



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 486

**CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DAS FORMAÇÕES
BARREIRAS E PIRABAS UTILIZANDO-SE FERRAMENTAS
DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM VISTAS À APLICAÇÃO EM
HIDROGEOLOGIA**

Dissertação apresentada por:

LARISSA SILVA E SILVA

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu (UFPA)

**BELÉM
2016**

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

Silva, Larissa Silva e, 1981-

Contribuição ao conhecimento das formações Barreiras e Pirabas utilizando-se ferramentas da análise estrutural com vistas à aplicação em hidrogeologia / Larissa Silva e Silva. – 2016.

xvii, 109 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientador: Francisco de Assis Matos de Abreu

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 2016.

1. Análise estrutural (Engenharia). 2. Hidrogeologia. I. Título.

CDD 22. ed. 624.171



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**CONTRIBUIÇÃO AO CONHECIMENTO DAS FORMAÇÕES
BARREIRAS E PIRABAS UTILIZANDO-SE FERRAMENTAS
DA ANÁLISE ESTRUTURAL COM VISTAS À APLICAÇÃO EM
HIDROGEOLOGIA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

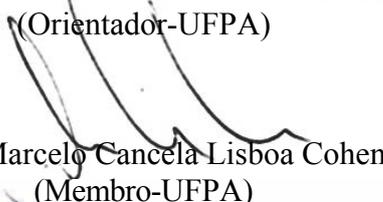
LARISSA SILVA E SILVA

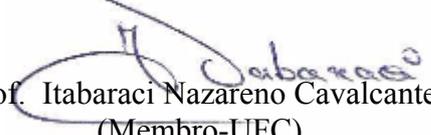
**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA.**

Data de Aprovação: 17 / 10 / 2016

Banca Examinadora:


Prof. Francisco de Assis Matos de Abreu
(Orientador-UFPA)


Prof. Marcelo Cancela-Lisboa Cohen
(Membro-UFPA)


Prof. Itabaraci Nazareno Cavalcante
(Membro-UFC)

Dedico este trabalho a Deus, a Nossa Senhora, a todos da minha família, e a todos que me apoiaram durante essa etapa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, por sempre estar presente em minha vida, proporcionando-me o dom da vida, a superar as dificuldades com perseverança, determinação e sabedoria.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de Mestrado.

Ao meu orientador prof. Dr. Francisco de Assis Matos de Abreu pelos esclarecimentos e apoio oferecidos ao longo deste curso e no desenvolvimento desta dissertação e principalmente pela amizade.

Aos meus pais Eduardo José da Costa Silva e Elizabeth da Silva, que sempre me apoiaram e que me ensinaram a viver com dignidade, acreditando em mim e me dando força para eu alcançar os meus objetivos, superando todos os obstáculos e muitas vezes abrindo mãos de seus sonhos em favor dos meus: a minha gratidão, respeito e o meu eterno amor.

A minha família pelo amor, incentivo e compreensão em todos os momentos da minha vida.

A Sr^a Eliana Moreira Bezerra Sousa pela bolsa de estudo no Curso de Inglês - Idiomas Washington e ao querido professor Alberto Sotero do Nascimento (*in memoriam*) pelos ensinamentos que me auxiliaram no processo de ingresso ao Mestrado e pela amizade.

Ao David Gusmão pelo companheirismo, durante estes últimos meses. Obrigado por cada incentivo.

Aos queridos amigos Antônio Pantoja (Az), Jaqueline Alcântara, Raquel Santos, Arlete Santos e Michele Berino pela ajuda indispensável durante a etapa de campo.

Ao meu querido amigo Osmar Guedes, do Laboratório de Cartografia Geológica (GEOCART), por sua amizade e disposição de seu tempo para direcionamentos da pesquisa.

Aos queridos amigos do Grupo de estudos marinhos e costeiros (GEMC): Lorena Bittencourt, Leilanne Ranieri, Paulo Victor, Robledo Guimarães e Melissa Silva, pelo apoio durante o procedimento no laboratório.

As minhas amigas de mestrado Jaqueline Alcântara, Lidiane Araújo, Lorena Bittencourt, Érika Rodrigues e Karen Carmona pelo apoio durante este processo, e principalmente a amizade, respeito, carinho e atenção.

Aos amigos Alyson Nogueira, Beatriz Oliveira, Carla Tayanna, Laís Torres e Paulo Isaac pela amizade e apoio durante este processo.

Ao prof. João Batista de Miranda Ribeiro – Diretor do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, pelo apoio a pesquisa.

Ao prof. Dr. Maâmar El-Robrini por ter permitido e cedido os instrumentos e materiais necessários para a realização dos ensaios granulométricos dos sedimentos no Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências.

A FEMAC – GEOSOLO ENGENHARIA LTDA na pessoa do Engenheiro Felisberto Centeno Junior pela concessão dos dados e informações para a realização desse trabalho, bem como a permissão e acompanhamento de todo o processo de construção de poço profundo para a captação na Sede Campestre da Assembleia Paraense, sem isso este trabalho não seria possível.

Ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM na pessoa do Superintendente Manfredo Ximenes Ponte pelo auxílio indispensável na etapa de campo de visitação aos poços para coleta de dados e informações necessários para a pesquisa.

Aos funcionários da CPRM: Manoel Imbiriba Junior, Alceu Percy Mendel Junior, Valmor José Freddo Filho, Paulo Danilo e Rosilene do Socorro pela contribuição com informações de poços referente à área e pela ajuda na realização da etapa de campo.

A INFRAERO na pessoa do Coordenador de Meio Ambiente Sr. Franney Carvalho de Oliveira, e técnicos Bruno Barreto e Thiago Fleury pela liberação na visitação técnica no poço que se encontra dentro dos estabelecimentos do Aeroporto Internacional de Belém/Val-de-Cães – Júlio Cezar Ribeiro.

A COSANPA na pessoa do Sr. Presidente Luciano Lopes Dias, e Engenheira Sanitarista e Ambiental Elinamy Barbosa de Jesus, pela liberação na visita técnica do poço localizado no Setor Bengui/Catalina.

E a todas as pessoas que me apoiaram e contribuíram para a finalização deste trabalho.

Muito obrigada, de coração!

“Ser feliz é encontrar força no perdão, esperanças nas batalhas, segurança no palco do medo, amor nos desencontros. É agradecer a Deus a cada minuto pelo milagre da vida.” — Fernando Pessoa.

RESUMO

A existência de conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas na área Nordeste do Estado do Pará e mais especificamente na Região Metropolitana de Belém – RMB vem sendo levantada, há alguns anos, por diferentes autores a partir da aplicação de técnicas analíticas variadas. Este trabalho apresenta mais uma contribuição à essa temática, dessa feita agregando-se dados e informações obtidos a partir da utilização das ferramentas da análise estrutural, no sentido de procurar entender o mecanismo de fluxo subterrâneo e as condições de recarga, que tem lugar na área em consideração. O trabalho foi realizado a partir dos bancos de dados sobre poços existentes em órgãos públicos e privados. A análise estrutural realizada teve em conta os elementos geométrico-cinemáticos presentes nos sistemas aquíferos mencionados e avançou na consideração dos processos geotectônicos que teriam levado à conformação do arranjo geométrico presente na área, tido como essencialmente neotectônico. Verificou-se que o desenvolvimento das estruturas tectônicas rúpteis, principalmente de falhas, impressas sobre as rochas regionais que encerram os sistemas aquíferos, levaram à composição espacial de blocos morfoestruturais em arranjos de horsts e grábens, limitados preferencialmente por descontinuidades NE e SW resultantes da interação das falhas normais com falhas transcorrentes. As fronteiras desses blocos, sempre marcados por falhas permitem interconectar a circulação de águas dos sistemas aquíferos de diferentes posições espaciais, sustentada pelo princípio de vasos comunicantes, do que decorre a mistura das águas contidas, em cada um deles individualmente. Assim é impossível manter o modelo defendido por vários autores na literatura regional do confinamento de aquíferos. Por outro lado, a elaboração de mapas potenciométricos e de fluxo em regiões de rochas sedimentares, aonde se tem os chamados meios homogêneos, como é o caso da RMB não pode ser realizada sem considerar a análise estrutural, geométrica e cinemática, sob pena de serem cometidos erros na elaboração dos mesmos e assim de se chegar à interpretações hidrogeológicas equivocadas. Desse modo, é necessário rever as metodologias para a elaboração desses importantes instrumentos, com o intuito de se obter resultados mais precisos em relação aos mecanismos de circulação, recarga e descarga de sistemas aquíferos, no que esse trabalho também avança.

Palavras-chave: Análise estrutural. Conexão hidráulica. Sistemas Aquíferos Barreiras e Pirabas. Hidrogeologia.

ABSTRACT

The existence of hydraulic connection between Barreiras and Pirabas aquifers systems in the northeast area of the State of Pará, more specifically in the metropolitan region of Belém - RMB has been raised, a few years ago, by different authors from the application of various analytical techniques. This work presents further contribution to this theme, that has been aggregated to the data and to the information obtained from the use of structural analysis tools, to understand the groundwater flow mechanism and recharge conditions, which takes place in area under consideration. The work was performed from the databases on existing wells in private and public agencies. The performed structural analysis considered the geometric-kinematic elements present in the mentioned water systems and it advanced in the knowledge of the tectonic processes that have led to the conformation of the geometric arrangement present in the area, considered essentially as neotectonic. It was found that the development of brittle tectonic structures, especially holes, printed on regional rocks that enclose the water systems, leading to spatial composition of morpho-structural blocks arrangements horsts and grabens limited preferably by the NE and SW discontinuities resulting from the interaction of normal faults with strike-slip faults. The boundaries of these blocks, always marked by failures allow the interconnection of the movement of water from aquifers of different spatial positions systems, sustained by the principle of communicating vessels, the elapsing the mixture of water contained in each one of them individually. So it is impossible to keep the model advocated by several authors in the literature of regional aquifer confinement. On the other hand, the development of potentiometric maps and flow in regions of sedimentary rocks, where it is called homogeneous media, as this case is of the RMB cannot be done without considering the structural analysis, geometry and kinematics, otherwise it would be misunderstood in the preparation of such results and mistaken hydrogeological interpretation. Thus, it is necessary to review the methodologies for the preparation of these important instruments in order to obtain more precise results on the flow mechanisms, recharge and discharge of water systems which has been developed and answered in this work.

Keywords: Structural analysis. Hydraulic connection. Barreiras and Pirabas. Hydrogeology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -	Demonstração de experimento em argila em A (Bloco diagrama) e B (modelo em laboratório).....	7
Figura 2 -	Caracterização do sistema estrutural transcorrente, no bloco diagrama com a disposição dos tensores σ_1 (compressão máxima) σ_2 (compressão mínima) no plano horizontal, e σ_3 (intermediário) no plano vertical	8
Figura 3 -	Arranjo geométrico das falhas pré-rupturas: sintética (R) e antitética (R'), e pós-ruptura: cisalhamento P. Binário externo sinistral. Ângulo (coeficiente) de fricção interna (θ) de 30°	9
Figura 4 -	Padrão estrutural teórico de cisalhamento simples ou não-coaxial em regime deformacional rúptil. Em A arranjo resultante de um binário sinistral e em B binário dextral. Par conjugado: fraturas sintética (R) e antitética (R'); fraturas P, X; Y=D. O sentido de movimento da fratura R' é oposta a do binário externo σ_1 (eixo compressivo); σ_3 (eixo extensional). T: fratura de distensão.....	9
Figura 5 -	Sistemas de drenagem regional em relação à área de estudo	10
Figura 6 -	Tipos de padrões texturais de drenagem.....	11
Figura 7 -	Propriedades de drenagem.....	11
Figura 8 -	Localização da área de estudo na RMB – Pará.....	16
Figura 9 -	Vista aérea de localização dos Poços Tubulares Profundos (Poço AP-P1 e Poço AP-P2) construídos na Sede Campestre da AP, Bairro de Souza, no Município de Belém-Pará.....	16
Figura 10 -	Mapa geológico da RMB modificado de Costa 2001.....	19
Figura 11 -	Blocos crustais da região Amazônica	25
Figura 12 -	Unidades Litológicas e feições principais do proterozóico Médio/Superior. As setas indicam as orientações dos eixos de distensão nos dois compartimentos, separados pela Zona de Transferência Boa vista Caracará.....	26
Figura 13 -	Quadro tectônico da região Amazônica no Paleozóico	28
Figura 14 -	Quadro tectônico Mesozóico	29
Figura 15 -	Quadro estrutural do Terciário Superior (Mioceno-Plioceno).....	30

Figura 16 -	Abrangência do Mar de Pirabas na região nordeste do estado do Pará, e as prováveis estruturas que controlam a deposição dessa unidade litoestratigráfica	31
Figura 17 -	Quadro estrutural do quaternário (Pleistoceno Médio-Holoceno).....	31
Figura 18 -	Sinuosidade retilínea e canais abertos, nas proximidades dos principais rios que influenciam a área - Maguarí, Maguariaçu, Mocajatuba e “furos” – Maguari e Cotovelo. Detalhe para as feições e/ou anomalias 1 e 2 em “Z” e “S”, respectivamente.....	32
Figura 19 -	Mapa de lineamentos de drenagem da área de estudo	33
Figura 20 -	Rosácea composta por todos os lineamentos de drenagens da área	34
Figura 21 -	Mapa de drenagem da área de estudo, com algumas formas anômolas de drenagem do tipo arco e cotovelo. Detalhe para a anomalia cotovelo com indicação de movimentação dextral formada pelo Rio Aurá	34
Figura 22 -	Mapa com as principais direções de lineamentos de drenagem da área de estudo.....	35
Figura 23 -	Rosácea das principais medidas de lineamentos de drenagens da área	36
Figura 24 -	Mapa de movimentação dos lineamentos de drenagem na área de estudo..	37
Figura 25 -	Mapa topográfico da área definido a partir de imagem SRTM, com curvas altimétricas no intervalo de 5m	39
Figura 26 -	Mapa das unidades morfológicas de relevo para a área definida a partir de imagem SRTM com as seções morfoestruturais A-A’ e B-B’. Sendo as cotas 5-15 m Planícies fluviais, 15-30 m Colinas pediplanizadas e 30-45 m Colinas de topo aplainados.....	40
Figura 27 -	Perfil mostrando a morfologia das planícies fluviais e colinas	41
Figura 28 -	Perfil mostrando a passagem do relevo de planícies fluviais para o de colinas pediplanizadas e de topo aplainador.....	41
Figura 29 -	Mapa de lineamentos de relevo da área de estudo.....	42
Figura 30 -	Rosácea composta por todas as medidas de lineamentos de relevo na área.	42
Figura 31 -	Mapa com as principais direções de lineamentos de relevo da área de estudo.....	43
Figura 32 -	Rosácea das principais medidas de lineamentos de relevo na área	44
Figura 33 -	Mapa de fusão das principais direções de lineamentos identificados na área de estudo.....	45

Figura 34 -	Compartimentação morfoestrutural da área de estudo em blocos desnivelados, mostrando seus baixos, intermediários e altos estruturais e as seções morfoestruturais A-A' e B-B'	46
Figura 35 -	Movimentações verticais estabelecidos com base na composição das figuras 26, 27, 28 e 34	46
Figura 36 -	Compartimentação morfoestrutural dos blocos em setores indicando o provável sentido dos vetores (setas em vermelho) de caimento topográfico, as seções morfoestruturais A-A' e B-B' e a localização dos poços na área	48
Figura 37 -	Comparação das direções preferenciais das falhas que compartimentam as áreas: (A) porção de Belém, em parte da RMB (Costa, 2004), (B) a ilha de Mosqueiro (Palheta, 2008) e (C) porção de Santa Isabel (Bandeira, 2008).....	49
Figura 38 -	Diagrama de <i>Riedel</i> proposto por setores morfoestruturais na área. A) Direções das fraturas e falha normal (*FN) identificadas e B) Esquema de cisalhamento simples, mostrando o arranjo de um binário sinistral e binário dextral.....	51
Figura 39 -	Mapa de lineamentos de drenagem por setor da compartimentação morfoestrutural dos blocos na área.....	52
Figura 40 -	Rosáceas dos lineamentos de drenagem por setor na área conforme compartimentação morfoestrutural dos blocos.....	53
Figura 41 -	Mapa de lineamentos de relevo por setor da compartimentação morfoestrutural dos blocos na área.....	53
Figura 42 -	Rosáceas dos lineamentos de relevo por setor na área conforme compartimentação morfoestrutural dos blocos.....	54
Figura 43 -	Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Barreiras na área, seção A-A'	57
Figura 44 -	Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Barreiras na área, seção B-B'	58
Figura 45 -	Localização e profundidade dos poços Barreiras e Pirabas em relação ao relevo e aos domínios estruturais.....	61
Figura 46 -	Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Pirabas na área, seção A-A'	63

Figura 47 -	Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Pirabas na área, seção B-B'	64
Figura 48 -	Composição do Perfil Construtivo, Tempo de Penetração, Perfis Geofísicos (RG E SP) e Litológico do Poço Tubular Profundo AP - P1	65
Figura 49 -	Composição do Perfil Construtivo, Tempo de Penetração, Perfis Geofísicos (RG E SP) e Litológico do Poço Tubular Profundo AP - P2	66
Figura 50 -	Mapa de isolinhas equipotenciais hidráulicas do Barreiras na área.....	68
Figura 51 -	Mapa de Fluxo Subterrâneo da área mostrando as linhas equipotenciais para carga hidráulica no Barreiras	70
Figura 52 -	Bloco diagrama de fluxo subterrâneo da área para o aquífero Barreiras.....	71
Figura 53 -	Bloco diagrama de fluxo subterrâneo e topografia da área para o aquífero Barreiras	72
Figura 54 -	Mapa de isolinhas equipotenciais hidráulicas do Pirabas na área	73
Figura 55 -	Mapa de Fluxo Subterrâneo da área mostrando as linhas equipotenciais para carga hidráulica no Pirabas.....	75
Figura 56 -	Modelo proposto para o mecanismo de recarga e fluxo subterrâneo dos aquíferos rasos (infiltração direta) e intermediários (infiltração através de falhas trativas).....	76
Figura 57 -	Bloco diagrama de fluxo subterrâneo da área para o aquífero Pirabas.....	77
Figura 58 -	Bloco diagrama de fluxo subterrâneo e topografia da área para o aquífero Pirabas	78
Figura 59 -	Modelo clássico de mapa de fluxo subterrâneo utilizado por outros autores, B1- Barreiras e P1- Pirabas.....	80
Figura 60 -	Modelo de mapa de fluxo subterrâneo sugerido neste estudo, B2- Barreiras e P2- Pirabas	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Coluna litoestratigráfica da cobertura sedimentar da Região Metropolitana de Belém	21
Tabela 2 -	Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior – Neógeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C - Sedimentos Pós-Barreiras	22
Tabela 3 -	Principais características dos sistemas hidrogeológicos que ocorrem em Belém.....	23
Tabela 4 -	Principais direções de lineamentos de drenagem da área.....	36
Tabela 5 -	Principais direções de lineamentos de relevo da área.	43
Tabela 6 -	Cadastro de informações dos Poços Barreiras na área	56
Tabela 7 -	Cadastro de informações dos Poços Pirabas na área.....	56
Tabela 8 -	Dados cadastrados de poços do Barreiras na área.	68
Tabela 9 -	Dados cadastrados de poços do Pirabas na área.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AP -	Assembélia Paraense
COSANPA -	Companhia de Saneamento do Pará
CPRM -	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (Serviço Geológico do Brasil)
GPS -	Global Positioning System
INMET -	Instituto Nacional de Meteorologia
MDE -	Modelo Digital de Elevação
NE -	Nível Estático
ND -	Nível Dinâmico
NGAM -	Raios Gama Naturais
RMB -	Região Metropolitana de Belém
SAAEB -	Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Belém
SEV -	Sondagem Elétrica Vertical
SABP -	Sistemas Aquíferos Barreiras e Pirabas
SIAGAS -	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIRGAS -	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SP -	Potencial Espontâneo
SPR -	Resistência Elétrica
SRTM -	Shuttle Radar Topography Mission
UFPA -	Universidade Federal do Pará
UTM -	Universal Transversa de Mercator

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
EPIÍGRAFE	vii
RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIACÕES	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Geral	2
1.1.2 Específico	2
1.2 JUSTIFICATIVA / RELEVÂNCIA DO TEMA	3
1.3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2 MATERIAIS E MÉTODOS	12
3 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	15
3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO	17
3.1.1 Formação Pirabas	18
3.1.2 Formação Barreiras	19
3.1.3 Pós-Barreiras	20
3.1.4 Sedimentos Holocênicos	20
3.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO	22
3.3 ARRANJO GEOTECTÔNICO.....	24
3.3.1 Paleotectonismo	24

3.3.1.1	Quadro Arqueano / Proterozóico.....	25
3.3.1.2	Quadro Fanerozóico	27
3.3.2	Neotectonismo.....	29
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1	ANÁLISE ESTRUTURAL DA REDE DE DRENAGEM.....	32
4.2	ANÁLISE ESTRUTURAL DO RELEVO	38
4.3	CORRELAÇÃO ENTRE ANÁLISE ESTRUTURAL DA DRENAGEM E DO RELEVO	44
4.4	DOMÍNIOS MORFOESTRUTURAIS.....	45
4.5	CORRELAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA.....	54
4.5.1	Poços – Aquífero Barreiras	54
4.5.2	Poços – Aquífero Pirabas	59
4.6	FLUXOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E ZONA DE RECARGA	67
4.6.1	Aquífero Barreiras	67
4.6.2	Aquífero Pirabas	72
5	ARCABOUÇO SINTÉTICO DOS RESULTADOS DA PESQUISA.....	82
6	CONCLUSÃO.....	86
	REFERÊNCIAS	87
	ANEXOS	94
	ANEXO A - PERFIS DOS POÇOS BARREIRAS COM A DESCRIÇÃO LITOLÓGICA.....	95
	ANEXO B - PERFIS DOS POÇOS PIRABAS COM A DESCRIÇÃO LITOLÓGICA.....	100

1 INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas representam 97% de toda a água doce disponível no planeta e desempenha um papel importante no abastecimento público e privado das cidades, cuja demanda por água subterrânea vem aumentando rapidamente em todo mundo. Tal situação se justifica em razão do baixo custo de produção, à sua fácil obtenção e via de regra, à excelente qualidade natural, dispensando tratamento em muitos casos, se comparada com a água superficial (Hirata et al., 2009). As águas subterrâneas fazem parte do ciclo hidrológico, não estando confinadas eternamente no subsolo. Elas fluem e acabam por alimentar os rios, lagos e oceanos, voltando à superfície, evaporando-se e precipitando-se em forma de chuvas, que abastecerão novamente os aquíferos.

Estudos desenvolvidos pelo Instituto de Geociências - IG/UFPA têm contribuído significativamente, com dados e informações sobre o pacote sedimentar que ocorre na Região Metropolitana de Belém – RMB e áreas adjacentes, pois nesta região as formações sedimentares Barreiras e Pirabas, também despertam atenção por se constituírem importantes reservatórios de águas subterrâneas.

Sendo assim, tais formações são de suma importância para os estudos hidrogeológicos, isso porque elas se configuram as principais fornecedoras de água subterrânea e também por representarem reservas estratégicas desse recurso para o nordeste do Estado do Pará e não somente para a RMB, aonde se concentra mais da metade da população do Estado.

Os estudos realizados nos Sistemas Aquíferos¹ Barreiras e Pirabas – SABP nessa região indicam que:

- ✓ As camadas geológicas que representam esses sistemas são bastante movimentadas geometricamente com implicações importantes sobre os parâmetros físicos e hidroambientais das águas que eles encerram;

- ✓ Os mecanismos de recarga do SABP têm relação direta com os arranjos geométrico-cinmáticos impressos sobre os corpos geológicos, sobretudo por efeitos neotectônicos e em conjunto desempenham um papel não relatado anteriormente e são bem mais complexos do que o que está estabelecido;

- ✓ Não existe confinamento hidráulico como estabelecido na literatura do Sistema Aquífero Pirabas, de tal forma que os sistemas Barreiras e Pirabas são na verdade um sistema hidrogeológico único;

¹ Sistema aquífero: é o domínio espacial, limitado em superfície e em profundidade, no qual existe um ou vários aquíferos, relacionados ou não entre si, mas que constitui uma unidade prática para a investigação ou exploração.

