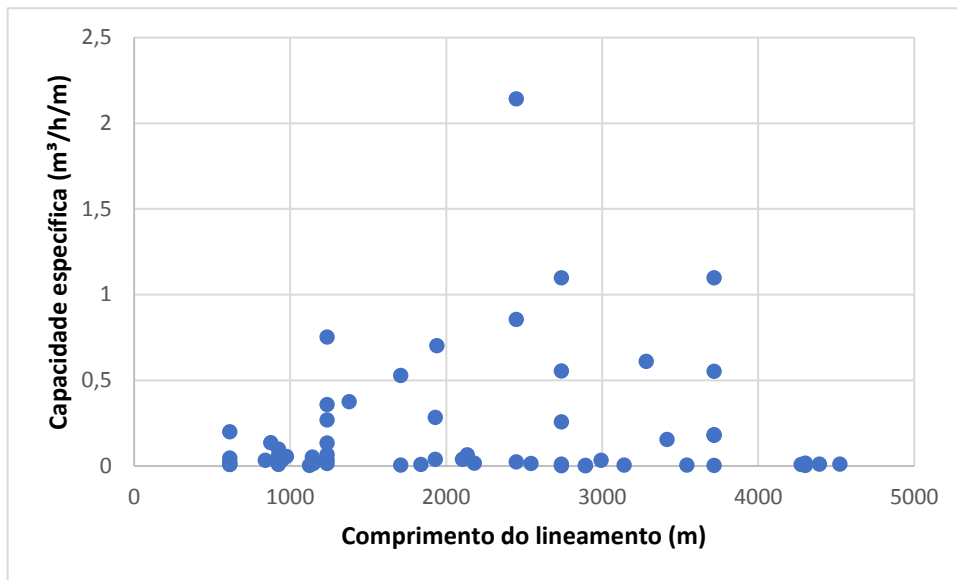


Figura 35: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento regional secundário

Para os lineamentos primários, o gráfico de dispersão entre capacidade específica e distância ao lineamento (Figura 32) demonstra que distâncias menores, em geral, têm maior quantidade de poços mais produtivos, o que não exclui a chance de maiores distâncias também estarem associadas a poços com capacidade específica alta. Em relação ao comprimento (Figura 33), não há relação clara com a produtividade dos poços.

Para os lineamentos secundários, as duas análises (Figuras 34 e 35) não expressam dependência da produtividade em relação ao comprimento e distância aos lineamentos.

#### 7.4.2 Análise local

##### 7.4.2.1 Análise dos lineamentos em escala 1:25.000

Na análise local da relação entre as direções dos lineamentos a produtividade dos poços foram utilizados 110 lineamentos primários e 105 lineamentos secundários. A direção e distâncias desses lineamentos aos poços podem ser vistas no apêndice A.

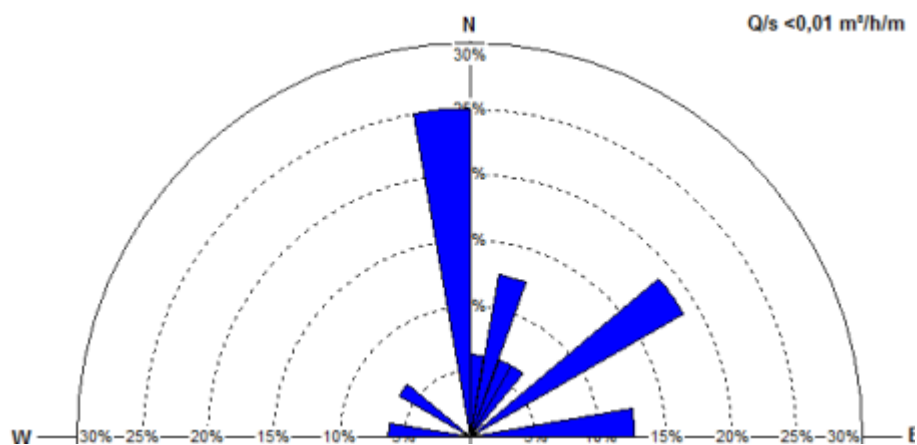


Figura 36: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe  $Q/s < 0,01 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 16 dados de lineamentos.

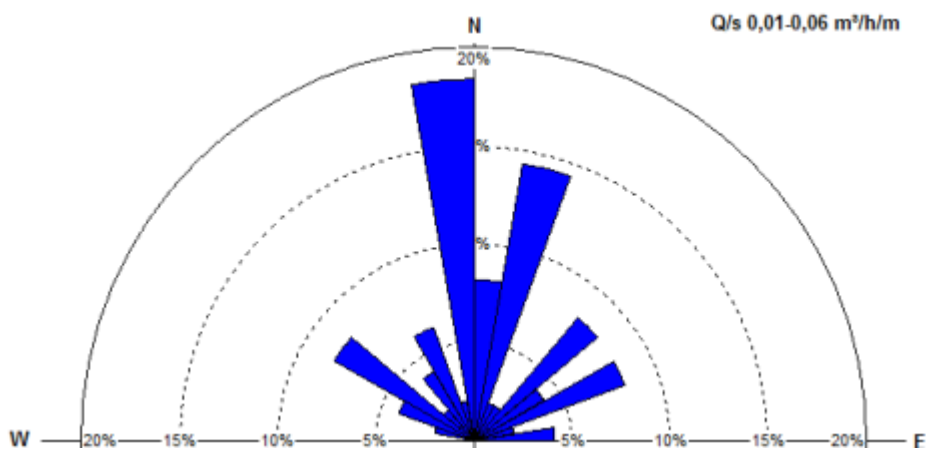


Figura 37: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe  $Q/s 0,01-0,06 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 49 dados de lineamentos.

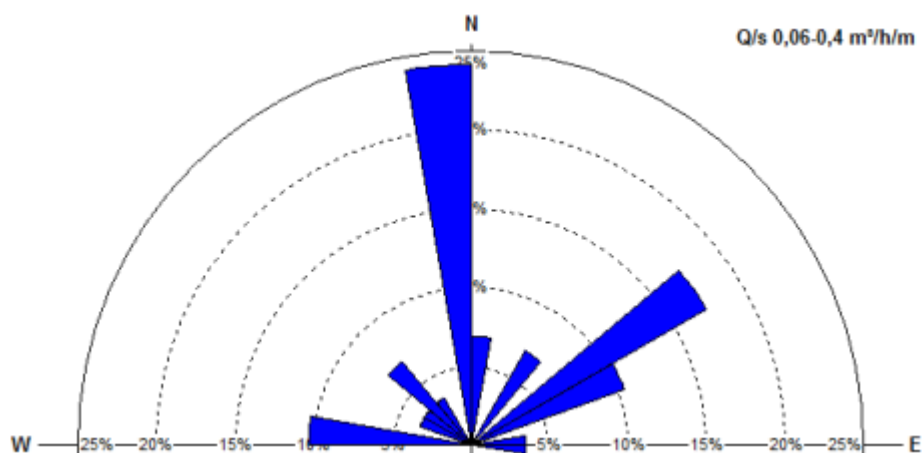


Figura 38: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe  $Q/s 0,06-0,4 \text{ m}^3/\text{h/m}$ . Intervalo de cada barra igual a  $10^\circ$  e 29 dados de lineamentos.