✓ A ausência de confinamento hidráulico extensivo leva a uma mistura vertical e horizontal das águas do SABP com implicações hidroambientais ainda não avaliadas;

✓ É inadequada, conceitualmente, a elaboração de mapas potenciométricos de fluxo de água, sem o suporte do conhecimento geométrico-cinemático dos sistemas aquíferos na região NE do Pará;

As reservas do SABP possuem sustentabilidade ambiental para suprirem as demandas sociais e econômicas da região Nordeste do Pará, sobretudo da RMB.

Contudo, neste trabalho além da revisão crítica e integrada do conhecimento estabelecido, principalmente nos aspectos geométricos e cinemáticos dos pacotes sedimentares, foram estudadas amostras de calha e dados construtivos tomados quando da perfuração de 2 (dois) poços profundos construídos na sede campestre do clube Assembléia Paraense – AP (profundidades em torno de 260 m) no município de Belém. Busca-se, dessa forma contribuir ao conhecimento sobre os pacotes sedimentares presentes na RMB, na perspectiva de uma melhor definição geométrica das formações, visando avançar no conhecimento hidrogeológico e também avaliar o risco de interação danosa entre os sistemas hidrogeológicos conforme hoje estão definidos para a captação da água subterrânea na RMB.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

Testar a existência de uma conectividade hidráulica entre os aquíferos Barreiras e Pirabas, a partir de banco de dados de poços² construídos na Região Metropolitana de Belém - RMB com o apoio de ferramentas de análise estrutural.

1.1.2 Específico

- ⇒ Realizar a descrição detalhada do perfil sedimentar em 2 poços profundos construídos nas dependências da AP, objetivando conhecer melhor as características geológico-geofísicas desses pacotes sedimentares;
- ⇒ Realizar comparações litoestratigráficas com outros poços profundos existentes na área, a partir do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS da CPRM, com vistas a uma regionalização de dados;

² A classificação quanto à profundidade dos poços na RMB utilizada neste trabalho foi a seguinte: Poço raso (<40m), Poço medianamente profundo (> 40 até 90m) e Poço profundo (> 90m).

- ⇒ Indicar possíveis zonas de recarga para os sistemas hidrogeológicos profundos na área em consideração a qual terá inicialmente superfície de aproximadamente 100 km²;
- ⇒ Agregar esses dados aos modelos geométrico-cinemáticos existentes na RMB e testá-los: Costa (2004), Bandeira (2008) e Palheta (2008), tendo como base o comportamento e/ou influência das estruturas neotectônicas, especificamente as falhas, na provável conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas.

1.2 JUSTIFICATIVA / RELEVÂNCIA DO TEMA

Cerca de 600.00 pessoas, em uma população de 2,5 milhões de habitantes na RMB se autoabastecem utilizando água dos sistemas hidrogeológicos rasos. A utilização dos sistemas hidrogeológicos profundos (profundidades de até 300 m) vem ganhando importância na RMB (Abreu, 2010). Eles têm sido considerados como confinados, premissa posta em dúvida por trabalhos recentes tais como, Palheta (2008) e Pinheiro (2009), entre outros.

A precariedade do sistema de abastecimento se dá em Belém hoje por deficiência de rede de distribuição, seja por essa rede não estar presente, de maneira eficiente por toda a RMB; seja porque a rede em alguns locais ainda é antiga e não suporta a demanda a ela imposta.

Isso gera problemas de não oferta da água tratada e distribuída pelo sistema Utinga, principalmente nas áreas de expansão da cidade. Também a rede de distribuição, aonde existe, não gera segurança ao usuário.

Adicionalmente pode-se falar em custo de consumo.

Todo esse quadro favoreceu o aparecimento consciente de autoabastecimento o que desenha a situação atual do abastecimento de água na RMB.

O nível de conhecimento acerca dos parâmetros físicos de geometria e reservas, dos indicadores hidrogeológicos de fluxo, permeabilidade, condutividade hidráulica, etc. e os condicionantes de qualidade hidroambiental é ainda incipiente na RMB e assim necessitam de vários estudos e trabalhos específicos, dentro da linha de investigação desenvolvida nessa dissertação.

No presente estudo envereda-se pela aplicação das técnicas de análise estrutural na compreensão da geometria dos sistemas aquíferos e dos aspectos cinemáticos que foram responsáveis pela configuração hoje impressa sobre os mesmos, apontando aos estudos hidrogeológicos uma ferramenta adicional de análise pouco utilizada nesse tipo de estudo.

Os resultados advindos do uso adicional das técnicas da análise estrutural podem oferecer resultados valiosos para o entendimento dos mecanismos de circulação e de recarga de sistemas aquíferos assim como para a mitigação de riscos da contaminação desses sistemas.

A base de dados e as informações resultantes dessa pesquisa certamente serão do interesse da comunidade técnico-acadêmica e de gestores dos recursos hídricos, sobretudo na orientação das melhores escolhas, para definir políticas públicas para a ocupação de áreas particularmente sensíveis que constituem locais de recarga de sistemas aquíferos. Tais iniciativas podem garantir a manutenção de qualidade ambiental das águas subterrâneas e contribuir para uma melhor qualidade de vida de seus usuários.

O tratamento detalhado dos dados e informações de poços acompanhados em seus processos construtivos na AP, associado com o banco de dados e informações composto a partir do SIAGAS e dados de empresas, permitiram uma contribuição para o avanço do conhecimento das formações Barreiras e Pirabas, que possibilitou uma melhor compreensão da estruturação da geometria destes sistemas aquíferos, assim como sua influência nos mesmos, a exemplo de como ocorrem os mecanismos de recarga e circulação.

1.3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a realização de todo e qualquer trabalho e/ou estudo é necessário que se compreenda os temas relevantes ao desenvolvimento do mesmo. E, portanto, neste estudo foram destacados alguns referentes às formações Barreiras e Pirabas, seja no aspecto geológico/estrutural, hidrogeológico, geofísico, entre outros, que serão descritos a seguir. Também, mereceram destaque algumas obras referenciais em geologia estrutural, geologia regional e nas técnicas de análise e interpretação de elementos de relevo e drenagem.

➤ Sauma Filho (1996) examinou as águas das Formações Barreiras e Pirabas em relação à qualidade para consumo humano e industrial. Concluiu que, as águas dos aquíferos Pirabas apresentam pH próximo a 7 e condutividade elétrica (CE) elevada, que predominam o Ca^{2+} e HCO_3^- , revelando a dissolução de carbonato de cálcio oriunda do ataque ácido ao calcário da Formação Pirabas. Enquanto os índices mais elevados de pH e menor CE são característicos da Formação Barreiras. O mesmo vale para o ferro, pois com a profundidade, a tendência geral é de diminuição do seu teor, embora apareçam descontinuidades.

➤ Mendes (2000) identificou e delimitou os aquíferos da RMB por meio de SEV e perfilogens geofísicas de poços, auxiliadas pelas informações geológicas da região e verificou

que a mesma é composta de duas zonas aquíferas muito distintas. A primeira até uma profundidade de 160 m com composição arenosa variada, teor elevado de ferro necessitando de tratamento. A segunda zona aquífera a partir de 160 m até aproximadamente 300 m, composta por areias com lentes argilosas, mais favoráveis a exploração de água potável na região, uma vez que, possui grande volume de armazenagem e encontra-se livre de influência antrópica superficial.

Sua característica principal, a continuidade de seus depósitos por grandes distância, induz a interpretar essa unidade sedimentar como sendo possivelmente de um ambiente deposicional marinho.

➤ Costa (2004) investigou a relação entre elementos geométricos dos sistemas aquíferos existentes na RMB, e os aspectos estruturais resultantes dos últimos eventos tectônicos atuantes na área. Concluiu que, a direção de estiramento da Bacia Piraba-Barreiras é NW-SE e, conseqüentemente, a das falhas normais associadas é NE-SW. Sendo as falhas normais às superfícies potenciais de menor pressão elas se constituem um dos locais de maior favorabilidade para a recarga dos aquíferos por elas interceptadas.

➤ Koury (2006) realizou um estudo comparativo da viabilidade econômica e técnica da disponibilização de água para abastecimento público da região de Belém e Ananindeua, considerando as opções de águas superficial e subterrânea. Concluiu pela utilização de água subterrânea proveniente do sistema aquífero Pirabas como a melhor opção para ampliação do sistema de abastecimento de água para a região de Belém e Ananindeua.

➤ Palheta (2008) apresentou a compartimentação e o arcabouço tectônico da ilha de Mosqueiro, suas relações com o quadro neotectônico regional e suas implicações no mecanismo de recarga dos aquíferos. Segundo o autor aludido, a ilha de Mosqueiro é afetada por regime transcorrente, onde os eixos de tensões compressivo e distensivo estão posicionados respectivamente nas direções NE-SW e NW-SE. Os tensores que controlam o feixe de falhas transcorrentes dextrais NE-SW, que passa em frente a Belém são os mesmos que dominam na região de Mosqueiro.

Os principais rios e igarapés com direção NE-SW estão implantados em linhas extensionais.

➤ Cavalcante (2008) avaliou a relação entre elementos geométricos dos sistemas hidrogeológicos existentes ao norte da cidade de Castanhal-PA, e os aspectos estruturais, principalmente aqueles relacionados aos eventos neotectônicos como base para determinar áreas potenciais de recarga destes sistemas. Conclui que, a interação entre falhas, decorrentes da atuação desse regime de esforço, provocou na área um arranjo geométrico caracterizado

por blocos estruturais romboédricos que também foram desnivelados por movimentações verticais, gerando altos e baixos estruturais, causando modificações morfológicas e hidrogeológicas na área.

➤ Pinheiro (2009) apresentou um estudo da geometria das formações geológicas presentes no município de Castanhal, destacando as camadas carbonáticas suscetíveis de desenvolverem essas estruturas subsuperficiais, utilizando ferramentas multidisciplinares. A análise cinemática realizada naquele trabalho mostrou que os principais alinhamentos na região de Castanhal são NE-SW, tendo secundariamente alinhamentos NW-SE, e que as movimentações indicadas compatibilizam-se em um sistema transcorrente dextral, conforme modelo de Riedel.

➤ Paranhos (2010) estudou as características químicas da água no sistema hidrogeológico Pirabas na área de Icoaraci, durante um ciclo hidrológico completo. Constatou que nos aquíferos do sistema Pirabas as águas são predominantemente bicarbonatadas cálcicas com um pH alcalino de 7,6 e STD em média de 165 mg/L, características que preconizam de uma maior evolução e associam-se a uma circulação mais profunda. Nos aquíferos do sistema Barreiras tem-se predominantemente águas cloretadas sódicas, as quais apresentam um pH mais ácido (4,0) e média de STD de 89 mg/L. O modelamento geoquímico realizado no sentido de avaliar a percentagem das misturas entre as águas sugere que a mistura entre os dois sistemas aquíferos provavelmente está entre 5 e 10 % de águas do sistema Barreiras no sistema Pirabas.

➤ Oliveira (2012) realizou estudos da composição isotópica de estrôncio, bem como análises hidrogeoquímicas em alguns municípios da RMB e Capanema visando a caracterização dessas águas e eventuais misturas que nelas ocorreriam (Sub-áreas de Icoaraci e Ananindeua).

As águas dos aquíferos Barreiras e Pirabas possuem características hidroquímicas distintas, apresentando, no primeiro, menor concentração de elementos dissolvidos devido ao menor tempo de percolação e dissolução nas rochas que as encerram, acontecendo o oposto para as águas do Pirabas, o qual apresenta concentração iônica bem elevada, em razão do tempo de contato da água com a rocha encaixante estar na ordem de milhões de anos.

A fácies hidroquímica de cada aquífero revela o tipo de contribuição em suas águas, sendo no Barreiras originado da contribuição de água meteórica (Cl^- e Na^+), enquanto no Pirabas há forte predominância de reações químicas das rochas, como a dissolução da calcita (HCO_3^- e Ca^{2+}).

A partir dos diagramas de composição nota-se que o efeito da sazonalidade nos poços profundos é pouco perceptível, apresentando pequenas variações durante o período seco e chuvoso. Ressalta-se a distribuição das linhas em formato paralelo no diagrama de Scholler, tanto no Barreiras quanto no Pirabas, característico de águas que sofrem misturas.

Para as técnicas de coleta dos elementos estruturais, principalmente de estruturas rúpteis utilizaram-se referências básicas em geologia estrutural, tais como: Turner & Weiss (1963), Ramsay & Huber, (1987), Passhier e Trouw (2005), Twiss e Moore, (2007), Fossen (2012), etc.

Os princípios para o entendimento do arranjo estrutural que se desenvolve durante a deformação em falhas transcorrentes rúpteis foram obtidos a partir de experimentos em argilas (Figura 1), que proporcionaram observações de diversas estruturas, demonstrando que no sistema transcorrente (Figura 2) ocorrem dois estágios principais de surgimento de estruturas: pré e a pós-ruptura (Costa & Hasui, 1991). As estruturas integram o padrão geométrico básico que dá suporte prático a teoria de cisalhamento simples ou não-coaxial de deformação progressiva (Allmendinger, 1999; Costa & Hasui, 1991).

O primeiro estágio é caracterizado pelo aparecimento de estruturas compressoriais, a exemplo de dobras de *en échelon*, inicialmente a partir de ângulo de 45° com a zona de cisalhamento, bem como falhas inversas e de empurrão que se desenvolvem perpendicular a componente compressional.

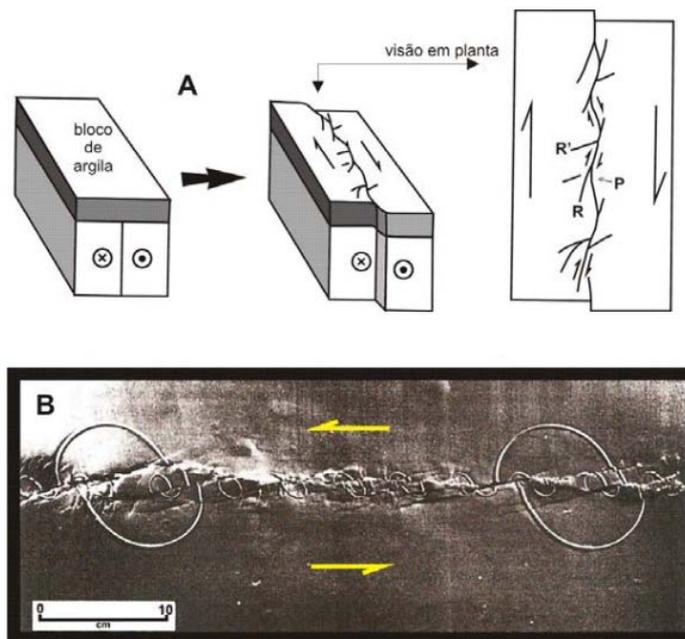


Figura 1 - Demonstração de experimento em argila em A (Bloco diagrama) e B (modelo em laboratório). Fonte: Van Der Pluijm & Marshak, 2004.

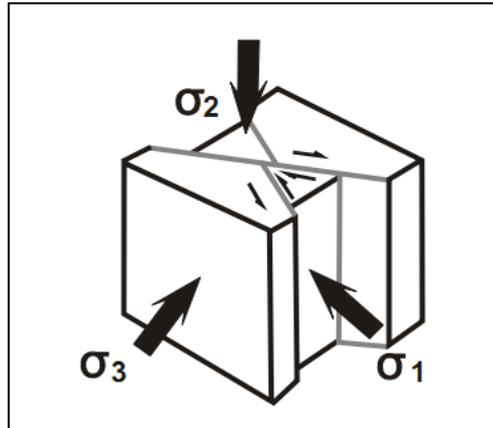


Figura 2 - Caracterização do sistema estrutural transcorrente, no bloco diagrama com a disposição dos tensores σ_1 (compressão máxima) σ_2 (compressão mínima) no plano horizontal, e σ_3 (intermediário) no plano vertical. Fonte: Anderson, 1942.

Segundo Palheta (2008) outras estruturas que se instalam são as falhas transcorrentes conjugadas de *Riedel* (par conjugado), denominadas também de fraturas de cisalhamento sintético e antitético. Os ângulos iniciais que os cisalhamentos sintético e antitético formam são controlados pelo coeficiente de fricção interna (θ). A posição da compressão máxima ou do eixo de encurtamento principal, da deformação infinitesimal, é orientada segundo ângulo de 45° com o limite da borda da zona de cisalhamento. Em virtude do sentido de rotação da zona, as falhas antitéticas (fraturas R') apresentam normalmente alto ângulo (70° - 90°) em relação à zona de borda e rotacionam-se mais fracamente, tornando-se posteriormente inativas e menos expressivas que as falhas sintéticas (fraturas R). O ângulo agudo entre as falhas antitéticas e sintética, dependendo da rocha, varia entre 60° - 70° . As falhas sintéticas apresentam geralmente ângulo entre 10° - 30° em relação à zona de borda do cisalhamento.

O cisalhamento de *Riedel* é bastante utilizado na determinação do sentido de movimentação das zonas de falhas rúpteis. Desenvolvem-se também os fraturamentos de distensão (T) formados com inclinação a partir da borda de zona (aproximadamente 45°), podendo ser rotativo e com surgimento de blocos em estilo dominó, apresentando as falhas entre os blocos, sentidos opostos à zona de cisalhamento principal. Também ainda ocorrem, as falhas normais e diáclases geralmente preenchidas por soluções, controladas pela componente extensional da zona de cisalhamento, perpendicularmente as estruturas compressivas.

No estágio de surgimento de estruturas do tipo pós-ruptura, novas falhas são formadas, às chamadas cisalhamento P e/ou Fraturas P (Figuras 1 e 3) que são simétricas às falhas sintéticas (fraturas R). Posterior, da mesma maneira ocorrem as fraturas Y=D, paralelas à borda da deformação e fraturas X (ângulo agudo $90^\circ - \theta/2$) em referência a borda, similamente ao que ocorre com as antitéticas (R'). Possuem o mesmo sentido de movimentação do binário externo (Figura 4).

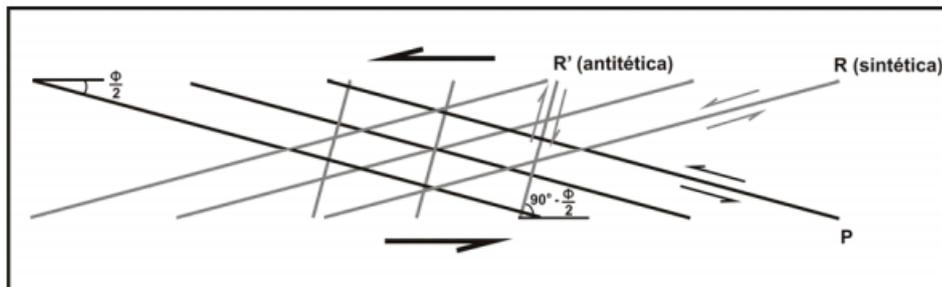


Figura 3 - Arranjo geométrico das falhas pré-rupturas: sintética (R) e antitética (R'), e pós-ruptura: cisalhamento P. Binário externo sinistral. Ângulo (coeficiente) de fricção interna (θ) de 30° . Fonte: Allmendinger, 1999.

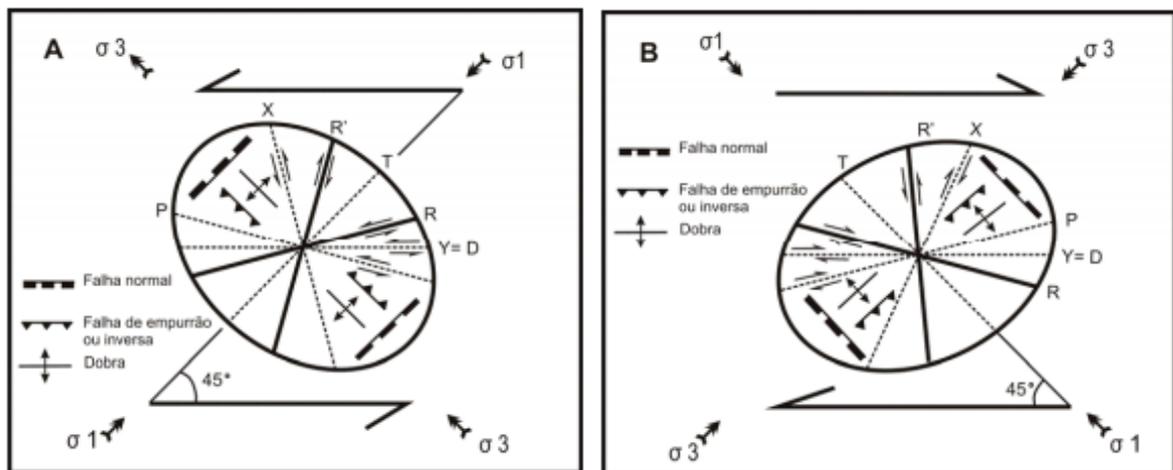


Figura 4 - Padrão estrutural teórico de cisalhamento simples ou não-coaxial em regime deformacional rúptil. Em A arranjo resultante de um binário sinistral e em B binário dextral. Par conjugado: fraturas sintética (R) e antitética (R'); fraturas P, X; Y=D. O sentido de movimento da fratura R' é oposta a do binário externo σ_1 (eixo compressivo); σ_3 (eixo extensional). T: fratura de distensão. Fonte: Reading 1980; Hasui & Costa, 1991.

Na rotação das falhas, com a continuidade da deformação a movimentação ocorre principalmente ao longo das falhas sintéticas (R') e P até que as mesmas se unam, formando uma única falha transcorrente principal.

A rede de drenagem traçada de forma sistemática e uniforme pode fornecer importantes informações, relacionadas à estrutura geológica de uma área; variações no estilo estrutural e, mais grosseiramente, nas facies litológicas (Soares & Fiori, 1976).

Costa 2004, utilizando os princípios de classificação conforme Howard (1967) e Deffontaines & Chorowicz (1991) compartimentou a RMB em sistemas de drenagem. A área em consideração nesse trabalho se encerra em parte de dois deles, os quais são: Bacia Litorânea que sofre influência das baías do Guajará e Marajó e, a Bacia do Rio Guamá, que sofre influência do rio que lhe nomeia (Figura 5).

Na Bacia Litorânea as direções gerais de fluxo das micro-bacias são NW-SE e NE-SW, com inflexões para N-S e E-W. Enquanto, na Bacia do Rio Guamá que é formada pelos afluentes das margens direita e esquerda do mesmo, a direção geral é E-W e representa o canal principal (Costa, 2004).