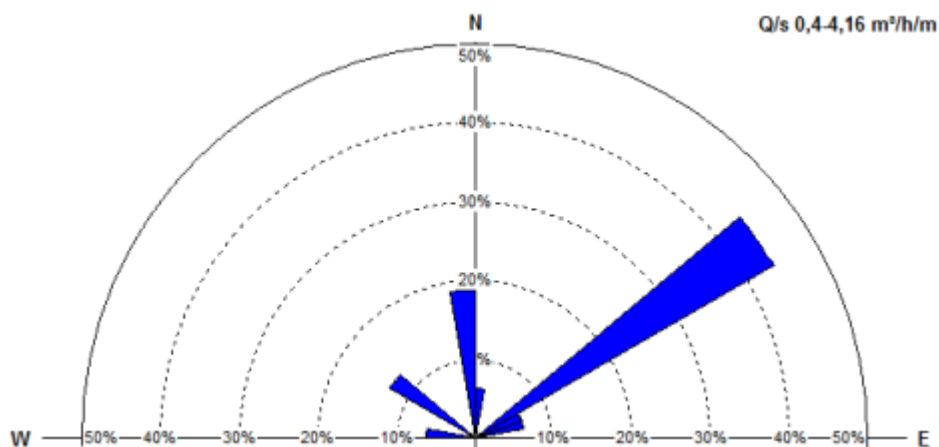


Figura 39: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos primários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 16 dados de lineamentos.

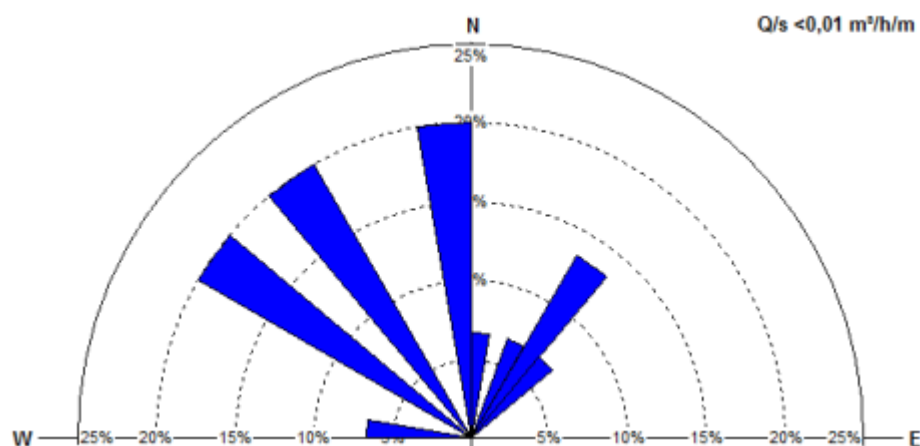


Figura 40: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s <0,01 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.

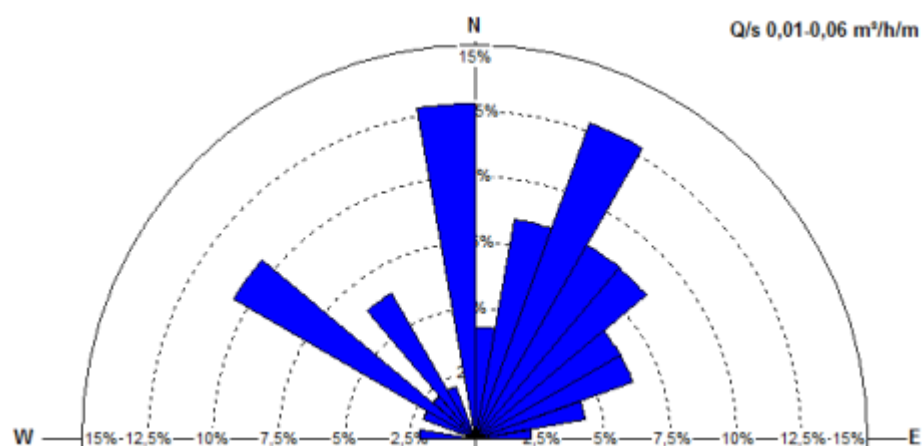


Figura 41: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,01-0,06 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 47 dados de lineamentos.

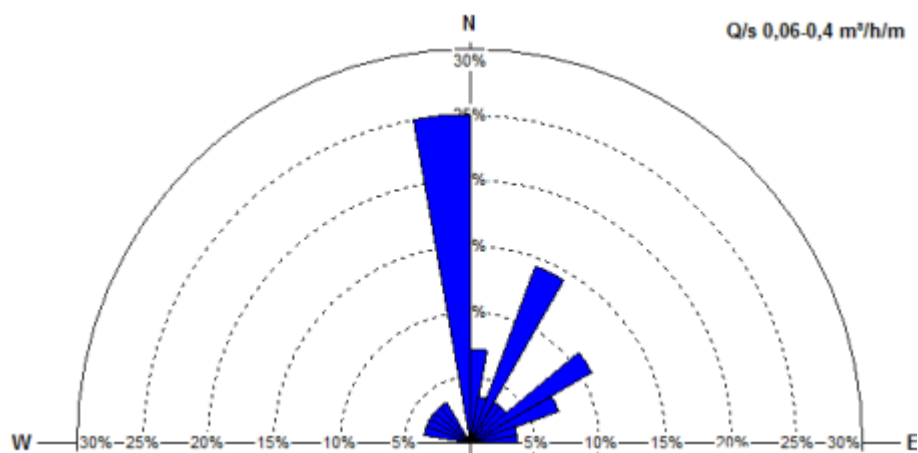


Figura 42: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,06-0,4 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 28 dados de lineamentos.