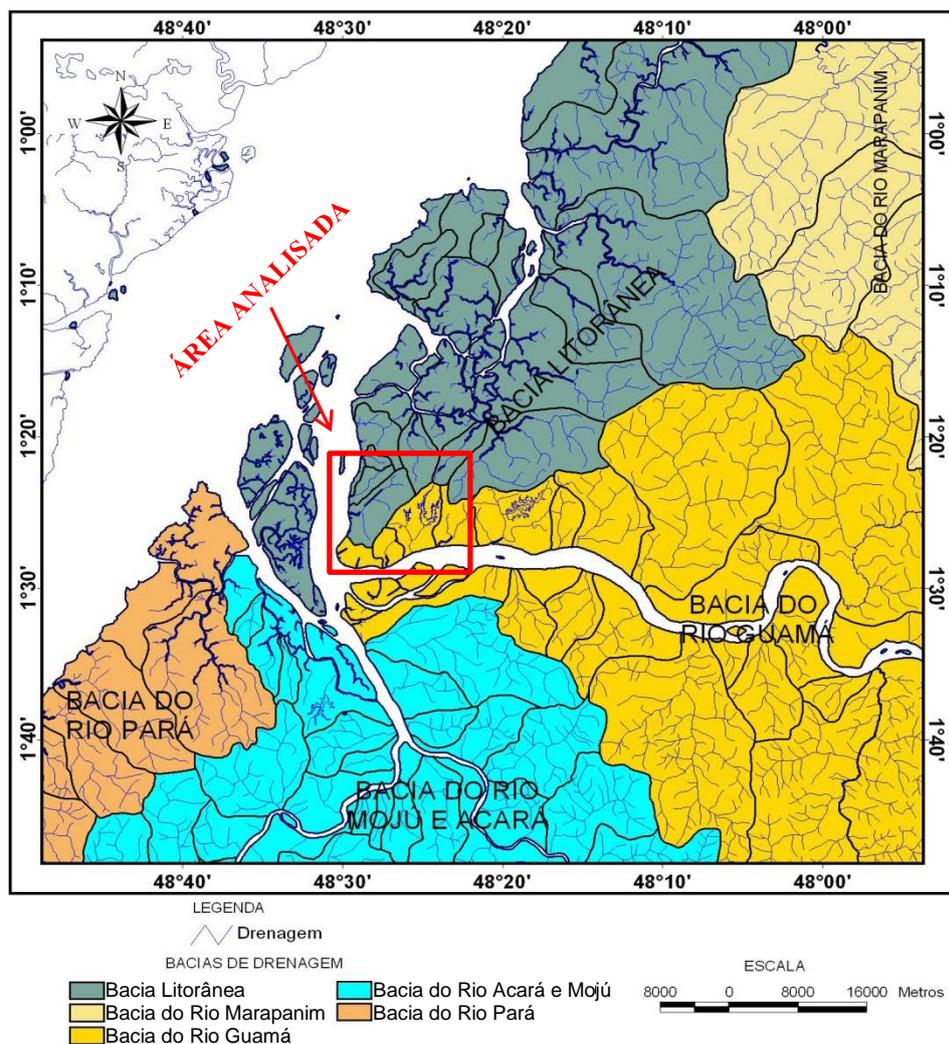


Figura 5 - Sistemas de drenagem regional em relação à área de estudo.
Fonte: Modificado de Costa, 2004.

A análise da drenagem na área de estudo foi realizada com base na metodologia de Soares & Fiori (1976): densidade de textura de drenagem, sinuosidade, angularidade, tropia, assimetria e formas anômolas (Figuras 6 e 7).

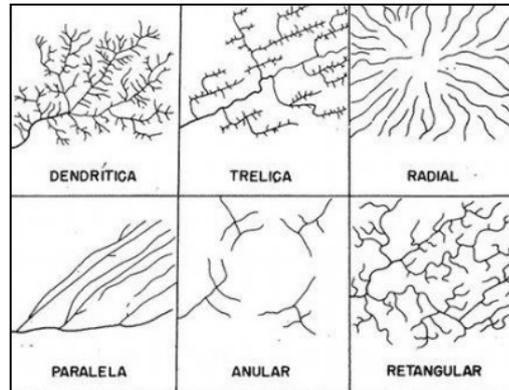


Figura 6 - Tipos de padrões texturais de drenagem. Fonte: Soares & Fiori 1976.

A- Densidade	B-Sinuosidade	C-Angularidade	D-Tropia	E-Assimetria	F-Formas Anômalas
ALTA	CURVO	ALTA	UNIDIRECIONAL	FRACA	MEANDROS ISOLADOS
MÉDIA	MISTO	MÉDIA	BIDIRECIONAL	FORTE	EM ARCO
BAIXA	RETILÍNEO	BAIXA	TRIDIRECIONAL		COTOVELO
			MULTIDIRECIONAL		
			ORDENADA		

Figura 7 - Propriedades de drenagem. Fonte: Soares & Fiori, 1976.

De acordo com Costa, (2004) na RMB e, portanto na área em questão é possível encontrar trechos de rios retilíneos que se tornam sinuosos com bruscas mudanças de orientação, o que pode corresponder à passagem de drenagem para uma área em que a taxa de subsidência sofra mudanças, possivelmente sobre uma falha ou um bloco abatido (Deffontaines & Chorowicz, 1991). Estas feições são encontradas, comumente, nos rios de planície flúvio marinha e, localmente, nos terraços baixos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram estabelecidos alguns procedimentos metodológicos, organizados em etapas, dentre os quais se destacam os seguintes:

- Pesquisa bibliográfica: essa etapa teve como objetivo inicial o levantamento e análise bibliográfica de dados e informações referentes à região nordeste do Estado do Pará, principalmente à área da RMB, seja no contexto geológico (estrutural/neotectônico), hidrogeológico e geofísico, bem como de áreas afins existentes em monografias, dissertações, teses, livros, periódicos e anais, como também de mapas temáticos, servindo para um melhor conhecimento das características da área, ajudando na elaboração do trabalho. Essa foi uma atividade permanente ao longo de todo o trabalho.

- Arquivo de dados de poços tubulares: foi realizado o levantamento e a montagem de um banco de dados a partir das fichas técnicas dos poços, constantes nos acervos de órgãos públicos (COSANPA, SAAEB, UFPA e CPRM) e da empresa privada FEMAC GEOSOLO ENGENHARIA que trabalham na área, gerando um arquivo de dados dos poços. Sobre esse arquivo, foi realizado o tratamento inicial dos dados adquiridos, utilizando-se o *software Excel*, que serviu como base para todas as etapas a seguir.

Foi utilizado o banco de dados de poços do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM.

- Trabalho de campo: nessa fase ocorreu o acompanhamento do processo construtivo de dois poços tubulares profundos na Sede Campestre da Assembléia Paraense nos períodos de 17/10/2013 a 18/12/2013 para o Poço AP-P1 e 17/03/2014 a 23/05/2014 para o Poço AP-P2, construído pela FEMAC GEOSOLO ENGENHARIA, de acordo com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, em particular as NBR-12211 (1992a), NBR-12212 (1992b), NBR-12214 (1992c), NBR-12216 (1992d), NBR-12244 (1992e), evitando-se assim, a construção inadequada de poços com baixas vazões, entre outras desvantagens, uma vez que a construção do poço e as características do aquífero estão diretamente relacionadas com a produtividade do mesmo.

Durante a realização do furo piloto para ambos os poços foi confeccionado o *perfil do tempo de perfuração* por metro. Como também foram coletadas em calha, amostras de solo trazidas pelo fluido de perfuração, a cada metro perfurado ou quando ocorria variação da

litologia que auxiliou na elaboração e descrição do *perfil litológico* dos furos e na correlação litoestratigráfica com a de outros poços existentes na área. As amostras foram lavadas e posteriormente acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados, numerados na sequência da coleta.

Para a elaboração dos perfis litológicos e de correlação foram utilizados os *softwares CorelDRAW X7 e Surfer 9*.

Após a realização do furo piloto foi realizada a perfilagem geofísica pelo Laboratório de Prospecção Geofísica da Universidade Federal do Pará, com a finalidade de delimitar os aquíferos encontrados; cujos parâmetros registrados na perfilagem foram: raios gama naturais – NGAM (API CPS), potencial espontâneo – SP (mV), resistência[®] – SPR (Ohm), resistência normal curta – SHN (Ohm.m) e resistência normal longa – LON (Ohm.m), por meio do uso do equipamento perfilador WIN LOGGER RG – Eletric Sonder ELXG. Sendo, os registros da perfilagem realizados a partir de 12,50 m, devido ao comprimento da sonda (2,50 m), mais a extensão do cabo bridle (10,00 m). Ressalta-se que foram utilizados somente os perfis de RG e SP para os poços estudados em detalhe e para alguns poços cadastrados que apresentaram dados análogos. Estes dados geofísicos serviram como base para auxiliar na elaboração dos perfis litológicos e de correlação estratigráfica.

O perfil construtivo para os poços (AP-P1 e AP-P2) foram elaborados durante todo o processo da realização dessas obras.

E também, foram localizados poços tubulares existentes nas proximidades desses poços diretamente estudados, no qual foi realizada uma coleta de dados de levantamento geodésico por GPS para dar origem a uma referência de nível, a qual serviu de base para a análise e comparação com os dados de geologia e hidrogeologia neste trabalho.

▪ Laboratório: nessa etapa foram realizados ensaios granulométricos para alguns segmentos arenosos do perfil geológico dos poços da AP no Laboratório de Geologia Marinha da Universidade Federal do Pará, buscando uma melhor caracterização desses materiais com o intuito de se estudar os parâmetros hidrogeológicos. As frações sedimentares obtidas tanto pelo peneiramento a seco como pelo peneiramento a úmido, foram inseridas no programa *Sysgran 3.0* - Sistemas de Análises Granulométricas, para calcular as características texturais dos sedimentos. Sendo utilizado o método descrito por Folk & Ward (1957) e a classificação de Wentworth (1922). Além do método Folk & Ward (1957) foi utilizado para análise textural a classificação de Shepard (1954). O *Sysgran* forneceu a média (diâmetro médio), o

selecionamento (grau de seleção ou desvio padrão), a assimetria, a curtose e suas classificações verbais.

▪ Geoprocessamento – Sistema de Informação Geográfica (SIG): foram utilizados para a geração do SIG e elaboração dos mapas neste trabalho, os shapes do projeto Geologia e Recursos Minerais da Folha Belém SA.22-X-D-III (Oliveira & Silva, 2011), Imagens SRTM (Shuttle Radar Topography Mission)³ usado para extração das curvas altimétricas, drenagem e seções do relevo.

O *software ARCGIS versão 10.1* foi utilizado para a elaboração de todos os mapas desta dissertação, no qual os dados foram inseridos em um banco de dados de um SIG, projetados no sistema de projeção cartográfica UTM, datum geocêntrico SIRGAS 2000, zona 22 sul.

▪ Análise Morfoestrutural: engloba a caracterização do relevo e da drenagem para identificar se a configuração geomorfológica da área estudada tem controle estrutural. A rede de drenagem foi classificada e analisada segundo a metodologia proposta por Soares & Fiori (1976). E o relevo foi analisado conforme o aspecto morfológico, em termos de *landforms* tectônicos, segundo a metodologia proposta por Stewart & Hancock (1994).

A compartimentação da área em blocos tectônicos foi realizada, de acordo com metodologias utilizadas por Costa (2004), Bandeira (2008) e Palheta (2008), e a definição dos arranjos geométricos e cinemáticos através da integração dos dados.

O *software Global Mapper 15*, foi utilizado para processar o modelo digital de elevação – MDE e as seções do relevo, perfis estruturais e a drenagem a partir dos dados SRTM da área.

Foi desenvolvido um modelo estrutural para a área com o propósito de identificar as principais direções de compressão (σ_1) e distensão (σ_3) relevantes para determinação das áreas de recarga de aquíferos profundos.

Os mapas de fluxo hídrico subterrâneo foram confeccionados baseado na carga hidráulica e na compartimentação morfoestrutural, através do uso do *software Surfer 9*.

▪ Dissertação de Mestrado: após as etapas supracitadas, e a partir da integração dos dados, interpretação e geração de informações referentes ao estudo, foi elaborado este trabalho constituído de texto, gráficos, tabelas e mapas temáticos.

³ Endereço eletrônico da imagem SRTM: <http://earthexplorer.usgs.gov/>

3 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada na porção nordeste do Estado do Pará, que possui aproximadamente 1.800 km² e definida como Região Metropolitana de Belém – RMB. Cartograficamente se situa na Folha Belém, SA. 22-X-D-III, de escala 1:100.000, delimitada pelas coordenadas geográficas 1° e 1° 30' S e 48° e 48° 30' W. A RMB compreende os municípios de Belém, Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Barbará do Pará, Santa Isabel⁴ e Castanhal⁵, limitando-se ao norte com o rio Pará, a oeste com a baía do Guajará e ao sul com o rio Guamá, sendo o principal acesso a área realizado pela rodovia BR-316.

A pesquisa foi realizada em área mais favorável ao estudo pretendido em torno de 100 km², porção de Belém entre a baía do Guajará a oeste e rio Guamá a sul, no perímetro onde foram construídos dois poços profundos na sede campestre do clube Assembléia Paraense, posicionados no eixo viário das Avenidas Almirante Barroso e João Paulo II, cujas coordenadas geométricas (Datum WGS 84) de locação dos poços AP-P1 e AP-P2, obtidas por GPS, são respectivamente: 01°24'55,4" S e 48°26'22,5" W; e 01°24'46,2" S e 48°26'33,3" W (Figura 8 e 9).

Segundo a classificação climática de Koppen essa região situa-se na zona climática Afi, que coincide com o clima equatorial úmido. De acordo com dados (Período de 1967 a 2011) fornecidos pelo INMET, a precipitação média anual foi cerca de 3017,5 mm, cujos índices pluviométricos variaram entre 122,5 mm (novembro) e 440,3 mm (março), comprovando que o intervalo de maiores precipitações ocorre de fevereiro a abril, e os meses de menores precipitações ocorre nos meses de setembro a novembro. A temperatura varia, em média de 25° C, em fevereiro e 27° C, em novembro.

⁴ Em 2010, através da Lei Estadual Complementar 72/2010, o município de Santa Izabel do Pará passou a integrar a Região Metropolitana de Belém (IPEA, 2012).

⁵ O município de Castanhal foi incluído na RMB pela Lei Estadual Complementar n.º 076, de 28 de dezembro de 2011, publicada no Diário Oficial da União de 29 de dezembro de 2011 (DJPA, 2013).

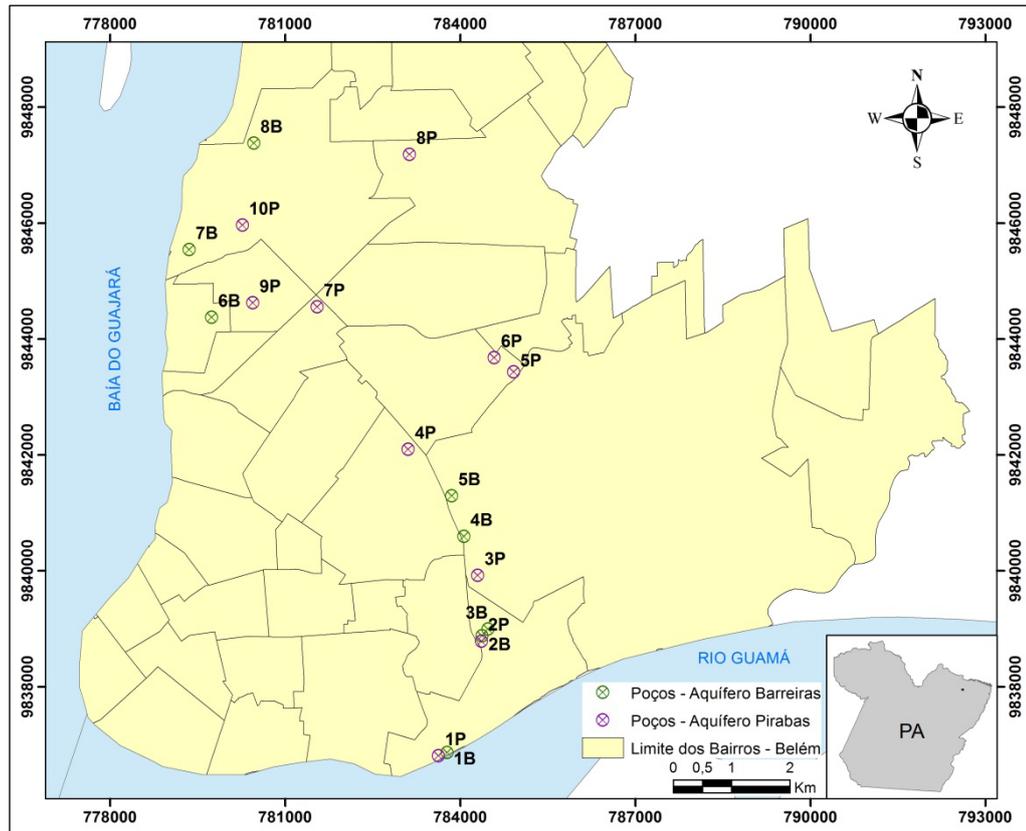


Figura 8 - Localização da área de estudo na RMB – Pará. Fonte: Do autor.



Figura 9 - Vista aérea de localização dos Poços Tubulares Profundos (Poço AP-P1 e Poço AP-P2) construídos na Sede Campestre da AP, Bairro de Souza, no Município de Belém-Pará. Fonte: Google Earth.

A cobertura vegetal característica da RMB é a Floresta Secundária ou “capoeiras” que substituíram a antiga Floresta Densa dos baixos platôs, da qual alguns testemunhos ainda são encontrados em Mosqueiro, em Caratateua e áreas adjacentes (Ribeiro et al., 2011).

A vegetação dos mangues e siriubais acompanham as porções fluviais e semilitorâneas do setor estuarino, enquanto a Floresta Ombrófila domina os tratos marginais dos cursos d’água e as baixadas, onde prevalecem formações herbáceas, subarbusivas e arbustivas. Atualmente, a RMB não apresenta quase nada dessa cobertura vegetal.

Os tipos de solos predominantes são: Latossolos Amarelo, formados por sedimentos argilo-arenosos da Formação Barreiras, com profundidade de 2 m e representa 48,99 % da área urbana; Concrecionários Lateríticos, originado por partículas finas com alto grau de intemperização, podendo ter vários graus de evolução, sendo a laterita o sinal do processo de formação; Glays pouco úmido, intercorrer em planícies inundadas das regiões costeiras de baixas altitudes e nas margens dos rios e igarapés; Podzol Hidromórfico de textura arenosa e profundidade média de 150 cm; e Areias Quartzosas formada por sedimentos arenosos de textura fraca, granular ou maciça porosa, se desfazendo em grãos simples (Craveiro, 2007).

Os principais corpos hídricos que circundam a RMB são a baía do Guajará e o rio Guamá que recebem a descarga hídrica de rios e igarapés da região.

A baía do Guajará faz parte do estuário do Rio Amazonas e tem continuidade nas baías de Santo Antônio e Marajó. Sofre diretamente a influência das marés oceânicas. Suas águas são barrentas e no período de baixa pluviosidade na região, ficam salobras devido ao “avanço” das águas oceânicas (Craveiro, 2007). Essa baía é formada na confluência dos rios Acará e Guamá e está localizada em frente a porção noroeste da cidade de Belém.

O rio Guamá, localizado na parte sul do município de Belém possui as mesmas influências das marés da baía do Guajará, com semelhança nas suas águas e grande quantidade de material argiloso em suspensão, proveniente de atividades erosivas em suas margens.

3.1 CONTEXTO GEOLÓGICO

Dominam na região unidades litoestratigráficas cenozóicas, caracterizada pela Formação Pirabas de idade oligo-miocênica, a Formação Barreiras de idade mioceno-pliocênica, os sedimentos Pós-Barreiras e os sedimentos Holocênicos. A Figura 10 apresenta a distribuição dessas unidades da área de estudo e as Tabela 1 e 2 o seu arranjo litoestratigráfico, respectivamente.

3.1.1 Formação Pirabas

A Formação Pirabas segundo Maury (1925) aflora descontinuamente nos Estados do Pará, Maranhão e Piauí, representando um dos melhores documentos paleontológicos do Cenozóico marinho brasileiro. A unidade, depositada durante o Oligoceno Superior – Mioceno Inferior é litoestratigraficamente constituída por calcários de composição variável e representa um paleoambiente marinho de águas rasas e quentes com salinidade normal (Ferreira & Cunha, 1957; Petri, 1957; Ferreira, 1966; 1980, 1982; 1984; Góes et al. 1990).

Apresenta três fácies, que estão associadas respectivamente a ambientes de mar aberto, laguna e mangue (Ackermann, 1964, 1969, 1976; Francisco & Ferreira, 1988; Ferreira, 1977).

1) A fácies Castelo (Basal) é caracterizada litologicamente por calcários duros, diversificados, apresentando-se comumente na forma de coquinas, biohermitos, micritos e dolmicritos, originados em ambiente de mar aberto, águas bastante agitadas e quentes com salinidade normal;

2) A fácies Capanema (Intermediária) compreende litotipos representados por calcários argilosos (margas), micritos, biomicritos, folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos-beach rock (Ferreira 1982) depositados em lagos, bordas de bacia ou estuário, com águas calmas e salinidade um pouco abaixo do normal e;

3) A fácies Baunilha Grande (Topo) é litologicamente composta por argilas negras com vegetais piritizados e nódulos de calcários escuros contendo fragmentos de crustáceos branquimes, característico de um típico ambiente redutor de mangue.

Recobrando a Formação Pirabas, em contato discordante, encontram-se os sedimentos continentais da Formação Barreiras (Francisco & Ferreira, op. cit). E o seu limite inferior principalmente e discordantemente ao embasamento cristalino (Almaraz & Formoso, 1971) e rochas cretácicas (Rossetti, 2001).

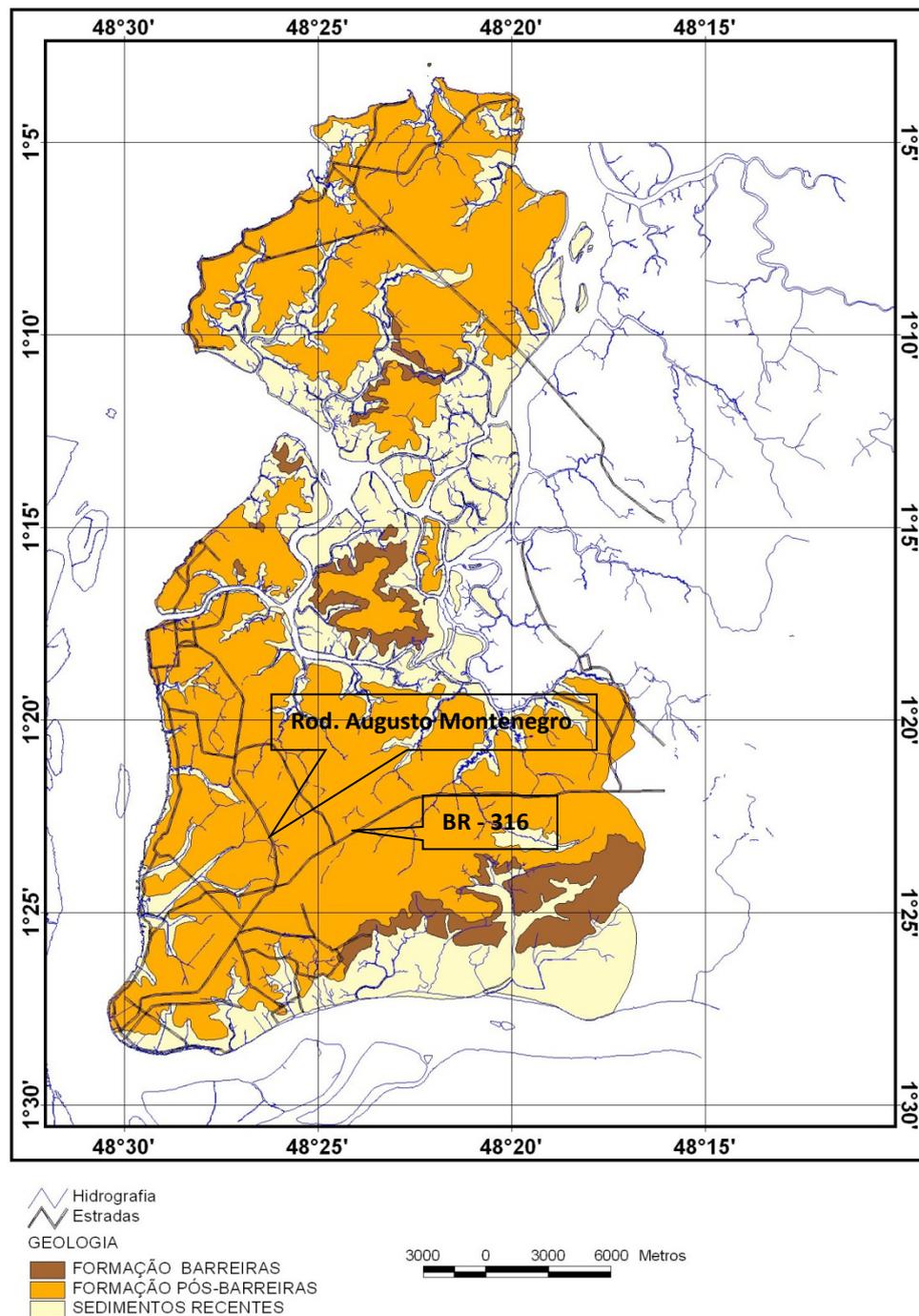


Figura 10 - Mapa geológico da RMB modificado de Costa 2001

3.1.2 Formação Barreiras

A denominação “Barreiras” foi proposta para designar os sedimentos cenozóicos que ocorrem desde o litoral do Rio de Janeiro até o estado do Pará, sob a forma de falésias ou terraços nas margens dos rios (Góes & Truckenbrodt, 1980).