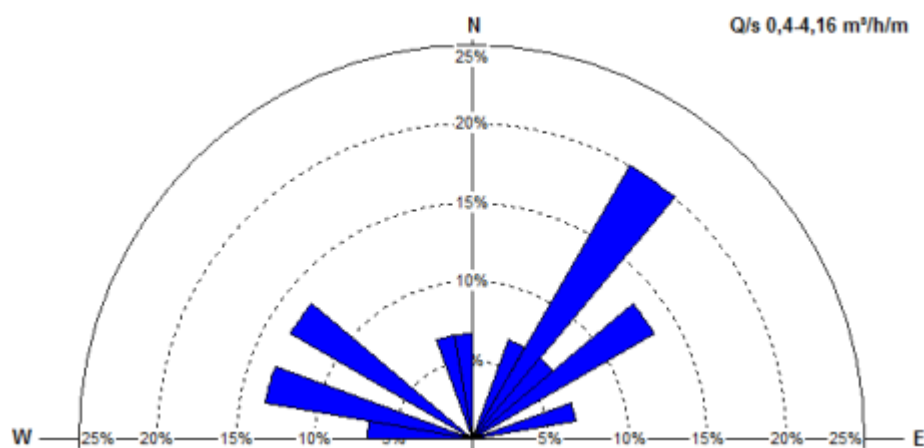


Figura 43: Diagrama de rosáceas com os valores de frequência (em %) das direções dos lineamentos secundários (escala 1:25.000) associados à classe Q/s 0,4-4,16 m³/h/m. Intervalo de cada barra igual a 10° e 15 dados de lineamentos.

As figuras 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43 mostram que as direções dos lineamentos locais são mais variadas e não há predominância de lineamentos NE sobre lineamentos NW, ou vice-versa, e que semelhante ao que ocorre com os lineamentos regionais, não se verifica *trends* que estejam associados à uma classe de capacidade específica em particular.

Do mesmo modo que com os lineamentos regionais, a análise da relação entre distância do lineamento ao poço e comprimento do lineamento com a capacidade específica foi realizada para os lineamentos primários e secundários, sem estabelecer uma direção fixa, visto que não foi identificada relação clara entre direção e produtividade.



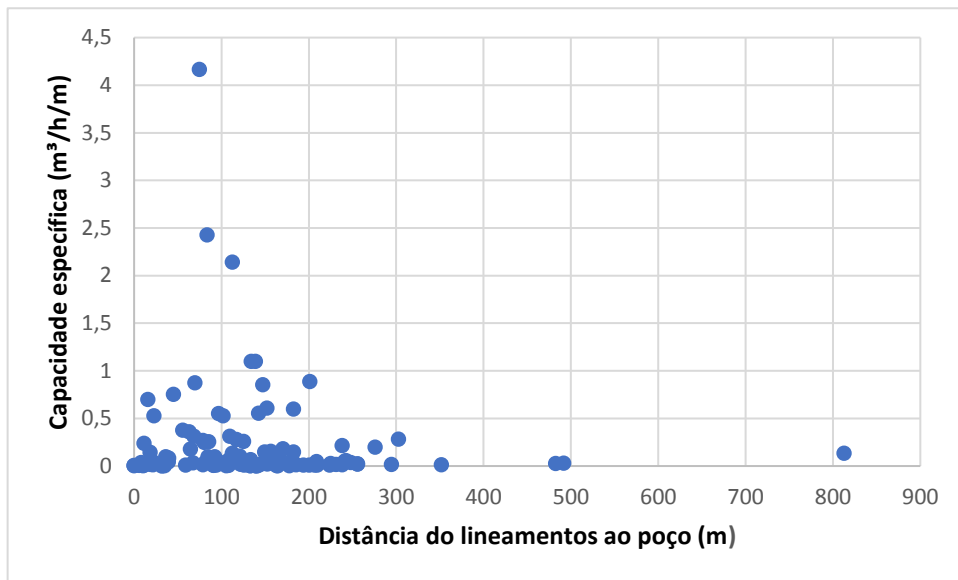


Figura 44: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento local primário.

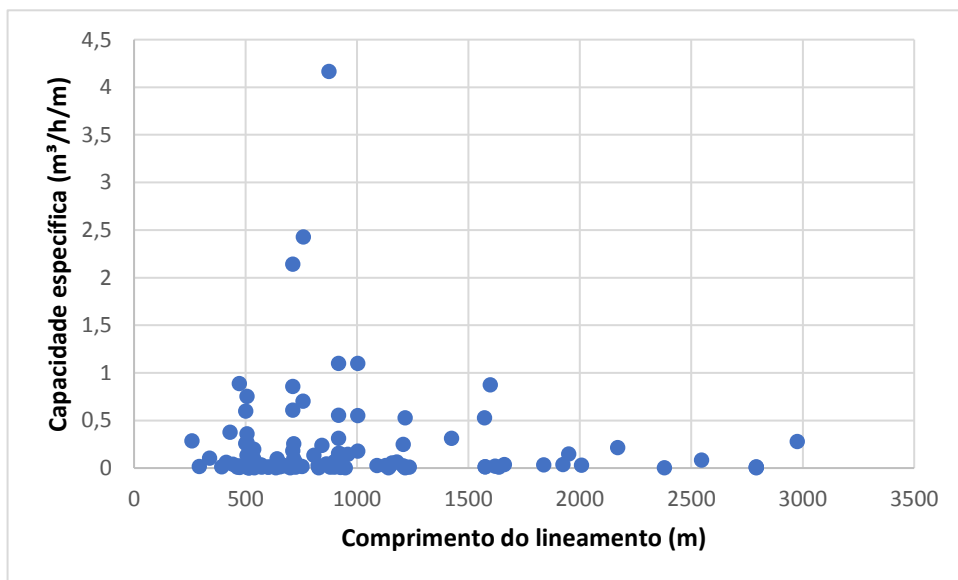


Figura 45: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento local primário.

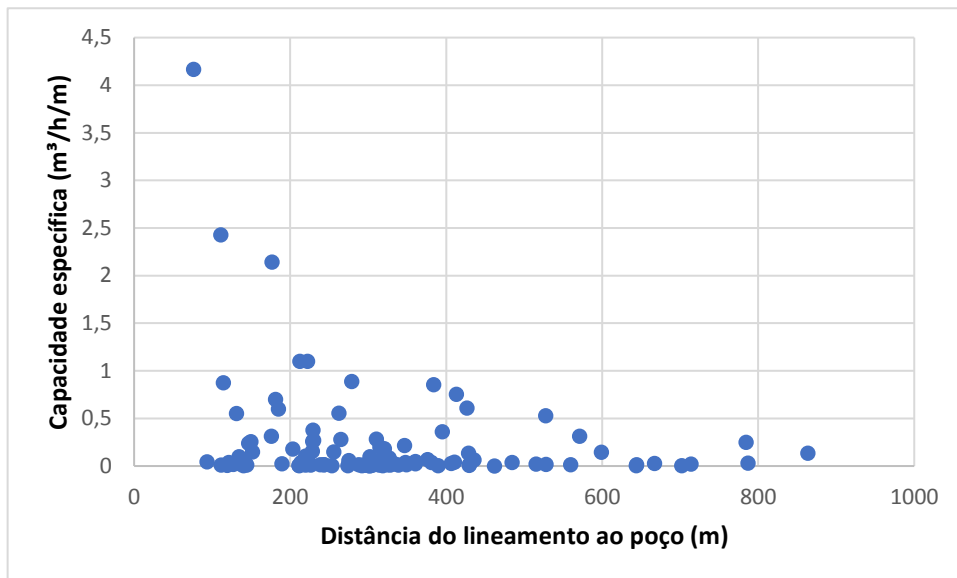


Figura 46: Distância do lineamento ao poço x capacidade específica, lineamento local secundário.