Góes & Truckenbrodt (1980) definiram três litofácies: argilo-arenosa, arenosa e conglomerática, da base para o topo, de coloração amarelada a alaranjada com camadas de arenito ferruginosos, pouco consolidados, com estruturas sedimentares do tipo estratificações e conteúdo fossilífero vegetal. Além de estruturas como microfraturas e microfalhas (Matta, 2002).

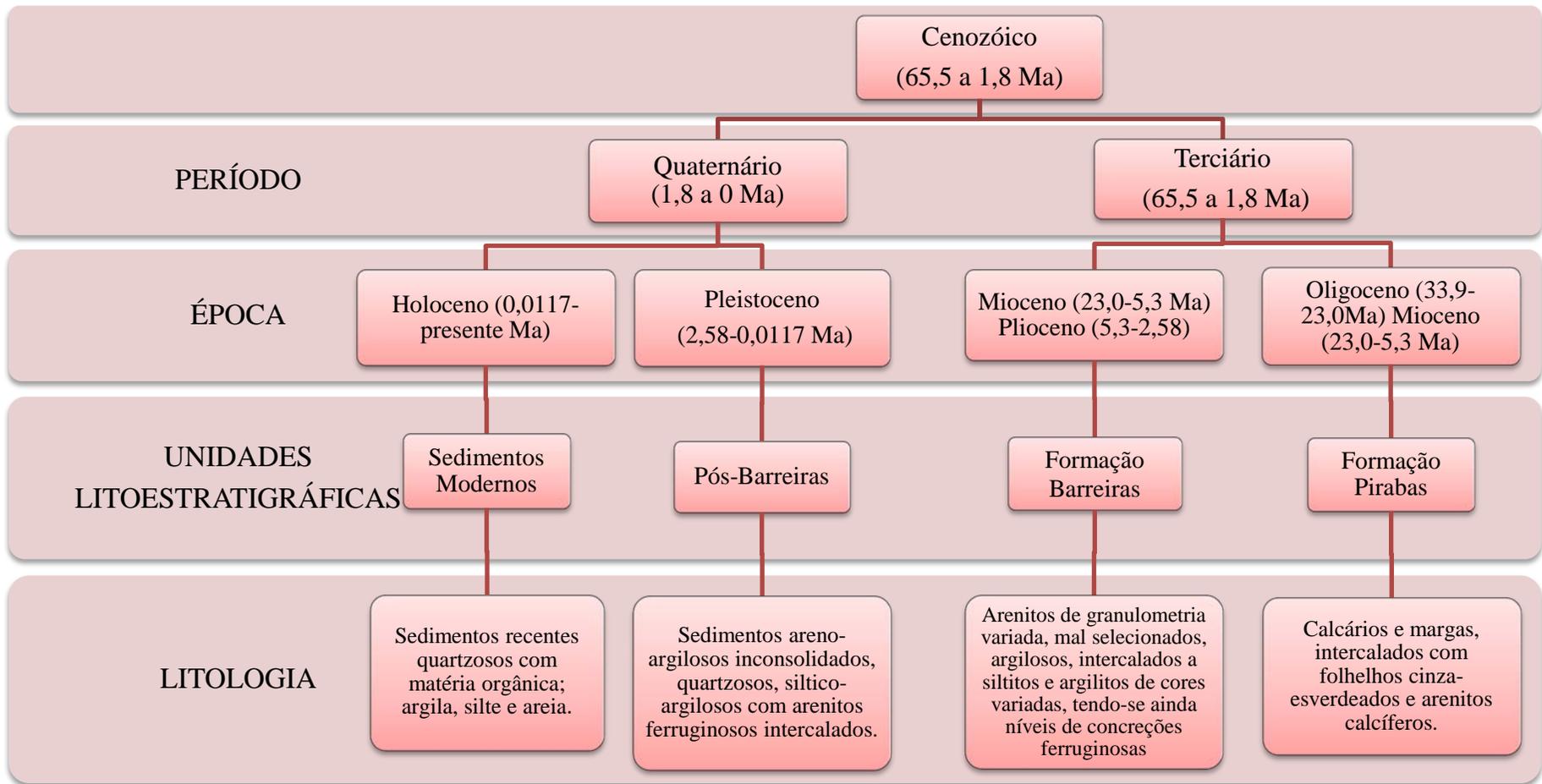
3.1.3 Pós-Barreiras

Composto por sedimentos inconsolidados de coloração amarelada, sobrepostos a Formação Barreiras, e constituídos litologicamente por sedimentos areno-argilosos maciços, apresentando seixos milimétricos de quartzo e concreções ferruginosas dispersas aleatoriamente, areias de coloração creme-amarelados e branca com pequenas frações de argila com granulometria variando de fina a média.

3.1.4 Sedimentos Holocênicos

Esta unidade é representada por sedimentos aluvionares atuais e sub-atuais, situados nos vales dos rios e igarapés que drenam a área, formados litologicamente por areias, siltes e argilas. As areias são finas a médias, de coloração marrom, com siltes e argilas intercaladas. As argilas são geralmente cinza-escuro a cinza-claro com leves manchas avermelhadas e amareladas devido à oxidação do ferro, apresentando restos de vegetais (galhos e folhas), comumente bioturbadas, o que as torna sem estruturas. Tais sedimentos são observados no período de maré baixa, nas bordas dos canais estuarinos, braços de rios, "furos", igarapés e "praias" que drenam a área (Farias et al. 1992).

Tabela 1 - Coluna litoestratigráfica da cobertura sedimentar da Região Metropolitana de Belém. Fonte: Sauma Filho 1996 e Stratigraphy⁶.



⁶ Elaborada com base: <http://www.stratigraphy.org>

Tabela 2 - Sequências estratigráficas do Cenozóico (Paleogeno Superior – Neógeno) das plataformas Bragantina e Pará. A - Formação Pirabas e a parte inferior da Formação Barreiras; B - parte intermediária e superior da Formação Barreiras; C - Sedimentos Pós-Barreiras. Fonte: Rossetti 2001.

ÉPOCA		UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA	SEQUÊNCIA DEPOSICIONAL
PLIOCENO-QUATERNÁRIO		PÓS-BARREIRAS	C
MIOCENO	SUPERIOR	PALEOSSOLO LATERÍTICO	DS 3
	MÉDIO	FORMAÇÃO BARREIRAS SUPERIOR-MÉDIO	B
			DS 2
	INFERIOR	Formação Barreiras inferior	A
OLIGOCENO SUPERIOR		Formação Pirabas	
		PALEOSSOLO BAUXÍTICO-LATERÍTICO	DS 1

3.2 CONTEXTO HIDROGEOLÓGICO

Os sistemas hidrogeológicos da região de Belém pertencem às unidades estratigráficas, da mais antiga para a mais nova, Pirabas, Barreiras e Cobertura Quaternária (Tabela 3). Esses sistemas estão razoavelmente estudados até uma profundidade em torno de 280 metros. Abaixo desta profundidade, as características hidrodinâmicas e as espessuras das camadas de sedimentos não são conhecidas. O gradiente hidráulico e a velocidade de escoamento das águas subterrâneas são pequenos, devido ao relevo relativamente plano e a presença de sedimentos argilosos (Koury, 2007).

Tabela 3 - Principais características dos sistemas hidrogeológicos que ocorrem em Belém.
Fonte: Matta 2002.

SISTEMAS AQUÍFEROS	PROFUND.	VAZÃO	OBSERVAÇÃO
Aluviões	< 10 m	10 m ³ /h	Aquíferos livres
Pós-Barreiras	< 25 m	5m ³ /h	Aquíferos livres a semi-confinados.
Barreiras	25 - 90 m	10-70 m ³ /h	Semi-livre a confinado. A unidade mais conhecida e explotada na área. Espessura em torno de 70 m.
Pirabas Superior	70 - 180 m	100 - 200 m ³ /h	Aquíferos confinados. Espessura em torno de 80 m.
Pirabas Inferior	180 - 290 m	Até 600 m ³ /h	Aquíferos confinados. Melhores aquíferos. Melhores qualidades da água. Pouco explotada na área. Alto custo em função da profundidade.

De acordo com Palheta (2008), os pacotes sedimentares que acumulam água subterrânea na área de estudo são formadores de três sistemas aquíferos principais, são eles:

- **Barreiras:** esta unidade aquífera é a mais conhecida e explotada na RMB e corresponde aos sedimentos da Formação Barreiras, com litotipos heterogêneos desde argilitos até arenitos grosseiros com níveis conglomeráticos situados em profundidades normalmente entre 25 a 90 m. Apresenta ainda níveis lateríticos e níveis argilosos caulinizados. Este sistema aquífero pode ocorrer do tipo semilivre a confinado. E quando afloram as rochas permoporosas desse sistema, a recarga se dá diretamente da precipitação pluviométrica, quando não, o suprimento de água vem a partir das camadas sobrepostas. São aquíferos com espessura máxima entre 70-80 m e disponibilizam vazões entre 15 e 80 m³/h, que frequentemente apresentam teor de ferro fora do padrão recomendado pelo Ministério da Saúde, cujo valor máximo permitido é de 0,3 mg/L, no qual este valor excessivo produz nas águas o surgimento de ferrobactérias que causam paladar metálico, mancha em roupas e instalações sanitárias, incrustações nas bombas, nos filtros dos poços e nas canalizações.

- **Pirabas Superior:** essa unidade é composta pelos sedimentos marinhos,ossilíferos da Formação Pirabas. Há camadas de argilas carbonáticas de cor cinza-esverdeada e leitos de calcário duro, de coloração cinza esbranquiçada, que se alternam sucessivamente com camadas de arenito carbonático, siltitos e arenitos que o separam do Aquífero Pirabas Inferior,

com profundidade geralmente a partir de 80 m até 180 m e vazões que variam entre 100 a 200 m³/h.

▪ *Pirabas Inferior*: essa unidade é composta, predominantemente, de camadas repetitivas de arenitos de cor cinza-esbranquiçada, granulação fina a conglomerática, com intercalações mais espessas de argilas e siltitos. Ocorrem em profundidades abaixo de 180 m, com vazões em torno de 300m³/h ou maiores, potabilidade e teores de ferro baixíssimos ou mesmo ausentes na maioria das vezes.

As águas deste conjunto aquífero são de composição bicarbonatada cálcica, com pH na faixa de 7 - 7,5, STD variando de 242 a 383 mg/L e dureza total em média de 165 mg/L de CaCO₃.

3.3 ARRANJO GEOTECTÔNICO

3.3.1 Paleotectonismo

O arranjo Paleotectônico da região nordeste do Pará está relacionado às estruturas tectônicas antigas, ou seja, zonas de fraqueza presentes no contexto de blocos crustais estabelecidos no que virar a ser o Cráton Amazônico, bem como do seu entorno.

O Cráton Amazônico integra um embasamento composto por rochas granito-gnáissicas de médio a alto grau metamórfico e sequências supracrustais de baixo a médio grau, sobre o qual foram instalados vários tipos de coberturas vulcânicas, sedimentares, bacias sedimentares fanerozóicas, além de terem sido cortados por corpos graníticos (Almeida, 1978). Nessa região são reconhecidas rochas que foram geradas entre o Arqueano e o Holoceno, refletindo uma evolução que abrange intervalo de pelo menos 3,2 Ga (Hasui, 1996).

A evolução da Amazônia proposta por Hasui et al. (1984) e complementada por Hasui (1996) considera que a Amazônia é estruturada fundamentalmente em doze blocos crustais constituídos por complexos gnáissicos, granitóides e greenstone belts, limitados por suturas, associadas as quais ocorrem cinturões de alto grau. Estes blocos teriam se agregado através de colisões diácronas no Arqueano/Proterozóico Inferior, compondo parte de um megacontinente.

Na região Amazônica ocorreram três eventos tectônicos extensionais no Proterozóico Médio-Superior, Paleozóico e Mesozóico-Paleogeno. Nesse último intervalo temporal se assinalam os processos neotectônico, morfomodeladores dos arranjos geométrico e

cinemático que se impuseram sobre a região em análise e que são importantes para o entendimento de vários parâmetros hidrogeológicos sobretudo os de fluxo subterrâneo e os mecanismos de recarga de unidades aquíferas. No Neógeno-Quaternário o regime tectônico é do tipo transcorrente, relacionado à rotação da Placa Sul Americana para oeste.

3.3.1.1 Quadro Arqueano / Proterozóico

Conforme Hasui (1996), no Arqueano/Proterozóico Inferior a compartimentação de primeira ordem que foi identificada consiste em um mosaico de grandes blocos crustais justapostos (páleo-placas) (Figura 11), marcada geologicamente por cinturões granulíticos, que representam porções da crosta inferior que foram alçadas a superfície por tectonismo, ao longo de descontinuidades crustais.

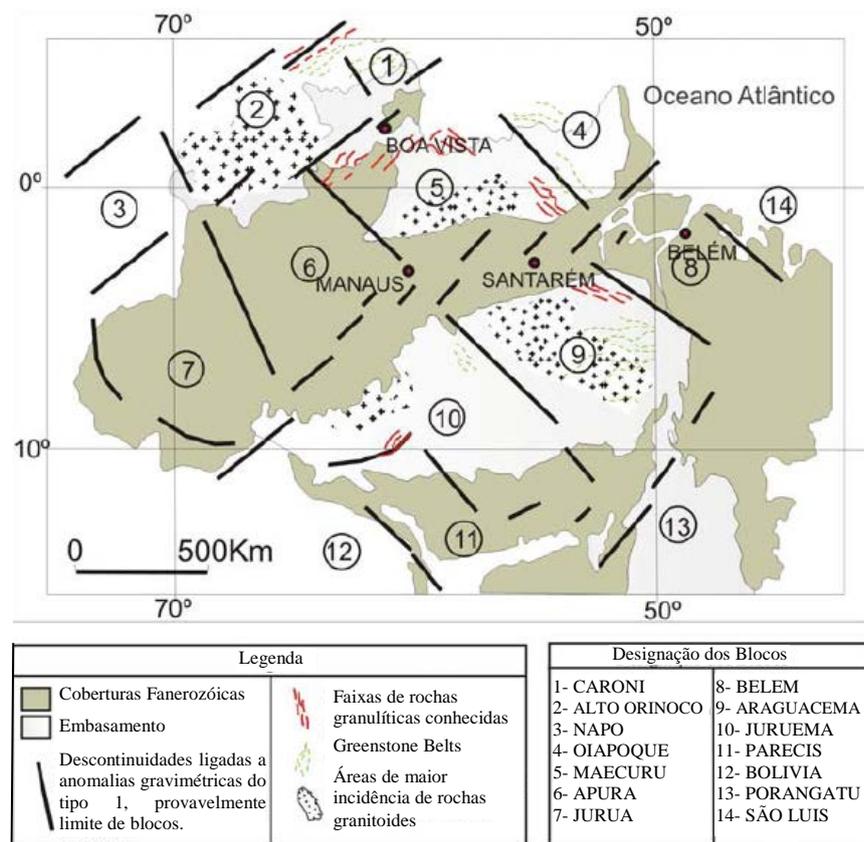


Figura 11 - Blocos crustais da região Amazônica. Fonte: Hasui et al., 1984.

As bordas dos blocos são marcadas por cinturões de cisalhamento que envolveram cavalgamentos, complicados ou não por transcorrências tardias, condizentes com o modelo de colisão de continentes, e por descontinuidades apontadas pela gravimetria, que marcam as

suturas colisionais. Essas bordas representam as zonas de fraqueza crustal fundamentais, com direções preferenciais NE-SW e NW-SE (Costa & Angélica, 1997).

Esse seria o arranjo Arqueano sobre o qual de forma recorrente se impuseram outros eventos geotectônicos, com destaque para as Faixas Araguaia-Gurupi, as quais impõem novas configurações estruturais sobre a área em consideração.

De acordo com Hasui (1996), a partir do final do Proterozóico Inferior e início do Proterozóico Médio o cenário que era de uma grande massa continental consolidada, já conhecida como megacontinente Mesoproterozóico (Almeida, 1978), passa por três grandes eventos tectônicos intraplaca de tipo extensional: no Mesoproterozóico, no Paleozóico e no Mesozóico.

Segundo Costa & Hasui (1992) no Proterozóico Médio o modelo assume um amplo regime tectônico extensional na Amazônia Brasileira. E tal modelo difere, com base na geometria e cinemática dos elementos estruturais e na natureza das unidades sedimentares, em dois compartimentos extensionais (Figura 12), denominados de ocidental e oriental, separados pela Zona de Transferência Boa Vista Caracará (Costa et al., 1991).

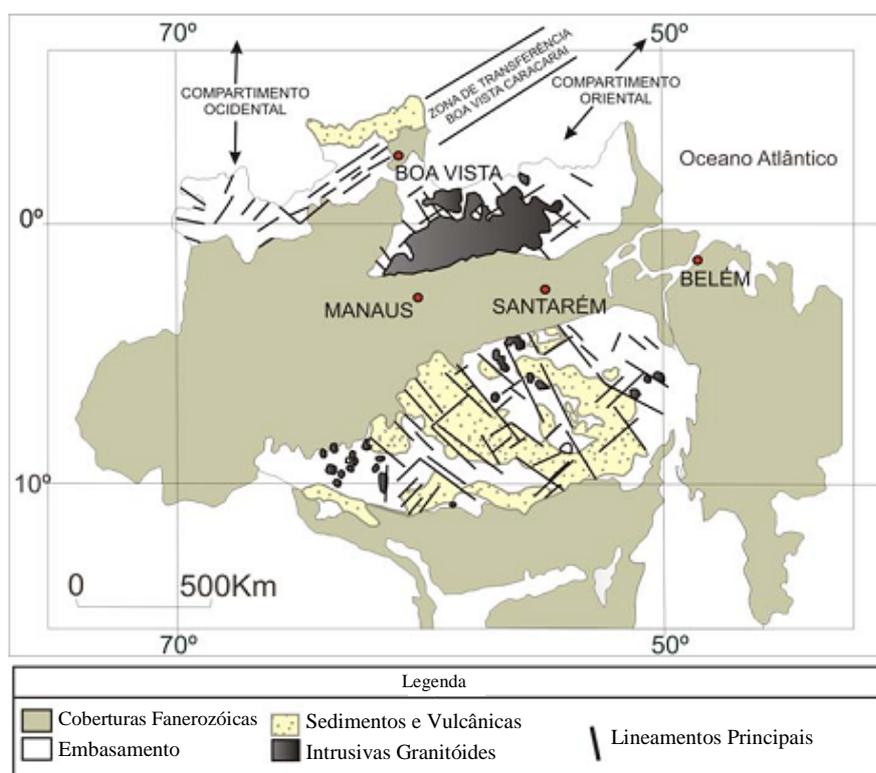


Figura 12 - Unidades Litológicas e feições principais do proterozóico Médio/Superior. As setas indicam as orientações dos eixos de distensão nos dois compartimentos, separados pela Zona de Transferência Boa vista Caracará. Fonte: Costa et al., 1991.

O Compartimento Ocidental abrange a região de Roraima e o vale do Alto Rio Negro, no Amazonas e compreende, segundo os autores, vários feixes de falhas normais de direção E-W, inclinadas preferencialmente para norte e falhas de transferências na direção N-S. O eixo extensional Mesoproterozóico teria atuado na direção N-S. Enquanto, o Compartimento Oriental, corresponde a toda a região posicionada a sudeste desta Zona de Transferência, os feixes de falhas normais teriam direções NW-SE e WNW-ESSE e mergulhos para NE, compondo bacias do tipo hemigrabens. Falhas normais inclinadas para SW definiram, localmente, estruturas simétricas, como Gráben do Cachimbo; as falhas de transferência teriam direção nordeste. O eixo extensional teria atuado na direção NE-SW (Costa et al., 1991).

Observa-se que as direções noroeste, por exemplo, são direções ligadas ao Cinturão Gurupi que é do neoproterozóico da mesma época do Cinturão Araguaia. E que ambas as faixas, mas principalmente a Faixa Gurupi, tem uma importante influencia na estruturação da área, essa última, devido à mesma possuir direção semelhante às falhas transferentes NW-SE que afetam a área, exercendo um forte controle na estruturação das formações.

O Cinturão Gurupi é um orógeno neoproterozóico de direção NNW-SSE desenvolvido na borda sul sudoeste do Cráton São Luís (Almeida et al. 1976, Costa 2000, Klein et al. 2005b), cuja a maioria dos conjuntos litológicos deste Cinturão forma corpos alongados segundo essa direção.

No Cinturão Araguaia as lineações mergulhando para SE, sugerem transporte tectônico para NW e colisão oblíqua com o Cráton Amazônico. De acordo com Costa et al. 1988, Abreu et al. 1994, Fonseca et al 1999, Alvarenga et al. 2000, Gorayeb et al. 2008, este padrão estrutural é modificado ao longo de zonas de cisalhamento transcorrentes NW-SE, dúcteis e frágil dúcteis, que seccionam este Cinturão, e na sua porção sudeste, no limite com o Maciço de Goiás, onde é afetado por zonas de cisalhamento transcorrentes NE-SW do Lineamento Transbrasiliiano (Vasquez & Rosa-Costa, 2008).

3.3.1.2 Quadro Fanerozóico

A paleotectônica fanerozóica aborda a evolução que se estende do Paleozóico ao início do Cenozóico. No Paleozóico, a região Amazônica foi afetada por outro evento extensional, resultando no desenvolvimento das bacias do Solimões e Amazonas (Figura 13).