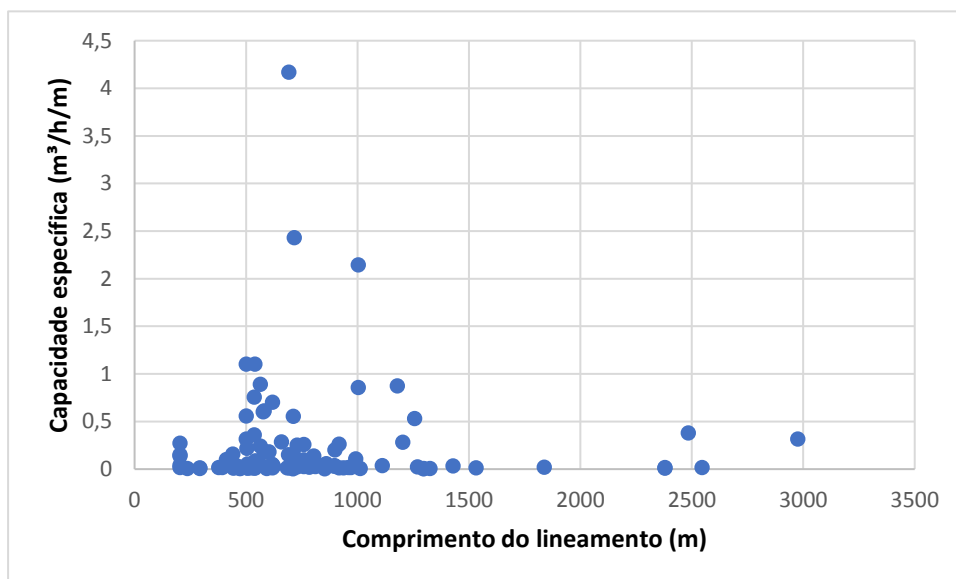


Figura 47: Comprimento do lineamento x capacidade específica, lineamento local secundário.

Semelhante ao que ocorre com os lineamentos regionais primários, o gráfico de dispersão entre capacidade específica e distância ao lineamento (Figuras 44 e 46) mostram o predomínio de poços mais produtivos relacionados às menores distâncias e uma influência positiva dos lineamentos até distâncias de 200 m, para os lineamentos primários, e até 400 m, para os lineamentos secundários. Os gráficos de dispersão entre comprimento do lineamento e capacidade específica (Figuras 45 e 47) também não expõem relação entre produtividade e comprimento do lineamento.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A avaliação das variáveis que influenciam a produtividade de poços instalados em aquíferos cristalinos por meio de sensoriamento remoto obteve os melhores resultados para os parâmetros geomorfológicos, demonstrando que regiões aplainadas, rebaixadas e com cotas baixas são as mais favoráveis à melhor produtividade dos poços, em decorrência do nível d'água mais raso nessas regiões, aumentar a espessura saturada e, propiciar maiores transmissividades.

Quanto à geologia, o resultado foi condizente com a literatura, evidenciando que os gnaisses se apresentaram mais produtivos (capacidade específica mediana de 0,045 m<sup>3</sup>/h/m) quando comparados a rochas máficas e ultramáficas (capacidade específica mediana de 0,01 m<sup>3</sup>/h/m). No entanto, um reduzido número de tipos litológicos pôde ser avaliado, em virtude da escala de mapeamento da folha utilizada, que é pouco detalhada. Mapas geológicos em maior escala não estão disponíveis para toda a área e as folhas possuem graus diferentes de detalhamento, dificultado o método utilizado, que agrupa unidades conforme o tipo litológico predominante.

Em relação a geologia estrutural, a análise dos compartimentos estruturais não revelou comportamentos claros de produtividade para os diferentes compartimentos. Do mesmo modo, a análise da relação entre produtividade e as direções estruturais, comprimentos e distância aos lineamentos não demonstrou correlação evidente. Esse resultado expõe a necessidade de trabalhos de campo, com o intuito de efetuar medidas estruturais de direção e mergulho das famílias de fraturas, uma vez que, o método de traçado de lineamento a partir do modelo digital de elevação não permite o traçado de estruturas sub-horizontais, que não são visíveis em superfície, e não fornece os valores dos mergulhos dos lineamentos.

Cabe destacar que a produtividade de poços está relacionada a mais de uma variável e que o comportamento de uma está associado à(s) outra(s). Desse modo, o real comportamento de uma variável pode ser mascarado pela influência de outros fatores. Ademais, salienta-se que visitas a campo para mapeamento geológico mais detalhado, com medidas estruturais de direção e mergulho de fraturas se fazem necessários para uma melhor compreensão do comportamento hidráulico dos aquíferos fissurais.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alaska Satellite Facility (ASF). Imagens de satélite ALOS PALSAR. Acesso em março de 2018, disponível em <<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>>.

Almeida, F. F. M., Hasui, Y., Brito Neves, B. B., Fuck, R. A. (1977). Províncias Estruturais Brasileiras. Simpósio de Geologia do Nordeste, 8, Atas, Boletim 6, p. 363-391. Campina Grande: SBG-Núcleo Nordeste.

Arthaud, M. H. (2007). Evolução neoproterozóica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. Tese (Doutorado). Brasília: Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

Arthaud, M. H., Caby, R., Fuck, R. A., Dantas, E. L., Parente, C. V. (2008). Geology of the northern Borborema Province, NE Brazil and its correlation with Nigeria, NW Africa. In: Pankhurst, R. J., Trouw, R. A. J., Brito Neves, B. B., Wit, M. J. (Eds.). West Gondwana: Pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region. London: Geological Society. Special Publications, v. 294, ed. 1, p. 49-67.

Barreto, P. H. (2009). História-Seca, fenômeno secular na vida dos nordestinos. Revista de Informações e Debates do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Brasília, ano 6, ed. 48. Acesso em fevereiro de 2018, < <http://www.ipea.gov.br/desafios>>.

Barton, C. A., Zoback, M. D., Moos, D. (1995). Fluid flow along potentially active faults in crystalline rock. *Geology*, v.23, n. 8, p. 683-686.

Bertachini, A. C. (1987). Estudos das características hidrogeológicas dos terrenos cristalinos sob clima úmido, na região de Jundiá, em São Paulo. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Bezerra, F. H. R., Saadi, A., Amaro, V. (2001). Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, v.14, ed.1, p. 61-75.