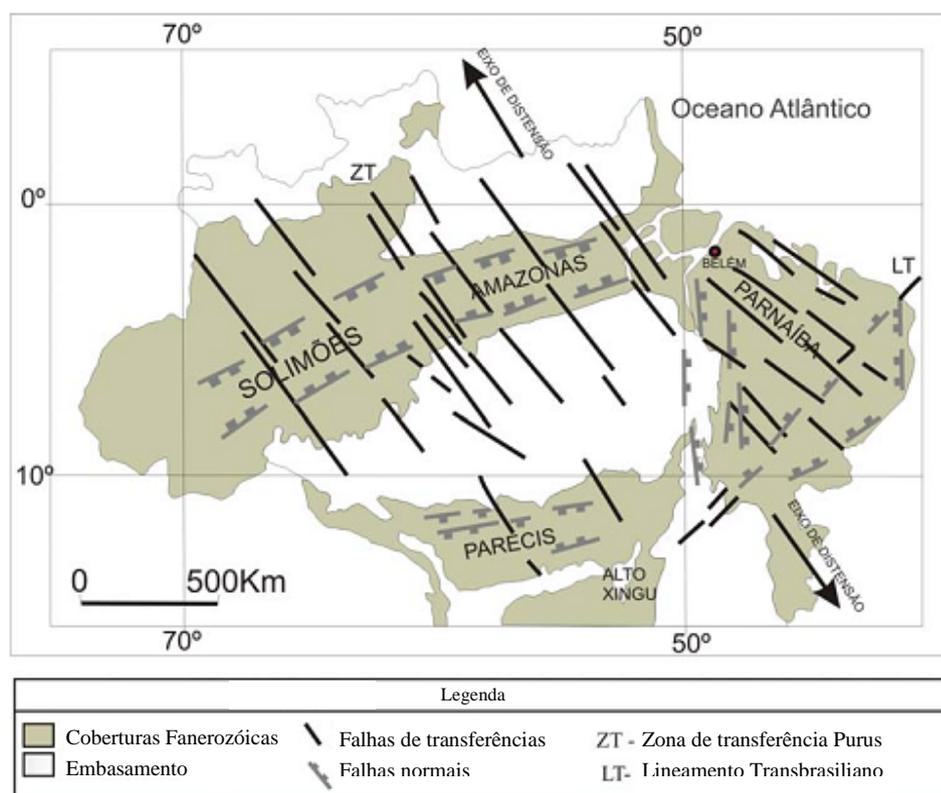


Figura 13 - Quadro tectônico da região Amazônica no Paleozóico. Fonte: Costa & Angélica, 1997.

A tectônica extensional que permitiu o desenvolvimento dessas bacias envolveu um eixo de distensão segundo NW-SE, gerando duas primeiras falhas normais NE-SW. As falhas de transferências estão exemplificadas pelo arco do Purus, que têm orientação NW-SE (Hasui, 1996). As orientações de estruturas do embasamento se reproduzem bem nas falhas dessas bacias, atestando a influência de zonas de fraqueza no seu desenvolvimento.

No Mesozóico ocorre o terceiro evento, que se relaciona com a abertura do Atlântico e a separação dos continentes sul-americano e africano. Foram reativadas as áreas das bacias do Solimões, Amazonas e Parnaíba e, derivadamente ocorreu o desenvolvimento das Bacias de Tacutu no interior, e as do Marajó, Bragança-Vizeu, São Luís e as outras na zona costeira.

De acordo com Costa & Hasui (1991), no Mesozóico a região Amazônica desenvolveu compartimentos cinemáticos distintos (Figura 14).

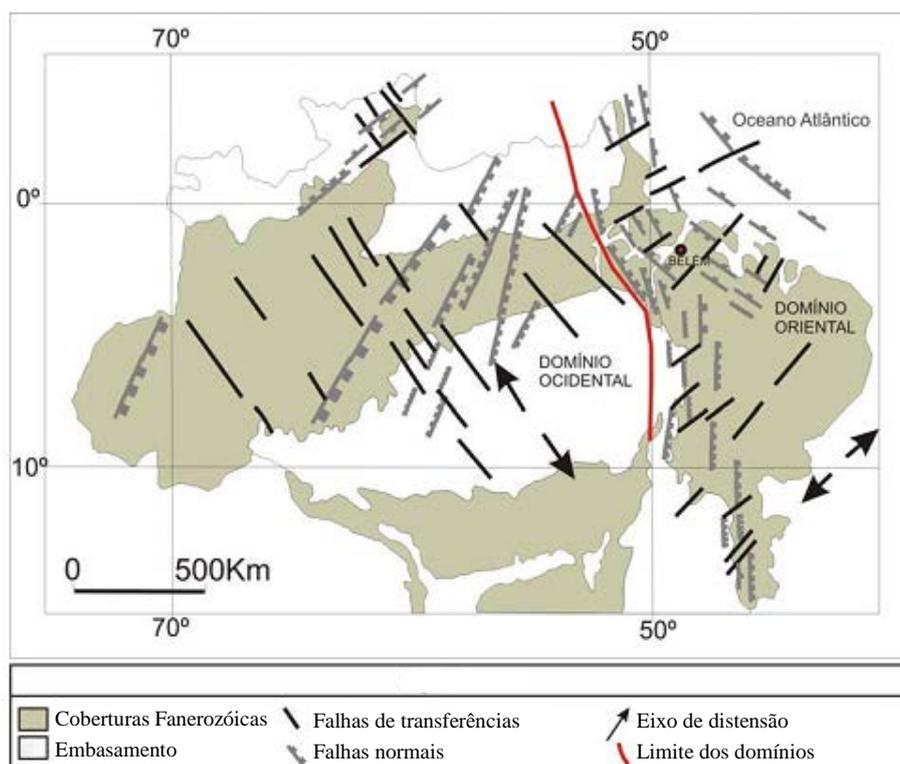


Figura 14 - Quadro tectônico Mesozóico. Fonte: Costa & Angélica, 1997.

3.3.2 Neotectonismo

Hasui (1990) considera como eventos neotectônicos a inclusão de todos os processos que culminaram com a abertura do Atlântico até a situação atual. Segundo o autor aludido, a neotectônica na placa Sul Americana é caracterizada por uma movimentação de leste para oeste, resultando na implantação de um regime tectônico intraplaca com um binário dextral E-W, imposto pela rotação, com componentes transpressivo NW-SE e transtensivo NE-SW.

Em termos de borda de placa, a porção leste da placa Sul Americana (litoral brasileiro) está sofrendo rifteamento. Enquanto, a porção oeste da placa Sul Americana sofre cavalcamento devido ao limite convergente entre a placa Sul Americana e a placa de Nasca. Já em termos de intraplaca no Brasil, o stress desviatório dominante gera falhas reversas na direção NE-SW e falhas normais na direção NW-SE (Bandeira, 2008).

A neotectônica intraplaca no Brasil está caracterizada por um regime transcorrente que sucede ao regime extensional mesozóico. De acordo com Costa et al. (1996) o contexto neotectônico necessário para compreender o quadro geométrico da região Amazônica, mais especificamente no nordeste do Pará onde se insere a área, comporta regionalmente, dois compartimentos (Figura 15). Sendo o primeiro transpressivo, composto pela área entre as cidades de Marabá e Paragominas, se expandido para a região oeste do Maranhão e tem forma de romboedro. Seus feixes de falhas transcorrentes E-W dextrais afetam as sequências

sedimentares da Formação Ipixuna, atribuídos ao Terciário Inferior, no qual a porção interna deste compartimento é caracterizada por dobras de dimensões métricas a quilométricas com feixes orientados na direção $N40^{\circ}-70^{\circ}E$, demonstradas no relevo como serras alinhadas e com altitudes de até 500m, a exemplo da Serra do Tiracambu.

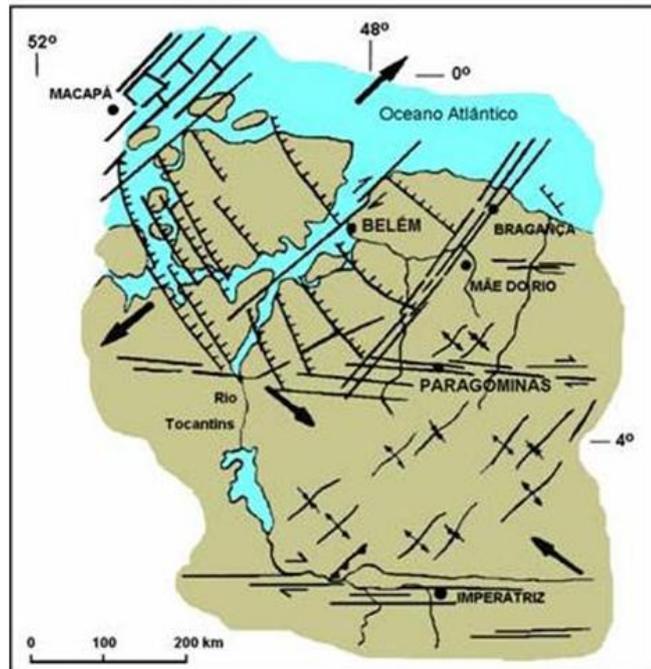


Figura 15 - Quadro estrutural do Terciário Superior (Mioceno-Plioceno). Fonte: Costa et al. 1996.

O segundo compartimento transtensivo é ocupado pela ilha do Marajó e o extremo nordeste do Pará, entre o município de Ipixuna e o litoral e refere-se à bacia que alojou os sedimentos das formações Pirabas e Barreiras. Neste compartimento, as falhas mestras normais que dominam a instalação das sequências sedimentares se orientam principalmente na direção NW-SE e mergulham para NE. Essa bacia é uma estrutura de afastamento, onde o limite sul corresponde ao feixe de falhas transcorrentes E-W que passa pela região de Paragominas, e a oeste de Belém e da ilha do Marajó (Figura 16) e que controlam a distribuição das sequências sedimentares na direção NW-SE.

O nordeste do Estado do Pará no período Quaternário (Figura 17) é mais caracterizado por falhas normais com direção NW-SE, correspondentes a transtensão vinculada à atuação de sistemas transcorrentes dextrais.

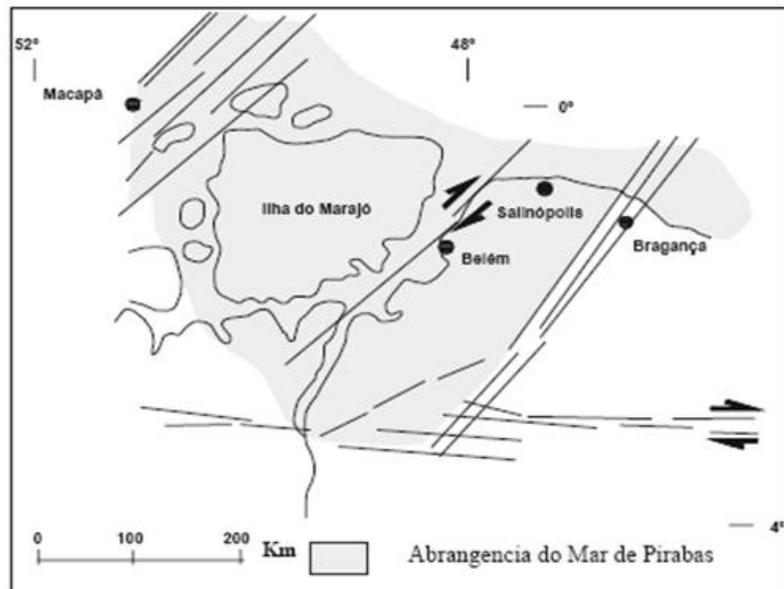


Figura 16 - Abrangência do Mar de Pirabas na região nordeste do estado do Pará, e as prováveis estruturas que controlam a deposição dessa unidade litoestratigráfica. Fonte: Costa et al., 1996.

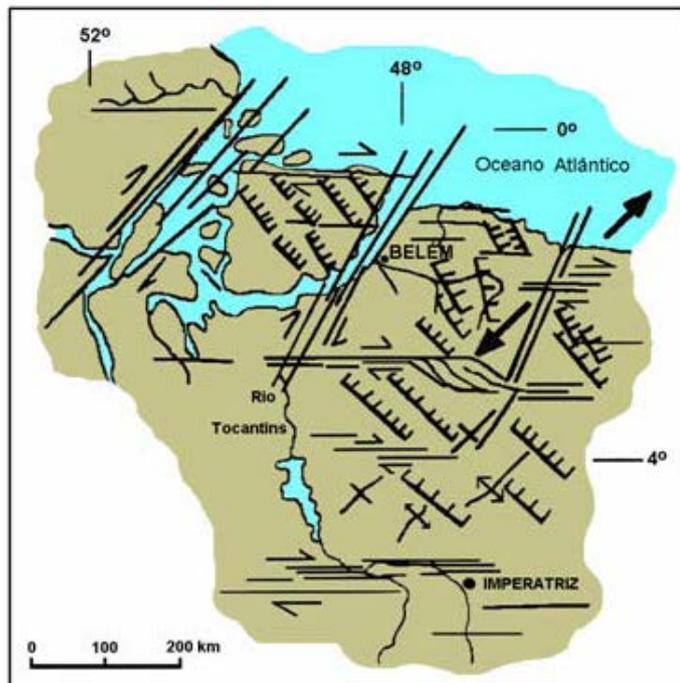


Figura 17 - Quadro estrutural do quaternário (Pleistoceno Médio-Holoceno). Fonte: Costa et al., 1996.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ANÁLISE ESTRUTURAL DA REDE DE DRENAGEM

A atuação da Neotectônica é demonstrada através da análise e sistematização de características importantes do relevo na área, associada à ocorrência de anomalias de drenagem a exemplo de cursos deslocados lateralmente, assimetria, etc. (Costa, 2004).

Ao analisar a área mais regionalmente na porção leste observa-se que a configuração do padrão de drenagem é subdendrítico, com sinuosidade retilínea e angularidade média a alta quando comparada aos tributários de menor ordem (Figura 18).

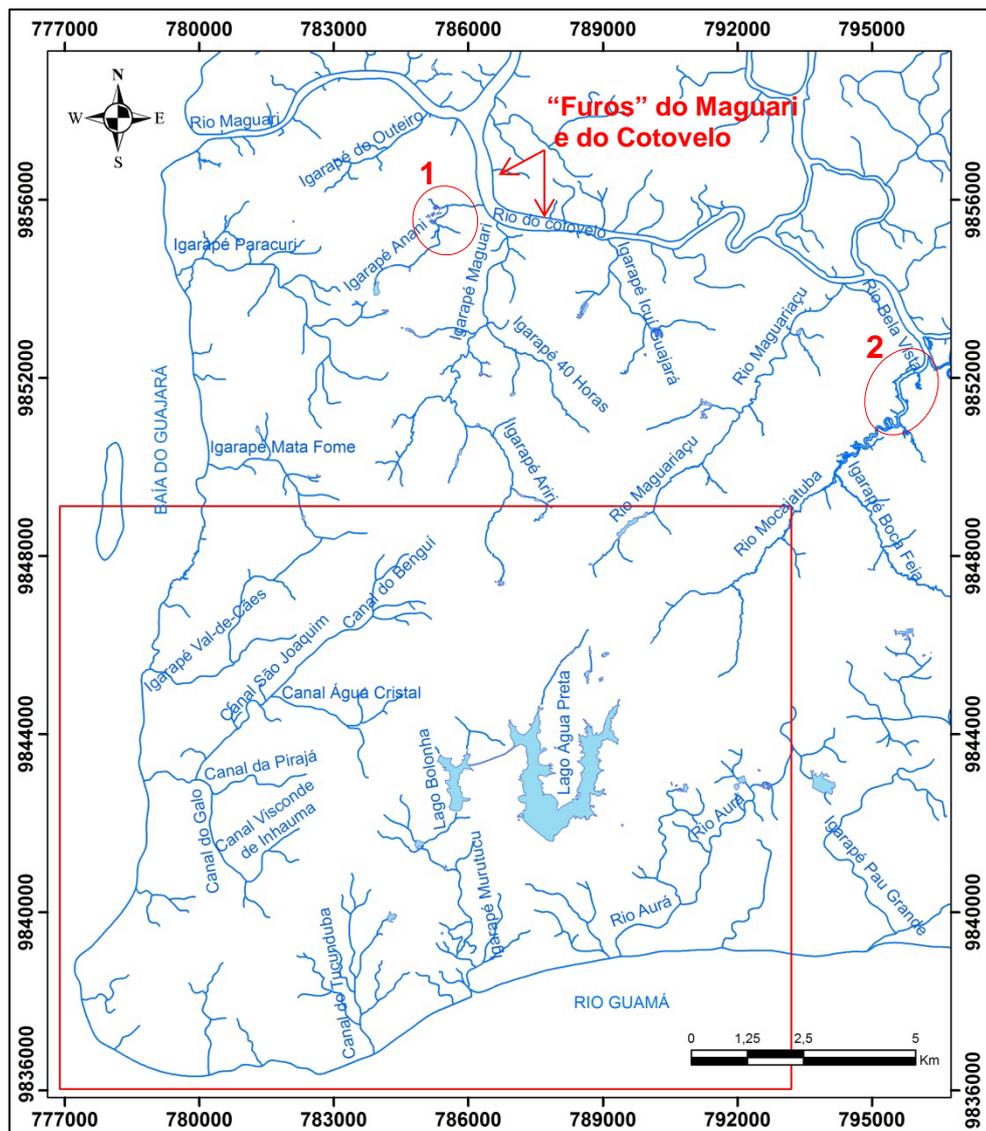


Figura 18 - Sinuosidade retilínea e canais abertos, nas proximidades dos principais rios que influenciam a área - Maguari, Maguariçu, Mocajutuba e “furos” – Maguari e Cotovelo. Detalhe para as feições e/ou anomalias 1 e 2 em “Z” e “S”, respectivamente. Fonte: Do autor.

Com base na análise da drenagem é possível perceber as lineações e alinhamentos dos canais, variação do tipo de padrão de drenagem, presença de anomalias, ou seja, passagem de um canal retilíneo para meandrante, ou de meandrante para entrelaçado ou vice-versa. Desta forma, a interpretação permite apresentar uma definição da geometria dos blocos estruturais nos quais a área se compartimenta, assim como esboçar um quadro cinemático na perspectiva de ajustar as estruturas presentes, juntas e falhas às tensões regionais responsáveis pelo desenvolvimento das mesmas (Bezerra, 2003).

A partir da observação dos segmentos retilíneos de drenagem foi elaborado um mapa de lineamentos de drenagem (Figuras 19) e rosácea para a área de estudo. Os lineamentos de drenagem são estruturas importantes, uma vez que, provavelmente, correspondem a traços de estruturas neotectônicas. E estes identificam zonas de fraqueza das rochas, o que aumenta a vulnerabilidade das mesmas à erosão.

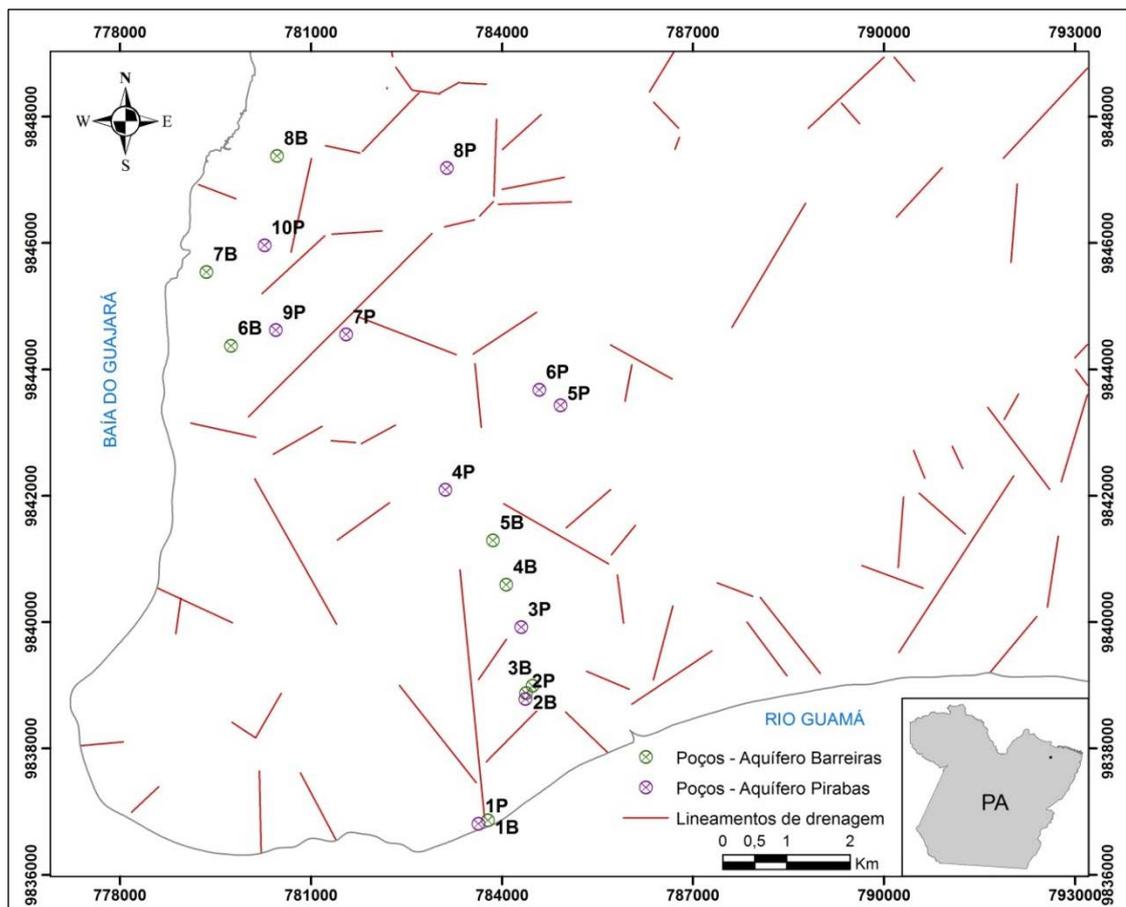


Figura 19 – Mapa de lineamentos de drenagem da área de estudo. Fonte: Do autor.

O tratamento das medidas de lineação de drenagem mostrou os alinhamentos com orientação de direções no geral para: NE-SW, NNE-SSW, WNW-ESE, NNW-SSE, E-W e NW-SE (Figura 20).

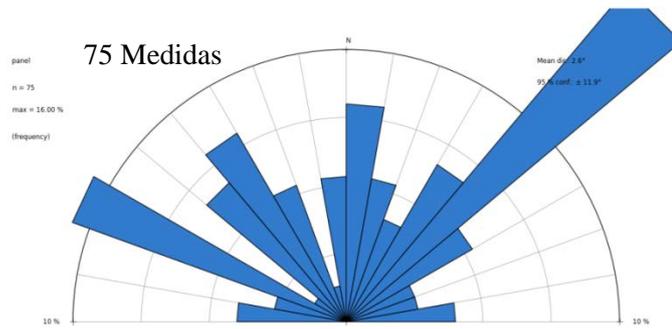


Figura 20 - Rosácea composta por todos os lineamentos de drenagens da área. Fonte: Do autor.

A área pesquisada possui um padrão de drenagem dendrítica nas regiões sedimentares e deságua tanto na baía do Guajará a oeste e norte, como no rio Guamá ao sul. Apresentando também uma densidade alta, sinuosidade mista e retilínea, angularidade alta, tropia bidirecional com direções preferenciais NE-SW e NW-SE, assimetria forte e formas anômalas em arco e cotovelo (Figura 21).

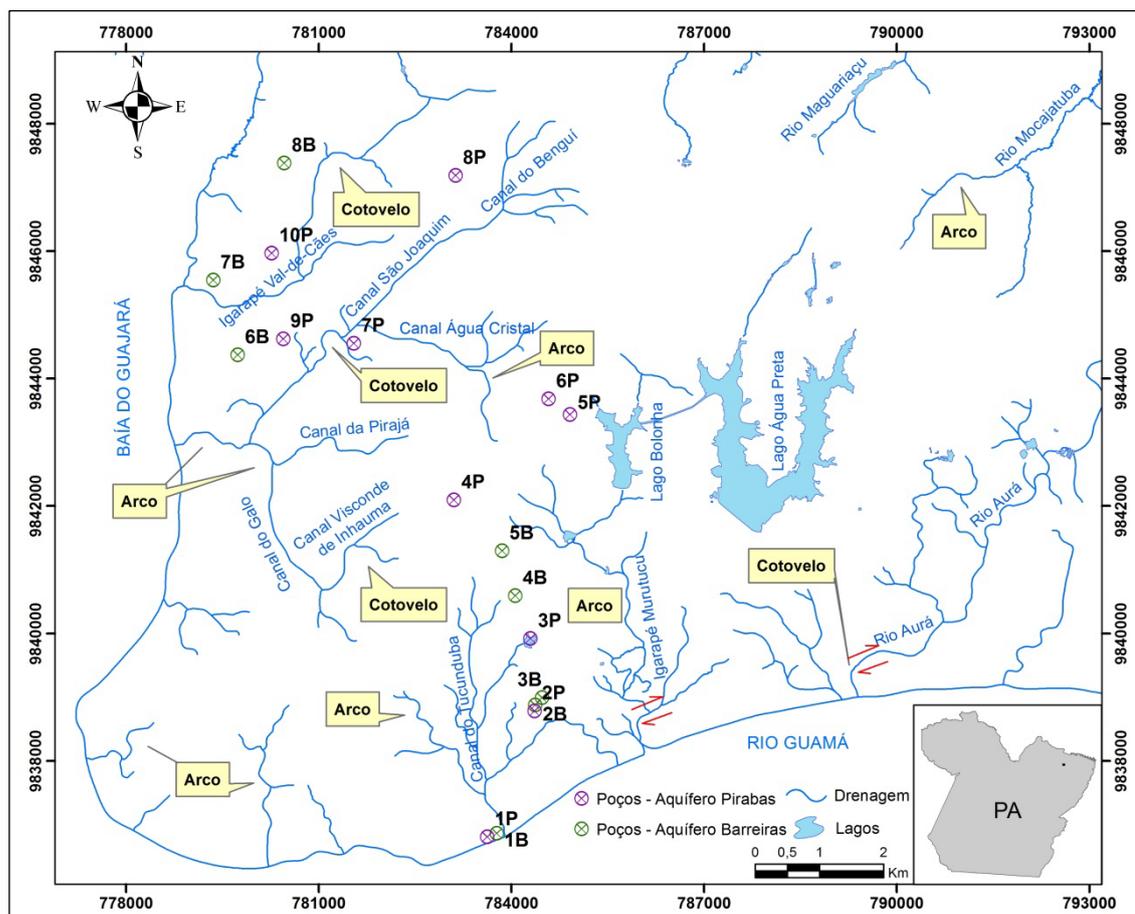


Figura 21 – Mapa de drenagem da área de estudo, com algumas formas anômalas de drenagem do tipo arco e cotovelo. Detalhe para a anomalia cotovelo com indicação de movimentação dextral formada pelo Rio Aurá. Fonte: Do autor.

Essas anomalias são bons indicadores cinemáticos na medida em que se a curvatura for para esquerda à movimentação é sinistral, e para a direita, dextral, como mostrado na figura 21 para o Rio Guamá ou nas proximidades do mesmo. Ou seja, localmente este rio e seus tributários apresentam trechos fortemente controlados, com indicadores de movimentação dextral, que pode ser o responsável pelas formações dos lagos (a exemplo dos lagos Bolonha e Água Preta) nessa rede de drenagem que também estariam associados a falhas transcorrentes (Costa, 2004).

Portanto, é possível observar que alguns rios e seus tributários, a exemplo dos igarapés Val-de-cães, Visconde de Inhauma e Galo apresentam deslocamento de lineamento de drenagem, associado à presença dessas anomalias (arco e cotovelo) indicando um importante controle estrutural (Figura 21).

Para uma análise mais detalhada foi confeccionado um mapa a partir da figura 19 com as principais direções de lineamentos de drenagem (Figura 22) e rosácea. Ou seja, com a maior frequência de direção destes lineamentos (Tabela 4).

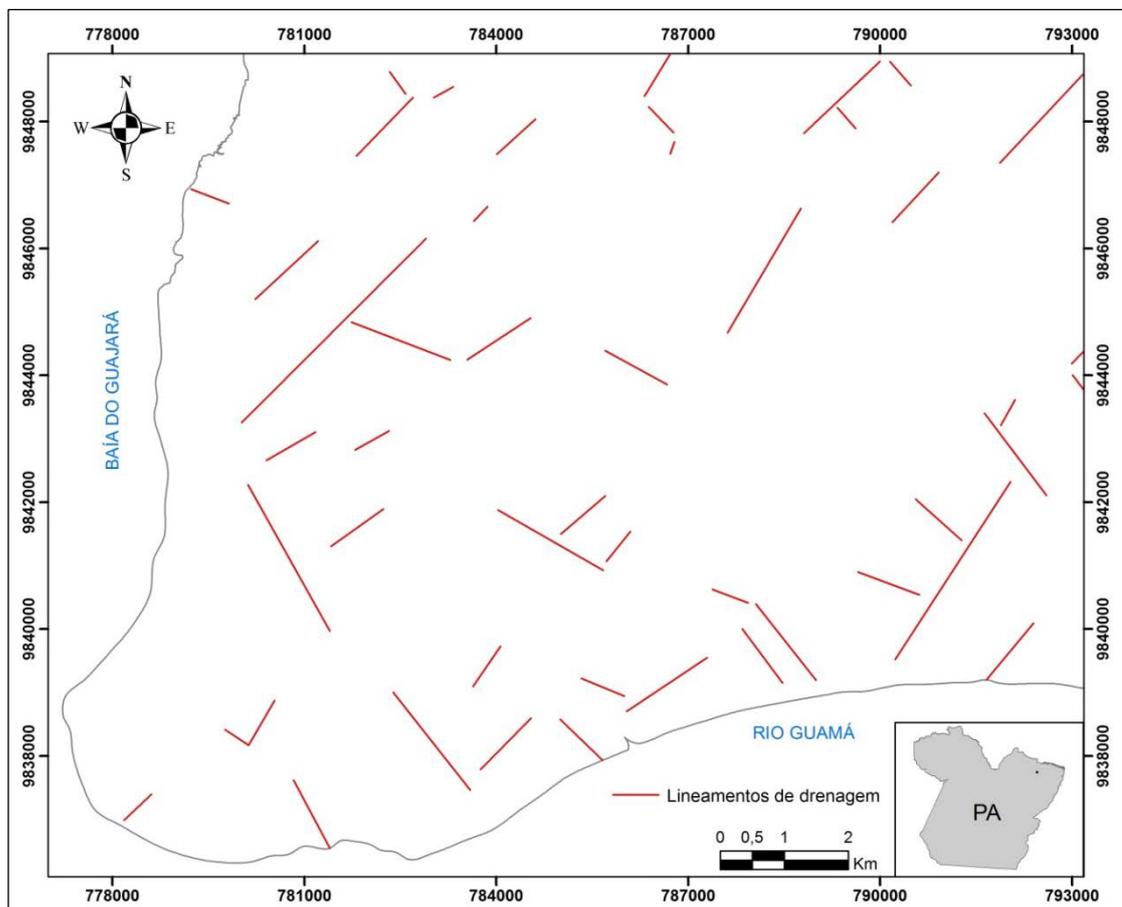


Figura 22 – Mapa com as principais direções de lineamentos de drenagem da área de estudo.
Fonte: Do autor.

Estes lineamentos representam a orientação dos principais escoamentos de drenagem da área sendo, a direção NE-SW uma dominante, representada pelos igarapés Val-de-Cães, São Joaquim, Rios Maguariaçu, Mocajatuba e Aurá. No qual, estes lineamentos possuem a mesma direção das falhas transcorrentes regionais apontado por Costa et. al (1996) e podem representar pequenas reativações destas falhas durante o Quaternário.

Tabela 4 - Principais direções de lineamentos de drenagem da área.

Trends de lineação de drenagem (Azimute)			
223	61	300	312
45	144	322	291
210	152	111	209
234	30	43	139
60	304	44	139
61	223	322	200
111	227	111	136
47	211	144	33
44	151	34	119
48	56	143	39
56	134	223	113
227	229	40	323

Conforme o tratamento das principais medidas de lineação de drenagem da tabela 4 extraídos segundo a figura 22, os alinhamentos apresentam orientação de direções principais: N40°-50°E, N60°-70°W, N30°-40°W, N30°-40°E e N40°-50°W. E como direções secundárias: N50°-60°E, N20°-30°E, N20°-30°W e N60°-70°E (Figura 23).

As direções N30°-40°E e N40°-50°E representam como já citado anteriormente, porém especificamente, as direções dominantes das principais drenagens da área que cortam a RMB, a exemplo do igarapé São Joaquim e rios Maguariaçu, Mocajatuba e Aurá (Figura 23), semelhante também regionalmente, a direção do rio Pará e da Baía do Marajó como Costa (2004) verificou em seu estudo.

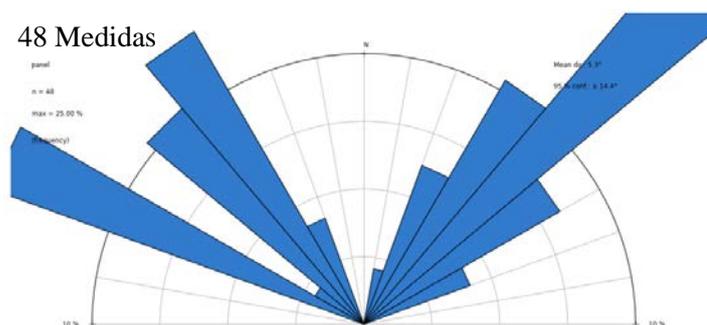


Figura 23 - Rosácea das principais medidas de lineamentos de drenagens da área. Fonte: Do autor.

Posterior a esses produtos gerados, também foi possível sugerir o sentido de movimentação ao longo dos lineamentos de drenagem, que indicam falhas e /ou fraturas na área, servindo de base para a interpretação e construção do mapa de blocos tectônicos que será apresentado mais a frente.

Neste mapa se observa uma predominância de densidade de estruturas com direção NE-SW, concordante com os principais lineamentos de drenagem identificados (Figura 24), sendo esse sentido de movimentação semelhante ao modelo proposto por Igreja (1990), na qual as falhas normais NE-SW são interceptadas pelas falhas de transferência NW-SE, indicativos de movimentação dextral do sistema.

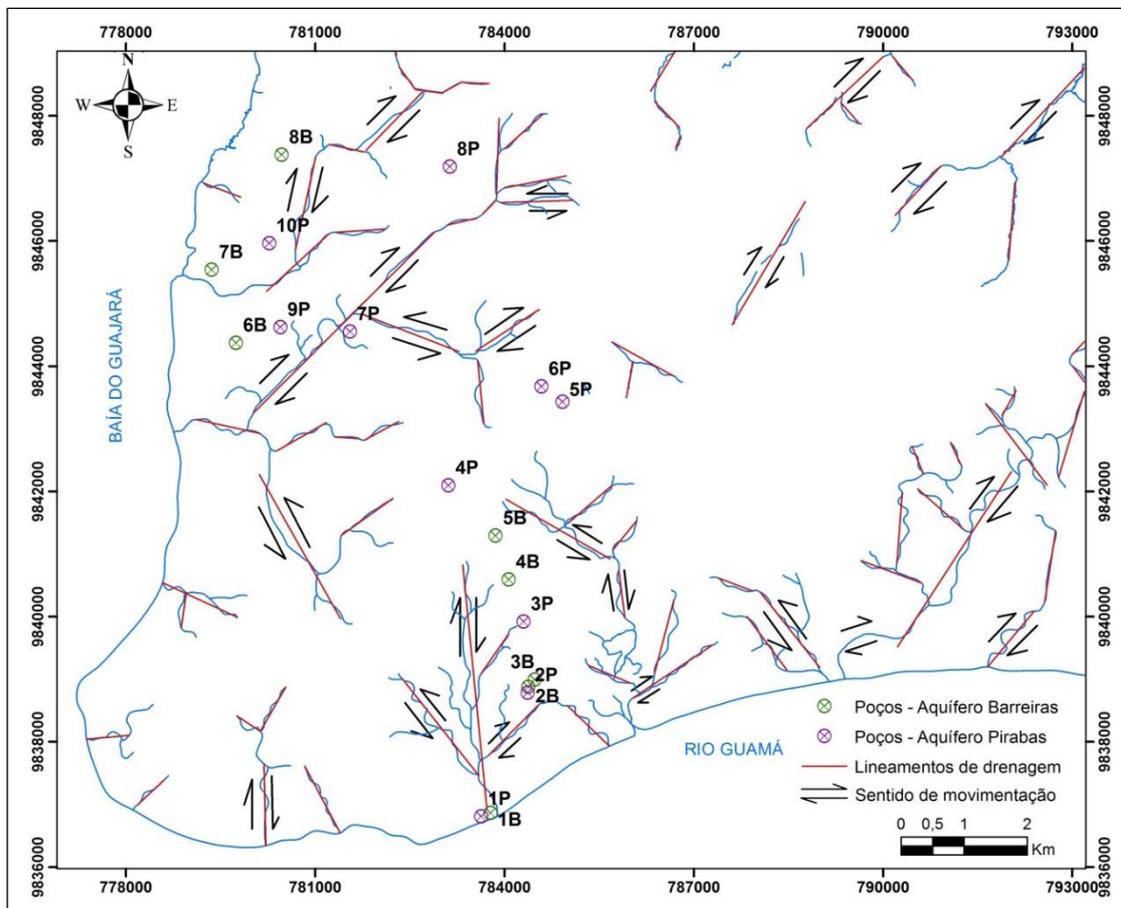


Figura 24 - Mapa de movimentação dos lineamentos de drenagem na área de estudo. Fonte: Do autor.

4.2 ANÁLISE ESTRUTURAL DO RELEVO

A área de estudo está inserida na unidade morfoestrutural dos “baixos platôs amazônicos e das planícies litorâneas”. São característicos dessa unidade os relevos tabulares, com altitudes que alcançam até 60 metros de altitude, recortados por alguns rios destacados como, por exemplo, o Guamá e o Pará.

Na composição do relevo da área tem destaque a Formação Barreiras e suas coberturas lateríticas que sustentam os terrenos de cotas mais altas, bem como áreas com cotas menores nas quais predominam depósitos argilo-arenosos, arenosos e conglomeráticos com lentes de arenito ferruginosos, areno-argilosos e quartzosos.

As planícies fluviais formam áreas aplainadas ao longo das margens dos rios, constituindo o sistema de relevos de agradação da área.

Foi elaborado um mapa no qual se separaram unidades morfológicas e sobre esse mapa foram construídas duas seções morfoestruturais bem como, frações dos lineamentos do relevo (Figuras 25, 26, 27, 28 e 29).

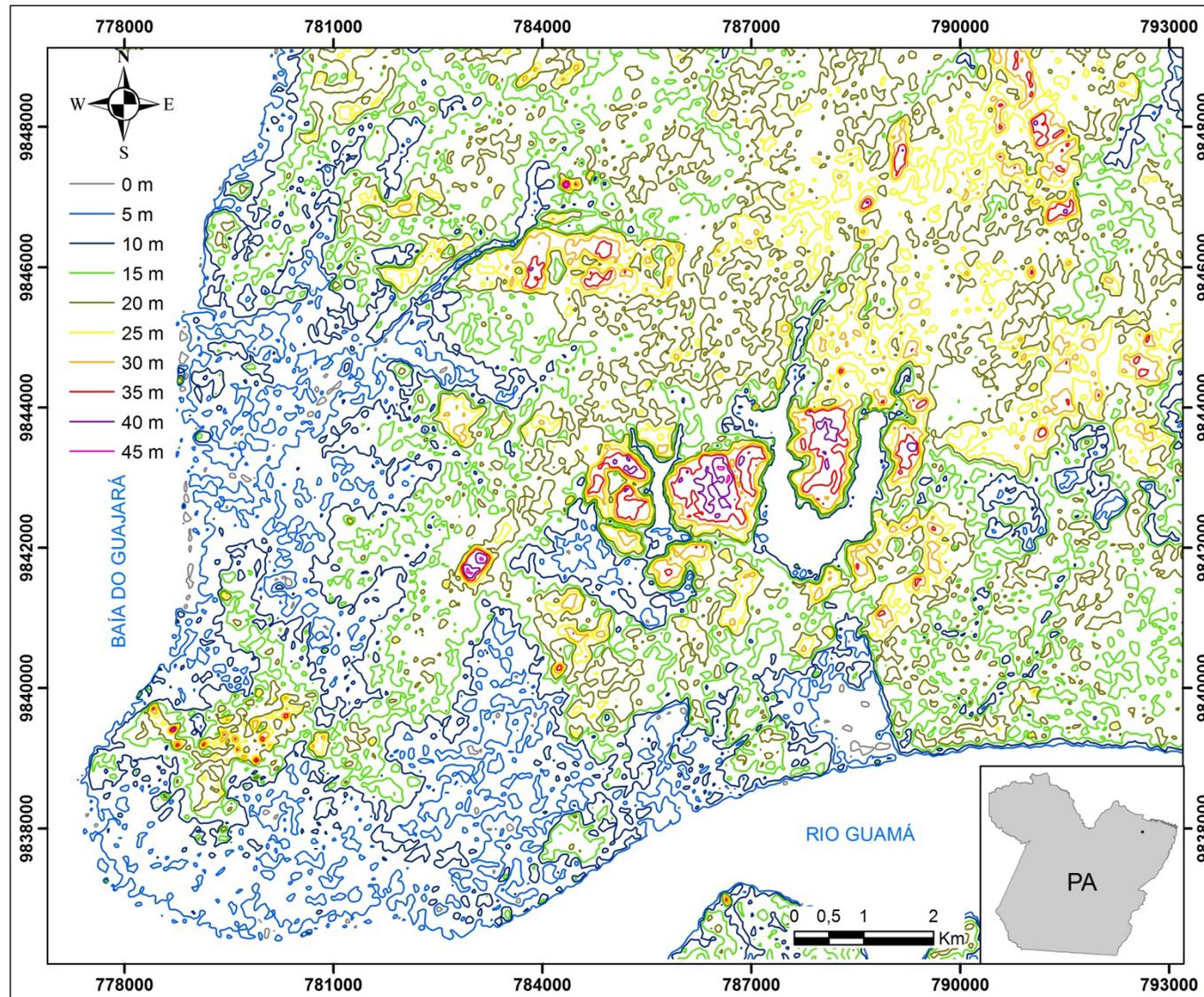


Figura 25 - Mapa topográfico da área definido a partir de imagem SRTM, com curvas altimétricas no intervalo de 5m. Fonte: Do autor.

A área de estudo é regionalmente compartimentada em três unidades morfológicas principais: planícies fluviais, caracterizada por sistema de relevo de agradação e, colinas pediplanizadas e colinas de topos aplainados, por sistema de relevo de degradação.

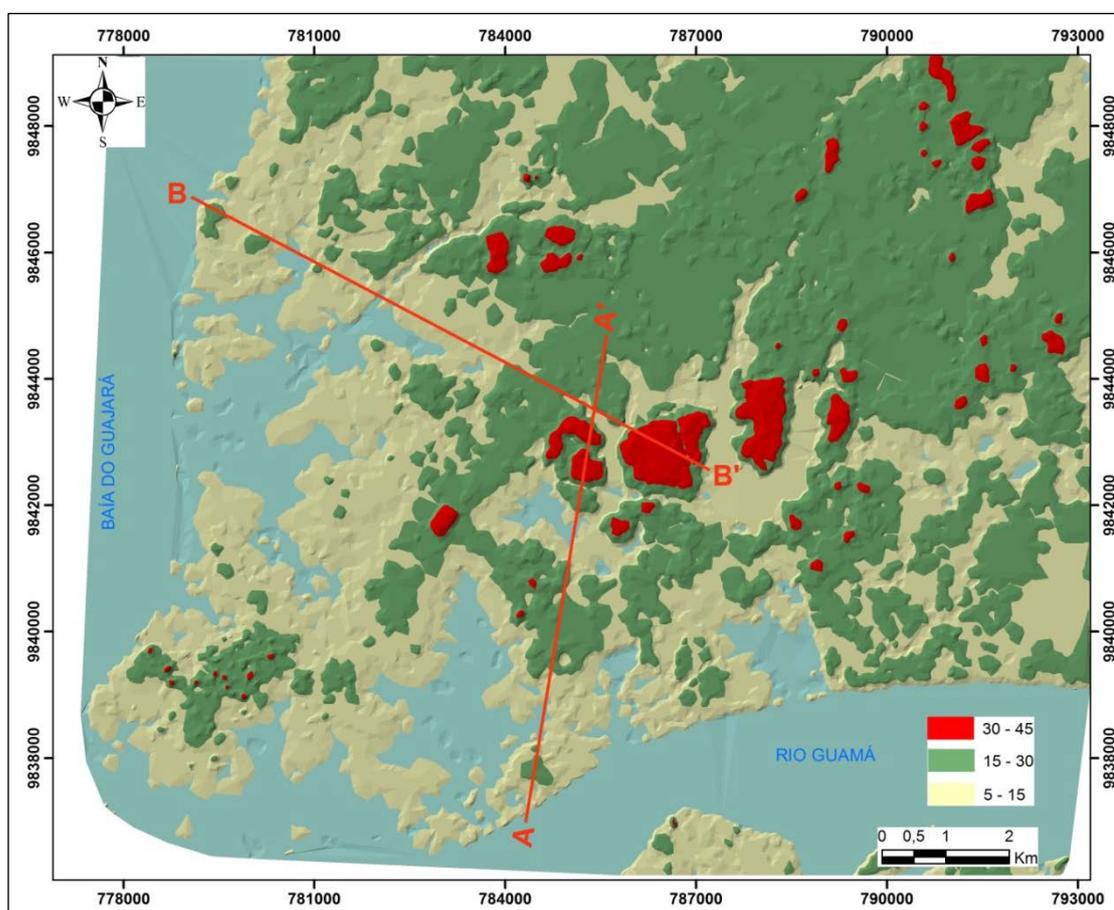


Figura 26 – Mapa das unidades morfológicas de relevo para a área definida a partir de imagem SRTM com as seções morfoestruturais A-A' e B-B'. Sendo as cotas 5-15 m Planícies fluviais, 15-30 m Colinas pediplanizadas e 30-45 m Colinas de topo aplainados. Fonte: Do autor.

- Planícies fluviais: ocorrem em praticamente toda a área, e nelas predominam os processos de deposição sobre os de erosão, uma vez que essas planícies são formadas pela deposição de material aluvial erodido das áreas mais elevadas e depositadas nas margens e nos canais dos rios. Nas seções realizadas nas cotas em torno de 15 metros ocorre a quebra de relevo, a qual limita esta unidade. De acordo com a orientação das seções abaixo (Figuras 27 e 28) essas quebras apresentam direção NE-SW e NW-SE, direção análoga as principais direções de lineamentos, definidas na análise de lineamentos da área, assim como Costa (2004) definiu em seu trabalho.
- Colinas pediplanizadas: localiza-se mais na porção norte e nordeste da área, na qual ocorre ondulado com cotas variando de 15 a 30 metros.

▪ Colinas de topos aplainados: recobre mais a porção central da área, sendo caracterizada por relevos aplainados com suaves ondulações. Elas representam as porções mais elevada da área.

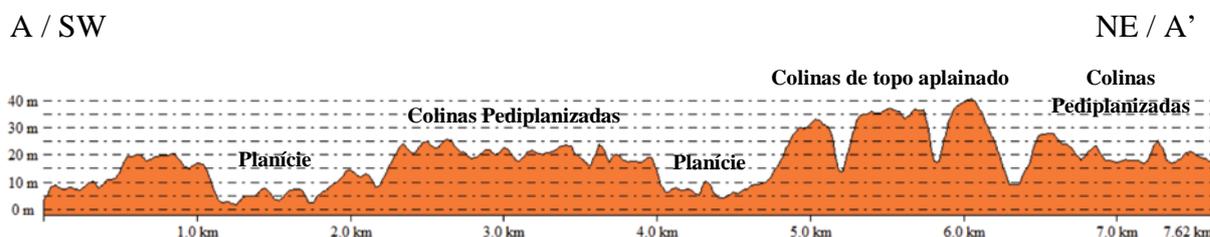


Figura 27 - Perfil mostrando a morfologia das planícies fluviais e colinas. Fonte: Do autor.