Brandão, R. L., Freitas, L. C. B. (Orgs.). (2014). Mapa Geodiversidade do Ceará. Fortaleza: CPRM. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Acesso em abril de 2018, <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16726>>.

Brasil. Lei Nº 7.827, de 27 de setembro de 1989. Regulamenta o art. 159, inciso I, alínea c, da Constituição Federal, institui o Fundo Constitucional de Financiamento do Norte - FNO, o Fundo Constitucional de Financiamento do Nordeste - FNE e o Fundo Constitucional de Financiamento do Centro-Oeste - FCO, e dá outras providências. Acesso em outubro de 2018, < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/LEIS/L7827.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L7827.htm)>.

Brasil. Portaria Interministerial N° 1, de 09 de março de 2005. Atualiza os critérios que delimitam a região semi-árida do Nordeste. Acesso em outubro de 2018, <<https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibmlink.php?numlink=1-85-31-2005-03-09-1>>.

Brasil. Resolução N ° 107/2017, de 27 de julho de 2017. Estabelece critérios técnicos e científicos para delimitação do Semiárido Brasileiro e procedimentos para revisão de sua abrangência. Acesso em outubro de 2018, < <http://sudene.gov.br/images/2017/arquivos/Resolucao-107-2017.pdf>>.

Brasil. Resolução N ° 115/2017, de 23 de novembro de 2017. Aprova a Proposição nº 113/2017, que acrescenta municípios a relação aprovada pela Resolução CONDEL nº 107, e 27 de julho de 2017. Acesso em outubro de 2018, <<http://sudene.gov.br/images/arquivos/conselhodeliberativo/resolucoes/resolucao115-23112017-delimitacaodossemiario.pdf>>.

Campelo, R. C. (1999). Análise de terrenos na porção setentrional da Província da Borborema, NE do Brasil: integração de dados geológicos e gravimétricos. Dissertação (Mestrado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Carvalho, L. H. (2017). Recursos hídricos subterrâneos no semiárido cearense: entender para aumentar a resiliência de sua população rural. Estudo de caso nos municípios de Arneiroz, Tauá, Catarina, Saboeiro, Aiuba, Parambu. Trabalho de Formatura. São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Cavalcante, J. C., Vasconcelos, A. M., Medeiros, M. F., Paiva, I. P., Gomes, F. E. M., Cavalcante, S. N., Cavalcante, J. E., Melo, A. C. R., Duarte Neto, V. C., Benevides, H. C. (2003). Mapa Geológico do Estado do Ceará. Escala 1: 500.00. Fortaleza: Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.

Claudino-Sales, V., Lira, M. V. (2011). Megageomorfologia do noroeste do estado do Ceará, Brasil. Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia, v. 12, n. 38, p. 200-209. Acesso em fevereiro de 2018, <<http://www.seer.ufu.br/index.php/caminhosdegeografia>>.

Colovite, A. P., Passos, M. M. (2012). Integração de mapas de declividade e modelos digitais tridimensionais do relevo na análise da paisagem. Revista Geonorte, edição especial, v. 2, n. 4, p. 1547-1559.

Coriolano, A. C. F. (2002). Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto. Tese (Doutorado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Costa, W. D. (1986). Análise dos fatores que atuam no aquífero fissural: área piloto dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Tese (Doutorado). São Paulo: Curso de Pós-Graduação, Nível Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Costa, W. D., Silva, A. B. (2000). Hidrogeologia dos meios anisotrópicos. In: Feitosa, F. A. C., Manoel Filho, J. (Coord.). Hidrogeologia-conceitos e aplicações (2ed.). Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE. 133- 181.

de Castro, D. L., Bezerra, F. H. R., Sousa, M. O. L., Fuck, R. A. (2012). Influence of Neoproterozoic tectonic fabric on the origin of the Potiguar Basin, northeastern Brazil and its links with West Africa based on gravity and magnetic data. *Journal of Geodynamics*, v. 54, p. 29-42.

Fanti, A. C. (2015). Investigação de aquífero fraturado para entendimento de fluxo e transporte de contaminantes clorados: estudo de caso em Valinhos, SP. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Feitosa, F. A. C. (1998a). Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Boa Viagem. Fortaleza: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM. Acesso em junho de 2018, <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/15844>>.

Feitosa, F. A. C. (1998b.) Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Pedra Branca. Fortaleza: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM. Acesso em junho de 2018, <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16711>>.

Feitosa, F. A. C., Gomes, F. E. M. (1998). Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Mombaça. CPRM. Fortaleza: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais CPRM. Acesso em junho de 2018, <<http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/16599>>.

Fernandes, A. J. (1997). Tectônica Cenozóica na porção média da Bacia do Rio Piracicaba e sua aplicação à hidrogeologia. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Fernandes, A. J., Perrotta, M. M., Salvador, E. D., Azevedo, S. G., Gimenez Filho, A., Paulon, N. (2007). Potencial dos aquíferos fraturados do estado de São Paulo: condicionantes geológicos. *Revista Águas Subterrâneas*, v.21, n. 1, p. 63-84.

Fernandes, A. J. (2008). Aquíferos fraturados: uma revisão dos condicionantes geológicos e dos métodos de investigação. *Revista do Instituto Geológico, São Paulo*, 29 (1/2), p. 49-72.

Fernandes, A. J., Christofolletti, C., Pino, D., Simonato, M. D., Pinhatti, A., Conicelli, B. P., Hirata, R., Bertolo, R. (2016). Avaliação regional e identificação de critérios para locação de poços nos aquíferos fraturados da RMSP. XIX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Campinas: Associação Brasileira de Água Subterrânea.

Ferrill, D. A., Winterle, J., Wittmeyer, G., Sims, D., Colton, S., Armstrong, A., Morris, A. P. (1999). Stressed rock strains groundwater at Yucca Mountain, Nevada. *GSA Today*, v.9, n. 5, p. 1-8.

Freeze, R. A., Cherry, J. A. (1979). *Groundwater Geology*. In: Freeze, R. A., Cherry, J. A. *Groundwater*. New Jersey: Prentice-Hall.

Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos-FUNCEME (2016). Ceará passa pela pior seca prolongada desde 1910. Acesso em fevereiro de 2018, <<http://www.funceme.br/index.php/comunicacao/noticias/740-cear%C3%A1-passa-pela-pior-seca-prolongada-desde-1910>>.

Gomes Neto, A. O. (2007). Neotectônica do Baixo Vale do Rio Jaguaribe-Ceará. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

Governo do Estado do Ceará (2015). Plano estadual de convivência com a seca. Ações emergenciais e estruturantes. Fortaleza, Ceará. Acesso em setembro de 2018, <[http://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Plano\\_Convivencia\\_com\\_a\\_Seca\\_02\\_03\\_2015.pdf](http://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2015/02/Plano_Convivencia_com_a_Seca_02_03_2015.pdf)>.