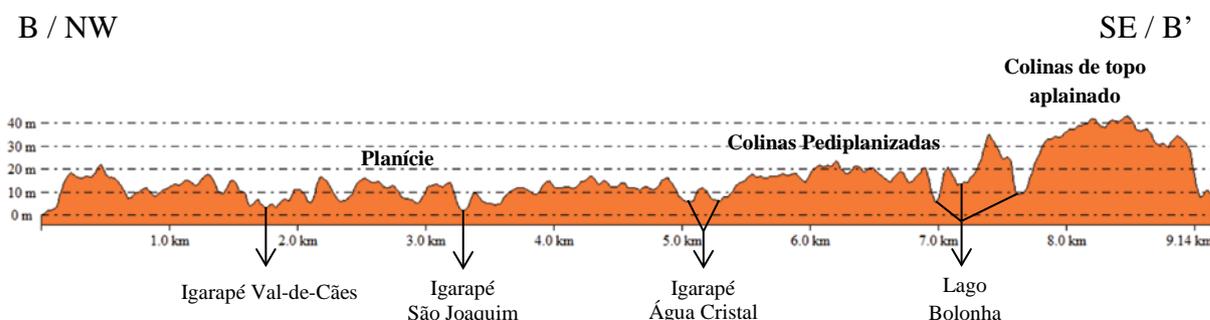


Figura 28 - Perfil mostrando a passagem do relevo de planícies fluviais para o de colinas pediplanizadas e de topo aplainado. Fonte: Do autor.

Os elementos fundamentais na análise do relevo para interpretação geológica são as rupturas de declive. A disposição regular das rupturas de declive constitui estruturas de relevo conhecidas como quebras negativas ou quebras positivas ou, ainda, lineações e alinhamentos de relevo conforme Soares & Fiori (1976). Sendo, portanto aplicado estes elementos estruturais de relevo para a área analisada.

A elaboração do mapa de relevo se deu a partir do tratamento do Modelo Digital de Elevação – MDE, onde foi realizada a extração das cotas altimétricas para a área com auxílio do *software Global Mapper 15*, para posterior traçado desses lineamentos, sendo utilizado também a imagem de relevo sombreado (30 m) da Folha Belém – CPRM.

Posteriormente, a observação dos segmentos retilíneos de relevo possibilitou a confecção do mapa de lineamentos de relevo e rosáceas para a área, visando indicar as principais direções de traços estruturais que contribuem para a configuração do quadro neotectônico da área (Figura 29).

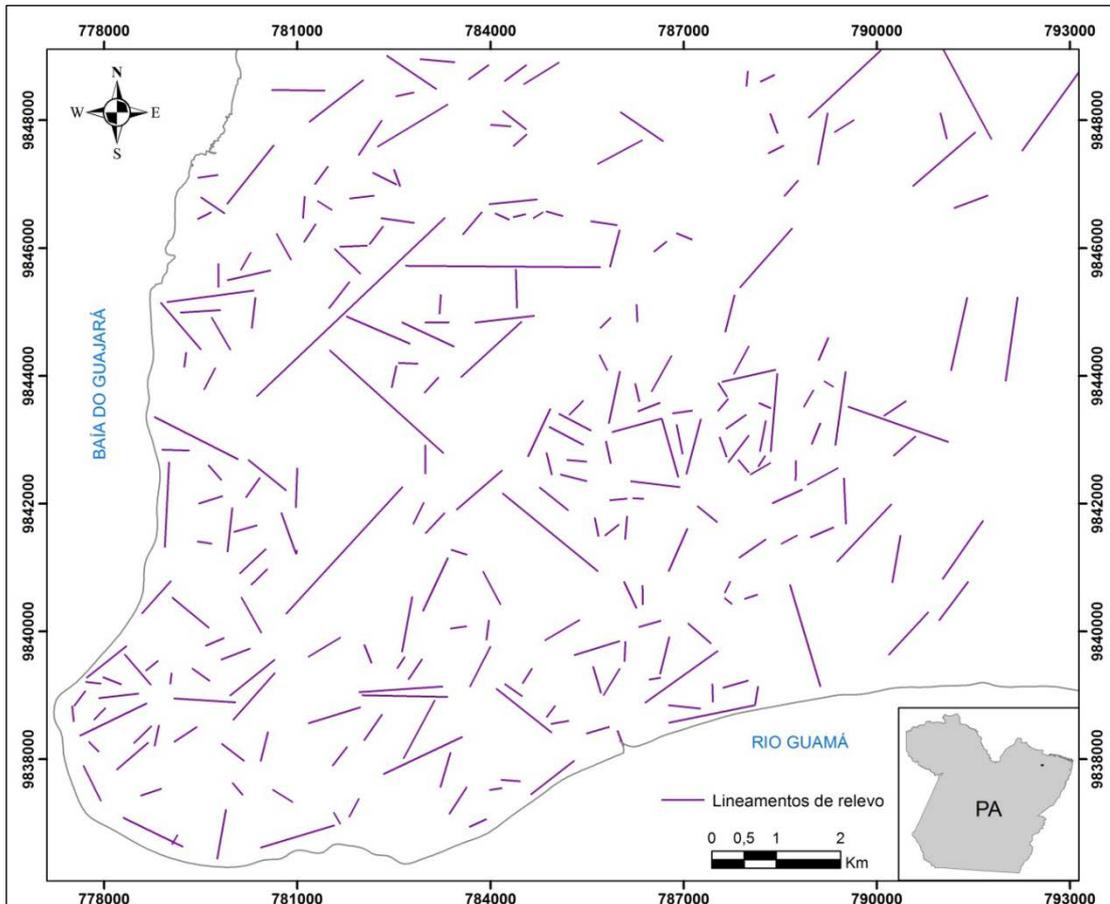


Figura 29 – Mapa de lineamentos de relevo da área de estudo. Fonte: Do autor.

As medidas de lineação de relevo foram plotadas na rosácea da figura 30. É possível observar que as lineações possuem no geral orientação com direção: NE-SW, NW-SE, E-W e N-S. Sendo algumas dessas, consoantes com as direções dos alinhamentos de drenagem.

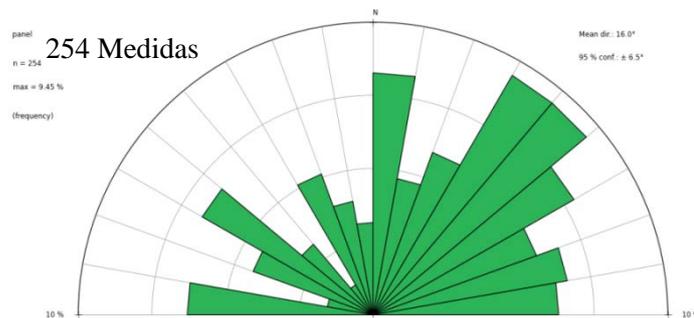


Figura 30 - Rosácea composta por todas as medidas de lineamentos de relevo na área. Fonte: Do autor.

Assim, como na análise de drenagem também foi elaborado um mapa para as principais direções de lineamentos de relevo (Figura 31) tal como a rosácea, correspondente a essas direções com maior frequência (Tabela 5).

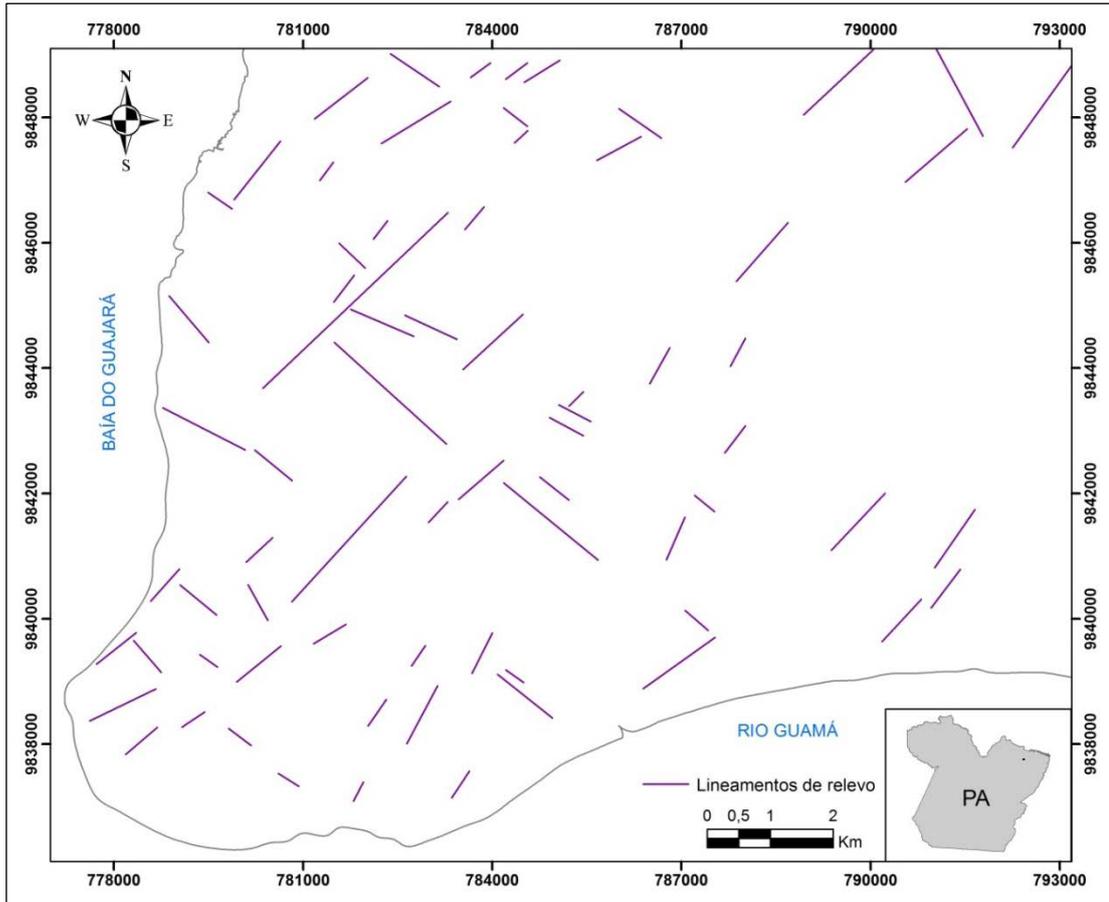


Figura 31 – Mapa com as principais direções de lineamentos de relevo da área de estudo.
Fonte: Do autor.

Tabela 5 - Principais direções de lineamentos de relevo da área.

Trends de lineação de relevo (Azimute)				
46	213	239	203	113
47	207	232	215	151
221	208	238	43	128
36	215	208	126	129
223	214	229	227	217
217	239	118	208	140
131	309	118	225	124
139	217	129	129	128
236	117	209	125	48
222	295	223	132	62
129	314	234	218	129
222	37	51	234	220
64	36	231	233	227
229	125	152	124	229
122				

O tratamento das principais medidas de lineação de relevo mostrou direções principais: N30°-40°E, N40°-50°E, N50°-60°W, N50°-60°E e N20°-30°E, e direções secundárias: N40°-50°W e N60°-70°W (Figura 32), sendo às direções N30°-40°E e N40°-50°E similares as direções dominantes das principais drenagens que foram analisadas.

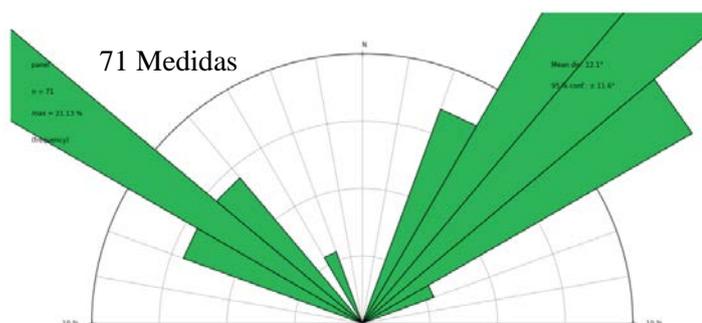


Figura 32 - Rosácea das principais medidas de lineamentos de relevo na área. Fonte: Do autor.

4.3 CORRELAÇÃO ENTRE ANÁLISE ESTRUTURAL DA DRENAGEM E DO RELEVO

A composição dessa análise da drenagem e do relevo da área permitiu gerar um mapa de fusão das principais direções dos lineamentos (Figura 33). No qual, se observa que as falhas, representadas por esses lineamentos possuem direções NE-SW e NW-SE, correspondente às direções preferências descrita por Costa (2004), Palheta (2008) e Bandeira (2008) em seus estudos da neotectônica na RMB, Ilha de Mosqueiro e região de Castanhal, respectivamente.

É possível verificar também, que essas direções, são similares às direções das sub-bacias de drenagem presentes na área, tais como: Val-de-Cães, Una, Aurá, Maguariaçu e Mocajatuba.

Os indicadores de movimentação estabelecidos para a área, tais como: assimetria da drenagem (indicativos de movimentação vertical) e variação no padrão de drenagem, onde trechos retilíneos se transformam em sinuosos com brusca mudança de orientação, indicando possivelmente uma falha ou um bloco abatido, estão relacionados aos aspectos cinemáticos que influencia a área.

Essa análise e integração das informações dos aspectos geométricos e cinemáticos da drenagem e do relevo permite associar esses elementos a um controle tectônico, que em geral esta relacionado a modelos de deformações (Bandeira et al., 2012).

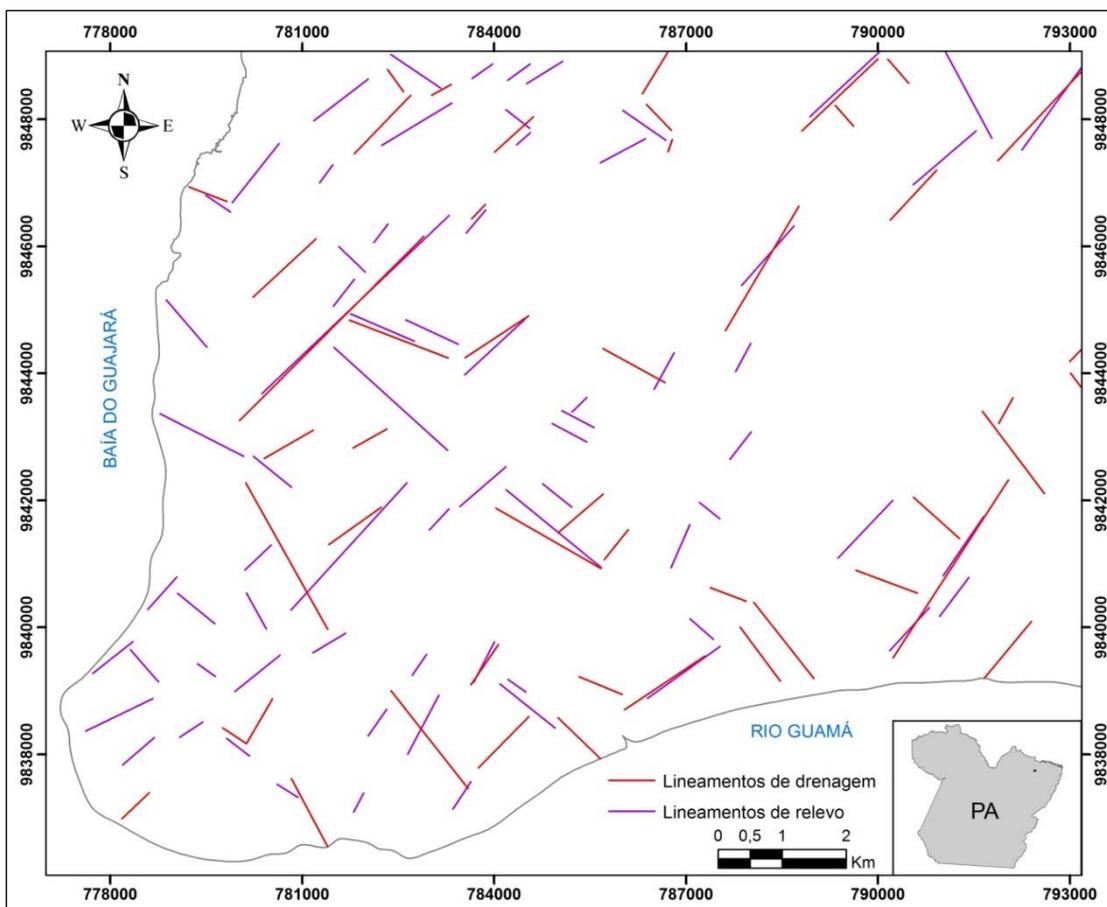


Figura 33 - Mapa de fusão das principais direções de lineamentos identificados na área de estudo. Fonte: Do autor.

4.4 DOMÍNIOS MORFOESTRUTURAIS

Com base na análise integrada dos padrões de drenagem e relevo, da orientação dos lineamentos estruturais levantados, associados ao mapa de relevo sombreado a área foi compartimentada em domínios morfoestruturais. Considerando-se o trabalho realizado por Costa (2004) na RMB essa análise, também foi individualizada e interpretada em setores de blocos tectônicos distintos, primeiramente de forma regional conforme a Figura 18, obtendo-se posteriormente a área com os blocos definidos na Figura 34, observando esse controle estrutural responsável pelo desnivelamento entre os blocos, estabelecendo seus baixos, intermediários e altos estruturais.

Segundo Palheta (2008), o produto gerado por meio dessa análise integrada pode caracterizar as zonas anômalas morfoestruturais, estruturalmente positivas e negativas, correspondendo respectivamente a horsts e grábens, além das maiores discontinuidades estruturais em subsuperfície.

Da figura 34 foram extraídos dois perfis A-A' e B-B', os quais ressaltam este arranjo em blocos morfoestruturais com seus limites, as estruturas em “horts” e “grábens” e o sentido das prováveis movimentações entre os mesmos na Figura 35, onde na seção A-A' percebe-se o abatimento de blocos no sentido SW, enquanto no perfil B-B' este ocorre no sentido SE.

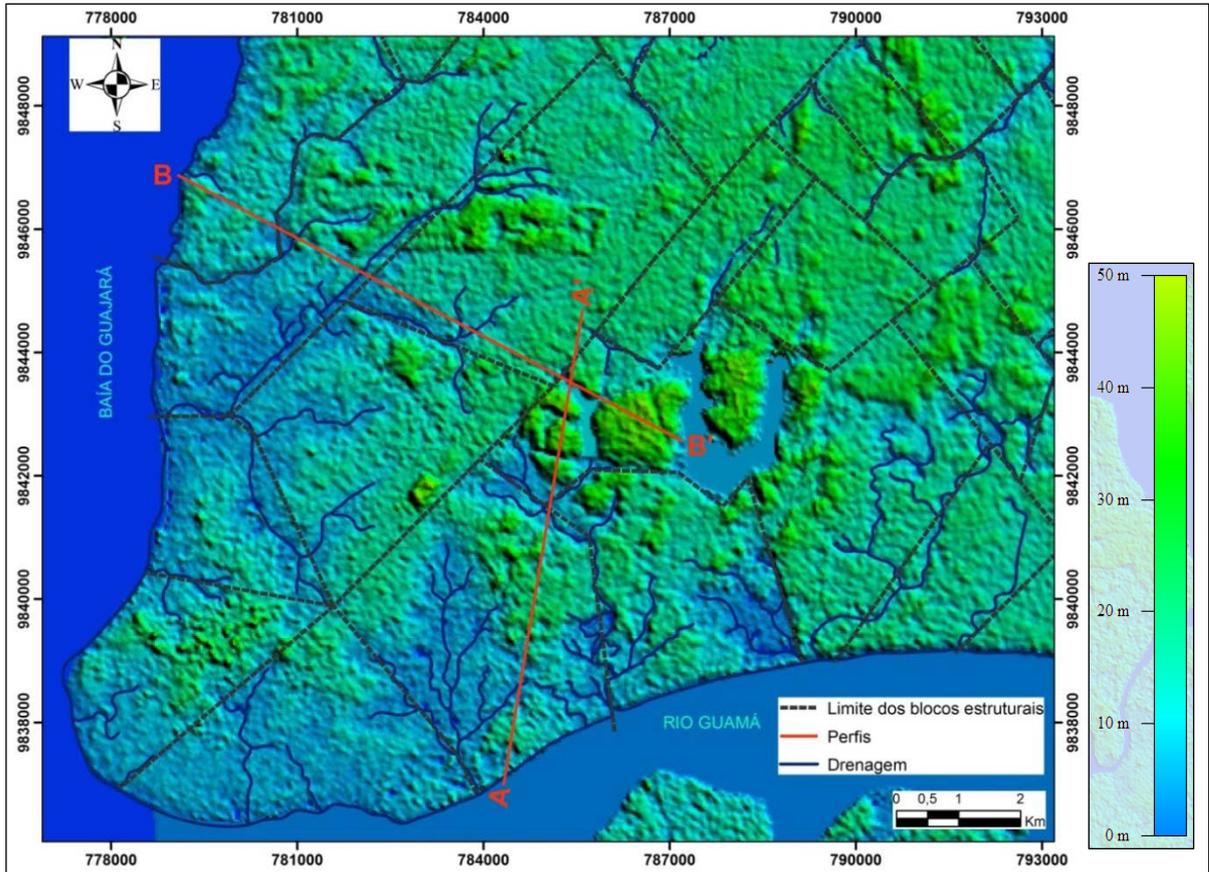


Figura 34 - Compartimentação morfoestrutural da área de estudo em blocos desnivelados, mostrando seus baixos, intermediários e altos estruturais e as seções morfoestruturais A-A' e B-B'. Fonte: Do autor.

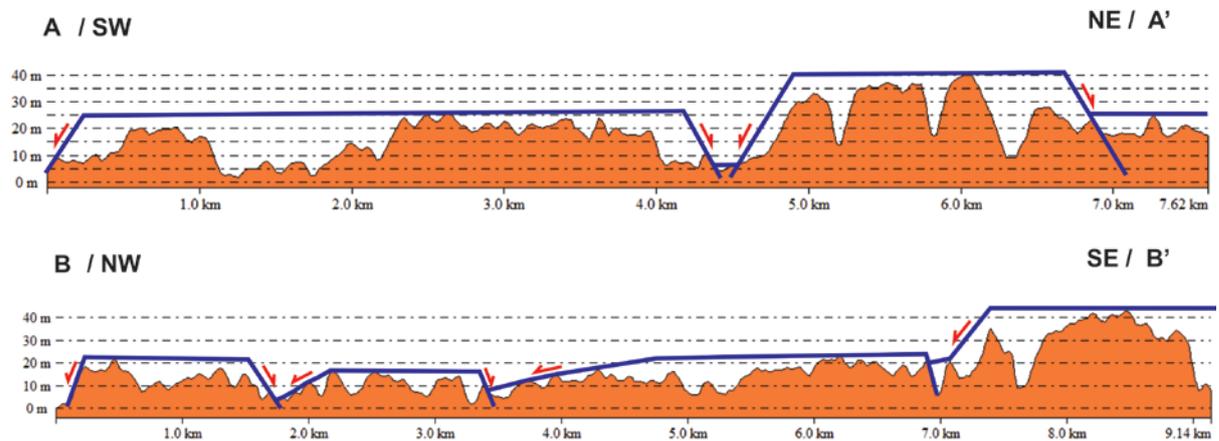


Figura 35 - Movimentações verticais estabelecidos com base na composição das figuras 26, 27, 28 e 34. Fonte: Do autor.

Como já mencionado a interpretação regional permitiu a observação e a elaboração de um mapa morfoestrutural dos blocos em três setores (Figura 36), com os perfis e a localização dos poços que captam água somente do aquífero Barreiras ou Pirabas, cadastrados na área.

No Setor 1, os blocos não apresentam uma forma geométrica regular bem definida, e estão localizados na porção N e NW da área. As estruturas maiores na direção NE/SW interceptadas por lineamentos menores de direção NW/SE controlam a geometria desse bloco. A disposição da rede de drenagem apresenta um padrão de multiorientação, ou seja, a direção do vetor de caimento topográfico é variada. A razão para que isso ocorra pode estar relacionada às direções estruturais das faixas Gurupi NNW-SSE e Araguaia NE-SW, que induzem também a um controle estrutural sobre os aquíferos neste setor, associado à presença de anomalias como visto anteriormente.