Hasui, Y. (2012). Sistema Orogênico Mantiqueira. In: Hasui, Y., Carneiro, C. D. R., Almeida, F. F. M., Bartorelli, A. (Org.). *Geologia do Brasil*. São Paulo: Beca Especial. 254 – 288.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2015). Arquivos shapefile das malhas territoriais municipais. Acesso em março de 2018, [https://downloads.ibge.gov.br/downloads\\_geociencias.htm#](https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm#).

Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA). (2008). ALOS Data Users Handbook. Revision C. Acesso em outubro de 2018, <[https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS\\_HB\\_Rev\\_C\\_EN.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/doc/fdata/ALOS_HB_Rev_C_EN.pdf)>

Landim, P. M. B. (2003). *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: UNESP.

Lawn, B. R., Wilshaw, T. R. (1993). Fracture of brittle solids. Second Edition. Cambridge Press University, 378p.

Lima, C. C. U. (2010). Evidências da ação tectônica nos sedimentos da Formação Barreiras presentes do litoral de Sergipe e ao norte da Bahia. Revista de Geografia (Recife: UFPE – DCG/NAPA), v. especial VIII SINAGEO, n. 1, p. 148-160.

Lima, G., Sales, C. (2015). Oficina. Alocação de água no semiárido. Apresentação da COGERH. 21 slides. Acesso em outubro de 2018, <[http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/eventosprojetos/Apresentacao\\_COGERH\\_OficinaAlocacao\\_11\\_11\\_15.pdf](http://arquivos.ana.gov.br/imprensa/eventosprojetos/Apresentacao_COGERH_OficinaAlocacao_11_11_15.pdf)>.

Madrucci, V. (2004). Prospecção de água subterrânea em terreno cristalino utilizando-se análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geofísicos e técnicas de geoprocessamento, região de Lindóia, SP. Tese (Doutorado). São Paulo: Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Maia, R. P., Bezerra, F. H. R. (2012). Geomorfologia e neotectônica da bacia hidrográfica do rio Apodi-Mossoró- NE/Brasil. Mercator, Fortaleza, v. 11, n. 24, p. 209-228.

Maia, R. P., Bezerra, F. H. R. (2014a). Condicionamento estrutural do relevo no nordeste setentrional brasileiro. Mercator, Fortaleza, v. 13, n. 1, p. 133-147.

Maia, R. P., Bezerra, F. H. R. (2014b). Inversão neotectônica do relevo na Bacia Potiguar, nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geomorfologia, São Paulo, v.15, n.1, p. 61-74.

Manoel Filho, J. (1996). Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. Tese (Doutorado). São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

Medeiros, C. N., Gomes, D. D. M., Albuquerque, E. L. S., Cruz, M. L.B. (Org.). (2011). Os recursos hídricos do Ceará: integração, gestão e potencialidades. Fortaleza: IPECE. Acesso em junho de 2018, <<http://projects.mcrit.com/ceara/attachments/article/118/Recursos%20hidricos%20do%20Ceara.%20Integracao,%20gestao%20e%20potencialidades.pdf>>.

Moreira, R. (2017). A história das secas no Nordeste. Diário do Nordeste. Acesso em fevereiro de 2018, <<http://blogs.diariodonordeste.com.br/robertomoreira/seca/historia-das-secas-no-nordeste/>>.

Morin, H. R., Savage, W. Z. (2003). Effects of crustal stresses on fluid transport in fractured rock: case studies from northeastern and southwestern USA. Hydrogeology Journal, 11: 100-112.



Moura-Lima, E. N., Sousa, M. O. L., Bezerra, F. H. R., Aquino, M; R., Vieira, M. M., Lima-Filho, F. P., Fonseca, V. P., Amaral, R. F. (2010). Sedimentação e deformação tectônica cenozoicas na porção central da Bacia Potiguar. *Revista do Instituto de Geociências, Geologia USP, Série científica*, São Paulo, v.10, n.1, p. 15-28.

Neves, M. A., Morales, N. (2007). Well productivity controlling factors in crystalline terrains of southeastern Brazil. *Hydrogeology Journal*, v. 15, ed. 3, p. 471-482.

Ribeiro, G. F. (2010). Estudo dos fatores do meio físico que influenciam a capacidade de infiltração das águas da bacia hidrográfica Vargens de Caldas, Minas Gerais. Dissertação (Mestrado). Campinas, São Paulo: Instituto de Geociências, Universidade de Campinas.

Rodrigues, A. V. (2018). Ceará tem maior probabilidade de chuvas acima da média em 2018. Governo do Estado do Ceara. Acesso em fevereiro de 2018, <<http://www.ceara.gov.br/2018/01/22/ceara-tem-maior-probabilidade-de-chuvas-acima-da-media-em-2018/>>.

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

Sá, E. F. J. (2000). O condicionamento de água subterrânea no cristalino fraturado: reavaliação da abordagem estrutural. I Congresso Internacional Integrado de Águas Subterrâneas, v. 1, p. 01-10. Anais. Fortaleza: Associação Brasileira de Águas Subterrâneas.

Scanlon, B. R., Healy, R. W.; Cook, P. G. (2002). Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal*, London, v. 10, n. 1, p. 18-39.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2014). Mapa Geodiversidade do estado do Ceará (SIG). Escala 1:1.000.000. Fortaleza: CPRM. Acesso em abril de 2018, <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geodiversidade/Mapas-de-Geodiversidade-Estaduais-1339.html>.

Silva, C. C. N., Sá, E. F. J. (2000). A influência da neotectônica na locação de poços para água no cristalino: resultados preliminares da região de equador, Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil. *Revista Águas Subterrâneas. 1 st Joint World Congress on Groundwater. Anais do XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*.

Silva, P. C. G., Moura, M. S. B., Kiill, L. H. P., Brito, L. T. L.; Pereira, L. A., Sá, I. B., Correia, R. C., Teixeira, A. H. C., Cunha, T. J. F., Guimarães Filho, C. (2010). Caracterização do semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. In. Sá, I. B., Silva, P. C. G. (Eds.). *Semiárido Brasileiro: Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação*. Petrolina, PE: Embrapa Semiárido. 19 – 49.

Snow, D. T. (1969). Anisotropic permeability of fractured media. *Water Resources Research*, Washington, v. 5, n.6, p. 1273-1289.

Sobrinho, T. P. (1941). Estrutura geológica do Ceará. Revista do Instituto do Ceará. Acesso em fevereiro de 2018, <<https://institutodoceara.org.br/revista>>.

Suassuna, J. (2007). SEMI-ÁRIDO: proposta de convivência com a seca. Cadernos de Estudos Sociais, Recife, v. 23, n. 1-2, p. 135-148.

Talbot, C. J., Sirat, M. (2001). Stress control of hydraulic conductivity in fracture-saturated Swedish bedrock. Engineering Geology, v. 61, n. 2-3, p. 145-153.

Vidal, F. W. H., Sales, F. A. C. B., Roberto, F. A. C., Sousa, J. F. Mattos, I. C. (Org.). (2005). Rochas e minerais industriais do Estado do Ceará. Fortaleza: CETEM; UECE; DNPM; FUNCAP; SENAI.

## APÊNDICES

| APÊNDICE A: POÇOS COM CAPACIDADE ESPECÍFICA X CONDICIONANTES FÍSICOS |          |       |       |                       |                                |                       |            |                          |         | Lineamentos 1:25.000  |                                              |         |                         |                                              |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  | Lineamentos 1:100.000 |  |  |  |  |  |
|----------------------------------------------------------------------|----------|-------|-------|-----------------------|--------------------------------|-----------------------|------------|--------------------------|---------|-----------------------|----------------------------------------------|---------|-------------------------|----------------------------------------------|---------|-----------------------|----------------------------------------------|---------|-------------------------|----------------------------------------------|--|-----------------------|--|--|--|--|--|
|                                                                      |          |       |       |                       |                                |                       |            |                          |         | Lineamentos primários |                                              |         | Lineamentos secundários |                                              |         | Lineamentos primários |                                              |         | Lineamentos secundários |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| Poço                                                                 | Q/s      | NE    | ND    | Litologia             | Morfologia                     | Feição geomorfológica | Altimetria | Compartimento estrutural | Direção | Comprimento(m)        | Distância do poço ao lineamento primário (m) | Direção | Comprimento(m)          | Distância do poço ao lineamento primário (m) | Direção | Comprimento(m)        | Distância do poço ao lineamento primário (m) | Direção | Comprimento(m)          | Distância do poço ao lineamento primário (m) |  |                       |  |  |  |  |  |
| 1                                                                    | 0,018519 | 4     | 58    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 309,53  | 1145,45               | 123,66                                       | 217,82  | 783,17                  | 528,14                                       | 172,03  | 2853,037              | 874,88                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 2                                                                    | 0,028983 | 10,25 | 60,28 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 179,93  | 825,72                | 225,19                                       | 92,15   | 895,18                  | 406,76                                       | 89,93   | 2740,115              | 287,3                                        |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 3                                                                    | 0,03936  | 16,25 | 56,9  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 3                        | 226,78  | 1923,05               | 81,53                                        | 48,97   | 802,47                  | 484,58                                       | 49,09   | 2333,16               | 16,14                                        |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 4                                                                    | 0,040564 | 20    | 61,17 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | topo                  | 200-400    | 3                        | 182,46  | 658,24                | 22,61                                        | 255,03  | 521,66                  | 410,95                                       | 236,29  | 949,48                | 520,28                                       | 207,59  | 1930,24                 | 854,41                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 5                                                                    | 0,005275 | 36    | 70,12 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 3                        | 217,64  | 947,62                | 139,12                                       | 305,26  | 236,54                  | 211,73                                       | 49,09   | 2333,16               | 268,2                                        | 62,1    | 3718,26                 | 346,11                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 6                                                                    | 0,066576 | 11    | 47,8  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 2                        | 131,93  | 1178,93               | 108,73                                       | 292,82  | 557,61                  | 436                                          | 104,96  | 2127,54               | 524,97                                       | 67,48   | 2137,26                 | 755,86                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 7                                                                    | 0,057778 | 8     | 53    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 2                        | 291,78  | 723,86                | 242,76                                       | 202,16  | 808,95                  | 275,35                                       | 274,57  | 1295,14               | 325,21                                       | 273     | 976,14                  | 384,81                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 8                                                                    | 0,100287 | 26    | 53,92 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 56,28   | 640,88                | 84,61                                        |         |                         |                                              | 246,2   | 2604,56               | 456,54                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 9                                                                    | 0,002985 | 7     | 74    | máficas/ultramáficas  | morros e colinas não alinhados | talvegue              | 200-400    | 5                        | 200,03  | 2378,54               | 140,57                                       | 226,53  | 852,09                  | 462,13                                       | 198,91  | 3561,17               | 21,88                                        |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 10                                                                   | 0,003785 | 20    | 72,84 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 5                        | 175,14  | 1140,35               | 105,47                                       | 32,39   | 1325,19                 | 292,14                                       | 280,48  | 1147,33               | 530,55                                       | 339,33  | 1124,01                 | 759,51                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 11                                                                   | 0,003577 | 10    | 65,92 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 179,42  | 700,77                | 177,68                                       | 211,72  | 710,21                  | 253,5                                        | 207,59  | 1930,24               | 322,89                                       | 89,93   | 2740,11                 | 436,25                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 12                                                                   | 0,006027 | 22    | 71,78 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | topo                  | 200-400    | 1                        | 58,09   | 635,64                | 163,56                                       | 97,94   | 472,13                  | 274,16                                       | 243,74  | 1966,7                | 158,34                                       | 27,86   | 3542,89                 | 861,11                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 13                                                                   | 0,005976 | 19    | 72,55 | máficas/ultramáficas  | morros e colinas não alinhados | talvegue              | 200-400    | 5                        | 17,78   | 2791,49               | 10,24                                        |         |                         |                                              | 198,91  | 356,17                | 174,99                                       | 109,98  | 3142,45                 | 998,46                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 14                                                                   | 0,377109 | 11    | 24,63 | gnaisse               | serras alongadas e orientadas  | talvegue              | 200-400    | 1                        | 240,66  | 430,31                | 55,82                                        | 14,84   | 2483,79                 | 229,5                                        | 191,75  | 2445,43               | 191,15                                       | 221,88  | 1379,24                 | 424,69                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 15                                                                   | 0,314286 | 8     | 29    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 211,75  | 1424,02               | 68,8                                         | 148,28  | 2974,31                 | 571,23                                       | 58,27   | 1052,36               | 423,2                                        |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 16                                                                   | 0,279498 | 8     | 31,9  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 148,28  | 2974,31               | 117,49                                       | 183,95  | 1202,43                 | 265,17                                       |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 17                                                                   | 0,874439 | 10,3  | 19,22 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 178,75  | 1597,25               | 69,79                                        | 226,57  | 1177,94                 | 114,41                                       | 175,11  | 2191,03               | 70,5                                         |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 18                                                                   | 0,008829 | 6,17  | 88,85 | máficas/ultramáficas  | morros e colinas não alinhados | encosta               | 200-400    | 5                        | 17,78   | 2791,49               | 5,93                                         | 200,03  | 2378,54                 | 299,73                                       | 198,91  | 3561,17               | 145,67                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 19                                                                   | 0,888889 | 15,5  | 24,5  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | topo                  | 200-400    | 1                        | 97,94   | 472,13                | 201,34                                       | 73      | 564,43                  | 279,25                                       | 243,74  | 1966,7                | 358,37                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 20                                                                   | 4,166667 | 4,42  | 6,58  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 4,09    | 874,26                | 74,79                                        | 219,59  | 691,77                  | 76,36                                        |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 21                                                                   | 0,702509 | 5     | 18,95 | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 2                        | 237,37  | 757,81                | 15,79                                        | 284,08  | 618,06                  | 181,55                                       | 64,13   | 906,92                | 132,4                                        | 71,75   | 1940,61                 | 692,95                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 22                                                                   | 0,029412 | 12    | 46    | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 334,87  | 1128,05               | 482,8                                        | 16,66   | 622,44                  | 667,24                                       | 203,83  | 1153,72               | 407,77                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 23                                                                   | 0,015038 | 9     | 75,5  | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 358,44  | 506,53                | 162,22                                       | 204,88  | 203,08                  | 324,59                                       | 187,79  | 925,14                | 209,07                                       | 2,37    | 1237,44                 | 912,38                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 24                                                                   | 0,017915 | 15    | 76,4  | gnaisse               | morros e colinas não alinhados | talvegue              | 500-600    | 6                        | 181,39  | 504,6                 | 19,08                                        | 53,73   | 1837                    | 127,45                                       | 228,64  | 1604,8                | 60,83                                        | 340,14  | 2180,49                 | 320,34                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 25                                                                   | 0,024867 | 5     | 61,3  | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 195,27  | 572,81                | 151,95                                       | 358,44  | 506,53                  | 360,59                                       | 187,79  | 925,14                | 530,6                                        | 350,04  | 614,12                  | 611,93                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 26                                                                   | 0,136364 | 49    | 60    | gnaisse               | morros e colinas não alinhados | topo                  | 400-500    | 5                        | 90      | 806,98                | 812,87                                       | 64,23   | 804,22                  | 864                                          | 269,3   | 1091,48               | 815,08                                       | 243,04  | 875,62                  | 847,26                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 27                                                                   | 0,032653 | 7     | 56    | granitóides deformado | morros e colinas não alinhados | talvegue              | 500-600    | 5                        | 261,46  | 2006,57               | 491,99                                       | 301,55  | 1428,27                 | 787,05                                       | 119,42  | 1602,33               | 786,46                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 28                                                                   | 0,038095 | 6     | 48    | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 358,44  | 506,53                | 172,35                                       | 204,88  | 203,08                  | 214,24                                       | 187,79  | 925,14                | 189,8                                        | 2,37    | 1237,44                 | 908,45                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 29                                                                   | 0,047368 | 7     | 45    | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 358,44  | 506,53                | 208,97                                       | 180,51  | 618,71                  | 360,98                                       | 187,79  | 925,14                | 354,27                                       | 350,04  | 614,12                  | 442,71                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 30                                                                   | 0,038462 | 20    | 46    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 3                        | 66,86   | 1661,03               | 103,69                                       | 211,72  | 710,21                  | 121,49                                       | 207,59  | 1930,24               | 150,41                                       | 236,29  | 949,48                  | 305,63                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 31                                                                   | 0,023256 | 22    | 65    | máficas/ultramáficas  | morros e colinas não alinhados | encosta               | 200-400    | 5                        | 69,82   | 1206,45               | 255,87                                       | 229,35  | 728,3                   | 318,15                                       | 70,75   | 1283,13               | 261,9                                        |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 32                                                                   | 0,016667 | 10    | 70    | máficas/ultramáficas  | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 4                        | 127,04  | 753,36                | 238,2                                        | 202,81  | 959,37                  | 238,85                                       | 267,64  | 1318,57               | 345,16                                       | 20,05   | 1148,64                 | 685,29                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 33                                                                   | 0,024096 | 9,5   | 51    | gnaisse               | morros e colinas não alinhados | encosta               | 500-600    | 5                        | 265,9   | 468,95                | 153,36                                       |         |                         |                                              |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 34                                                                   | 0,555556 | 7     | 25    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 230,8   | 917,04                | 142,53                                       | 215,34  | 500,23                  | 262,67                                       | 64,39   | 3416,58               | 811,36                                       | 89,93   | 2740,11                 | 872,19                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 35                                                                   | 0,530233 | 17,5  | 39    | gnaisse               | superfícies degradadas         | talvegue              | 400-500    | 6                        | 51,74   | 1215,29               | 22,87                                        | 165,64  | 1255,39                 | 527,94                                       | 56,87   | 2893,45               | 37,6                                         | 1,93    | 1710,08                 | 866,96                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 36                                                                   | 0,026506 | 11    | 52,5  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | encosta               | 200-400    | 6                        | 169,91  | 1089,85               | 255,87                                       | 199,88  | 811,46                  | 333,73                                       |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 37                                                                   | 1,1      | 5     | 15    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 126,08  | 1003,31               | 138,9                                        | 232,41  | 539,82                  | 212,53                                       | 241,75  | 2450,91               | 139,05                                       | 62,1    | 3718,26                 | 511,03                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 38                                                                   | 1,1      | 7     | 17    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 4                        | 230,8   | 917,04                | 134,34                                       | 215,34  | 500,23                  | 222,69                                       | 64,39   | 3416,58               | 751,91                                       | 89,93   | 2740,11                 | 916,24                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 39                                                                   | 0,610811 | 6     | 24,5  | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 239,37  | 711,37                | 152,15                                       | 105,68  | 581,69                  | 427,04                                       | 62,1    | 3718,26               | 393,52                                       | 239,09  | 3283,55                 | 551,61                                       |  |                       |  |  |  |  |  |
| 40                                                                   | 0,022642 | 10    | 63    | granitóides deformado | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 5                        | 61,72   | 710,02                | 144,84                                       | 212,24  | 1268,65                 | 515,48                                       | 32,43   | 1029,45               | 693,12                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 41                                                                   | 0,857143 | 11    | 25    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  | talvegue              | 200-400    | 3                        | 239,37  | 711,37                | 147,44                                       | 126,08  | 1003,31                 | 384,3                                        | 62,1    | 3718,26               | 428,63                                       | 241,75  | 2450,91                 | 577,9                                        |  |                       |  |  |  |  |  |
| 42                                                                   | 0,022609 | 10    | 67,5  | gnaisse               | morros e colinas não alinhados | encosta               | 400-500    | 5                        | 234,1   | 1618,5                | 121,91                                       | 303,55  | 712,28                  | 713,93                                       | 301     | 1477,28               | 690,77                                       |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |
| 43                                                                   | 0,025    | 6     | 62    | gnaisse               | superfícies aplainadas baixas  |                       |            |                          |         |                       |                                              |         |                         |                                              |         |                       |                                              |         |                         |                                              |  |                       |  |  |  |  |  |