Os blocos maiores possuem dimensões variadas com arestas maiores de 2,7 a 5,1 km e arestas menores de 1,0 a 2,4 km. Enquanto, os blocos menores apresentam dimensões de arestas variando de 1,0 a 2,3 km. Os blocos maiores estão limitados pelas principais drenagens, sendo elas: o rio Maguari e os igarapés do Paracurí, Outeiro, Anani, Mata Fome e Maguari. Os blocos menores são delimitados pelos tributários dessas drenagens.

O Setor 2 é o maior em termos de área e apresenta blocos bem definidos com forma principalmente losangular a retangular localizados na parte S e SE da área. Os lineamentos maiores também possuem direção NE/SW interceptados por lineamentos menores de direção NW/SE, que definem blocos internos menores. Predomina o sentido NW para o vetor de caimento topográfico.

Os blocos maiores apresentam dimensões da aresta maior entre 2,6 a 8,5 km e arestas menores de 1,1 a 3,4 km e os menores possuem dimensões da aresta maior de 2,0 a 2,6 km e arestas menores de 0,7 a 1,5 km. Os blocos maiores também são limitados pelos principais rios ou igarapés que são: rios Maguariaçú, Mocajatuba, e igarapés São Joaquim e Val-de-Cães com direção de fluxo principal para NE.

E o Setor 3 na porção S a SW da área, apresenta blocos também mal definidos geometricamente. Lineamentos maiores de direção N-S, correspondentes aos principais igarapés deste setor (Tucunduba e Murutucu), são seccionados por lineamentos NW-SE e E-W que é o eixo principal da bacia do Rio Guamá. Sendo estas duas últimas direções também o sentido de caimento do vetor topográfico. Os blocos apresentam dimensões variadas com as arestas maiores 2,0 a 4,6 km e arestas menores entre 0,6 a 3,0 km.

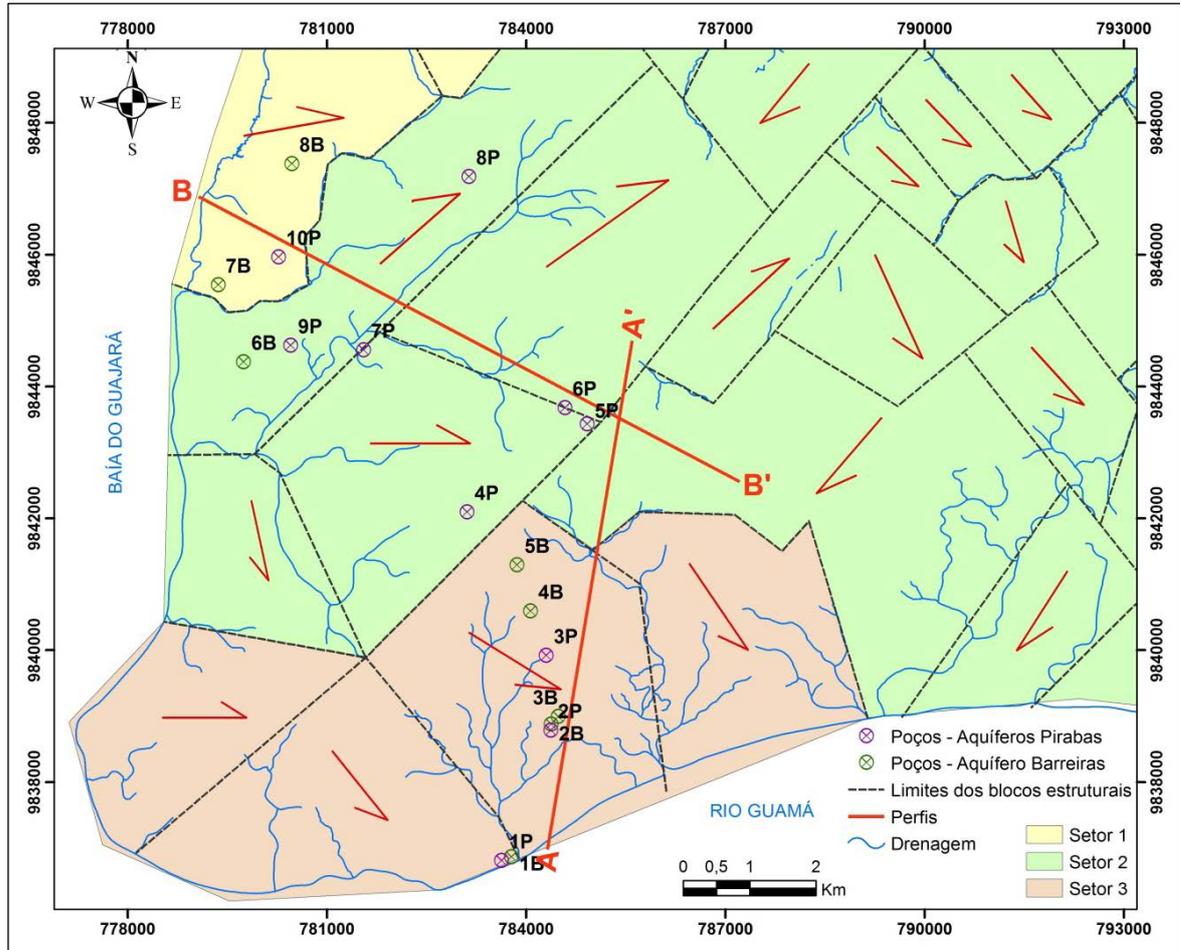


Figura 36 - Compartimentação morfoestrutural dos blocos em setores indicando o provável sentido dos vetores (setas em vermelho) de caimento topográfico, as seções morfoestruturais A-A' e B-B' e a localização dos poços na área. Fonte: Do autor.

As características encontradas, tais como padrão de drenagem a exemplo, os canais retilíneos, anomalias e assimetria no estudo morfoestrutural reforçam a ideia de que a área em estudo está sobre um controle estrutural evidentes nas direções das faixas Gurupi e Araguaia, no qual algumas dessas características representam os limites de blocos morfotectônicos, sendo possível adotar a metodologia proposta por Costa (2004), Bandeira (2008) e Palheta (2008) para esboçar um arranjo geométrico bidimensional, com base nos padrões de drenagem e de relevo.

Costa (2004) em seu estudo compartimentou em dois setores morfoestruturais uma parte da RMB, caracterizados por lineamentos maiores, de direção NE/SW seccionados por lineamentos menores de direção NW/SE, definindo blocos internos menores, arranjo análogo às direções preferenciais de falhas encontradas na área de estudo que está sendo analisada. Á norte da área Palheta (2008) observou o mesmo padrão em seu trabalho para a ilha de Mosqueiro. Está foi por ele compartimentado em 12 blocos morfoestruturais controlados por

estruturas maiores nas direções NE-SW e NW-SE. A leste da área, dessa pesquisa, especificamente na porção centro-oeste do município de Castanhal e sul do município de Santo Antônio do Tauá referente à sua área de estudo Bandeira (2008) também observou que os 16 blocos morfoestruturais delimitados em seu trabalho possuem como limites de direções principais NE-SW e NW-SE (Figura 37).

Esses estudos dão ainda mais consistência, ao que foi estabelecido por Costa et al. (1996) e outros autores em relação a evolução do quadro neotectônico do nordeste paraense e de Belém que definiu as bacias de afastamento ao qual estão inseridas essas regiões.

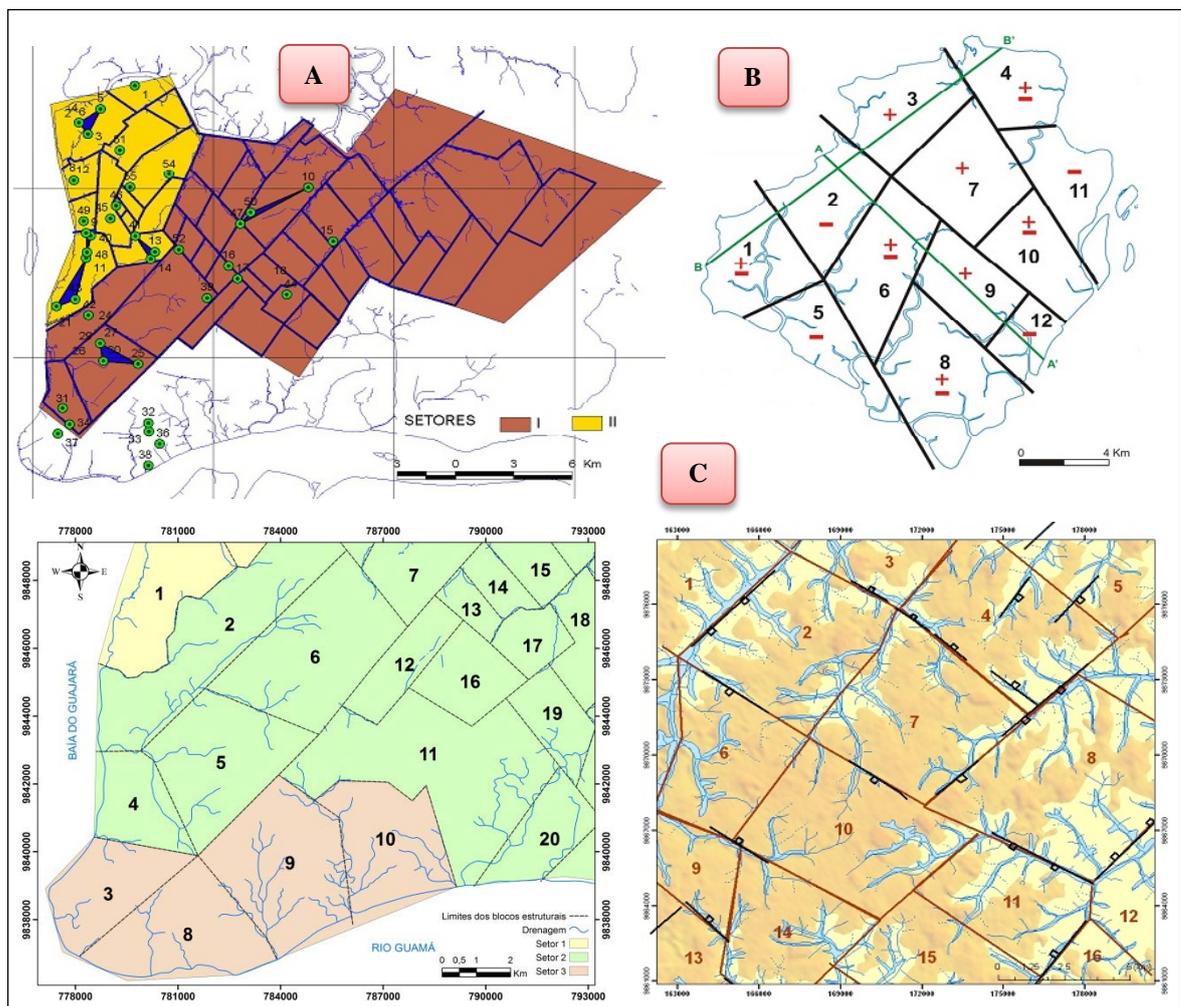


Figura 37 - Comparação das direções preferenciais das falhas que compartimentam as áreas: (A) porção de Belém, em parte da RMB (Costa, 2004), (B) a ilha de Mosqueiro (Palheta, 2008) e (C) porção de Santa Isabel (Bandeira, 2008). Fonte: Costa 2004, Palheta 2008 e Bandeira 2008.

Assim, essa delimitação por falhas desses blocos tectônicos (total de vinte blocos) que foram individualizados e/ou compartimentados em setores morfoestruturais (Figura 37) pode favorecer a mistura de água entre os aquíferos rasos, intermediários e profundos. Os deslocamentos verticais, gerados por falhamentos acarretam a justaposição lateral de camadas

aquíferas a outras impermeáveis, interrompendo parcial ou totalmente o fluxo horizontal. Ou ainda, em outros casos, pode ocorrer a comunicação de camadas aquíferas de profundidades diferentes (Palheta, 2008). Disso decorre que os aquíferos que inicialmente estariam confinados podem apresentar interconexão com outros aquíferos por meios dessas zonas de circulação de água promovida pelas zonas de falhas e fraturas, o que levou Palheta (op cit.) a considerar a existência de um único sistema hidrogeológico regional com complexos mecanismos de circulação e de hidrodinâmica, no qual os aquíferos estão, de certo modo, inter-relacionados.

Portanto, é provável que a área de estudo esteja inclusa no contexto de um sistema hidrogeológico regional com zonas direta de recarga por meio de infiltração de água de chuva, como também através de zonas estruturais equivalentes aos blocos morfotectônicos que podem possibilitar e/ou permitir a circulação e comunicação entre o aquífero livres, intermediários e confinados.

Logo, os modelos testados encontram respaldo no que foi verificado com este estudo, adensando mais o conhecimento e apresentando mais consistência a esses modelos, em relação ao comportamento e influência das estruturas neotectônicas, no caso as falhas na possível conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos Barreiras e Pirabas.

O modelo de *Riedel* que trata da deformação rúptil não coaxial foi utilizado para compatibilizar e explicar os elementos estruturais geométricos para cada setor em que a presente área sob investigação se compartimenta.

Considerando-se que a área do Setor 1 não apresenta estruturas suficientes para a concordância com este modelo, e que essa faz parte do mesmo setor analisado por Costa (2004) em maior escala, foi então empregada a compatibilização estabelecida por ele para este setor.

Com isso, este setor 1 apresenta suas estruturas compatibilizadas ao funcionamento de um binário sinistral, enquanto os setores 2 e 3, se enquadram na atuação de um binário dextral (Figura 38B).

Segundo Costa (2004) o Setor 1 apresenta movimentação principal conforme os lineamentos NE/SW com indicação de movimentação sinistral, o que pode ser comprovado pela geometria do bloco e pelas formas em “S” nas drenagens de direção NW-SE, que são interceptadas por esses lineamentos, se enquadrando no modelo cinemático proposto por Palheta (2008). As formas ou anomalias em “Z” encontradas nas drenagens de mais alta ordem de direção NE-SW, caracterizam a movimentação dos blocos internos, a qual é dextral.

O Setor 2 possui movimentação principal concordante aos lineamentos NE/SW com indicação de deslocamento dextral, o que pode ser comprovado pela geometria do bloco. Neste, a movimentação dos blocos internos é sinistral o que pode ser comprovado pelas formas em “S” nas drenagens de mais alta ordem de direção NE-SW quando analisamos em escala mais regional (Figura 18).

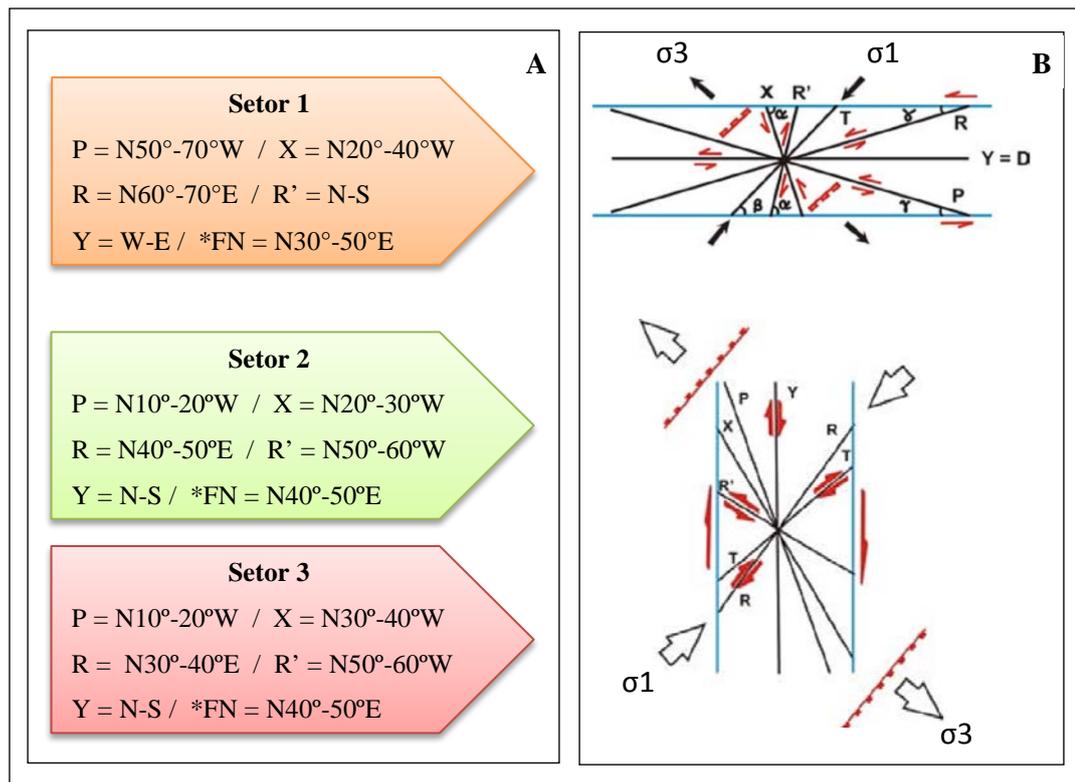


Figura 38 - Diagrama de *Riedel* proposto por setores morfoestruturais na área. A) Direções das fraturas e falha normal (*FN) identificadas e B) Esquema de cisalhamento simples, mostrando o arranjo de um binário sinistral e binário dextral. Fonte: Costa, 2004.

Verifica-se, que o lineamento de direção N40°-50°E (Figura 38A) equivalente às principais drenagens deste setor: Val-de-cães, São Joaquim, Rios Maguariçu e Mocajatuba, estariam encaixadas, em concordância ao modelo proposto, nos planos trativos onde se desenvolvem falhas normais de direção NE-SW. Segundo Costa (2004), o mesmo aconteceria para o rio Maguarí e os igarapés do Paracurí, Tapanã, Anani, Outeiro, Mata Fome e Maguarí, que constituem o setor 1. Tais, segmentos são áreas de prováveis deslocamentos verticais e possuem maior favorabilidade à penetração vertical da água, podendo ser considerado como zonas de recarga dos aquíferos rasos e profundos.

Esses resultados tem compatibilidade com o que apresentou Igreja et al. (1990) em escala regional, no qual pode-se afirmar que a direção NW-SE configura aquela de maior estiramento (σ_3), mesma direção da Bacia Piraba-Barreiras a qual está inserida a área

analisada; sendo a direção de maior encurtamento NE-SW das falhas normais perpendicularmente as falhas transferentes NW-SE.

A atuação do regime de esforço responsável por esse padrão geométrico-cinemático decerto influencia a recarga dos aquíferos, como também dificulta a correlação estratigráfica dos mesmos anteriormente contínuos e agora seccionados e deslocados por essas discontinuidades, visto que associada a esse sistema de falhamentos ocorreu a rotação dos pacotes sedimentares (Costa, 2004).

A interpretação dos domínios morfoestruturais permitiu a confecção de mapas por setores com as principais direções dos lineamentos identificados bem como às rosáceas respectivas para cada um deles (Figuras 39 e 41).

A individualização por setor das medidas de lineação de drenagem (Figura 40) mostrou as seguintes direções principais:

- Setor 1 => N20°-30°E, N40°-50°E, N10°-20°W, N30°-40°W, N60°-70°W, N70°-80°W e E-W,
- Setor 2 => N40°-50°E, N0°-10°E e N40°-50°W,
- Setor 3 => N60°-70°W, N40°-50°E, N0°-10°W, N30°-40°W e N30°-40°E.

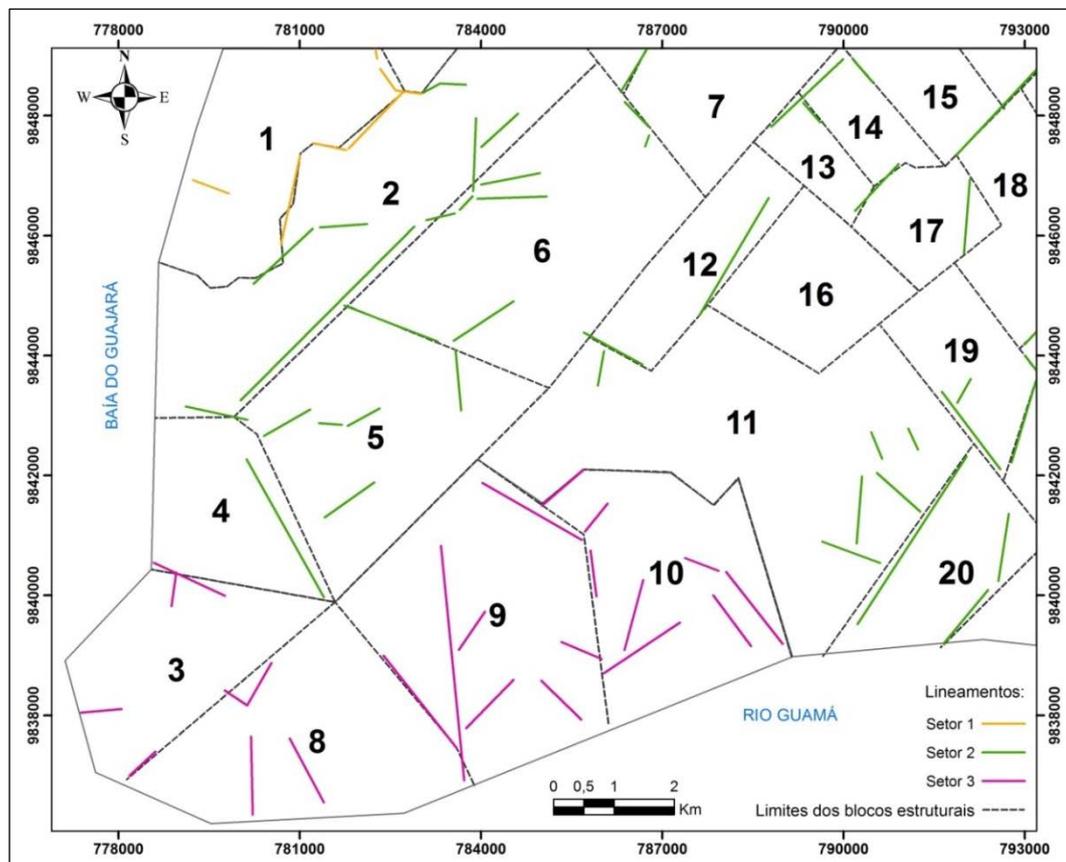


Figura 39 - Mapa de lineamentos de drenagem por setor da compartimentação morfoestrutural dos blocos na área. Fonte: Do autor.

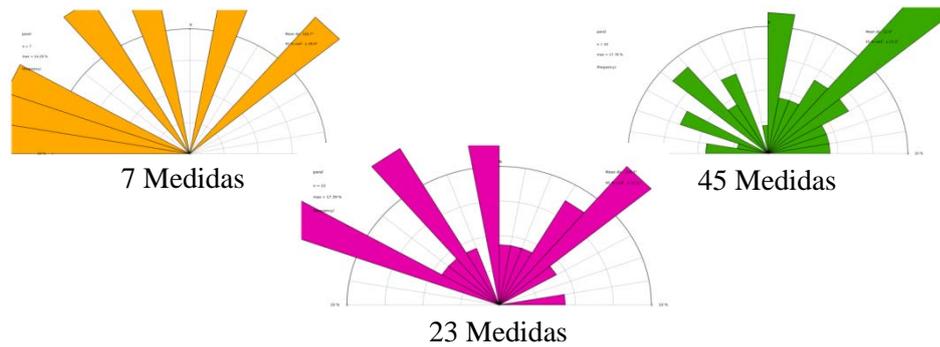


Figura 40 - Rosáceas dos lineamentos de drenagem por setor na área conforme compartimentação morfoestrutural dos blocos. Fonte: Do autor.

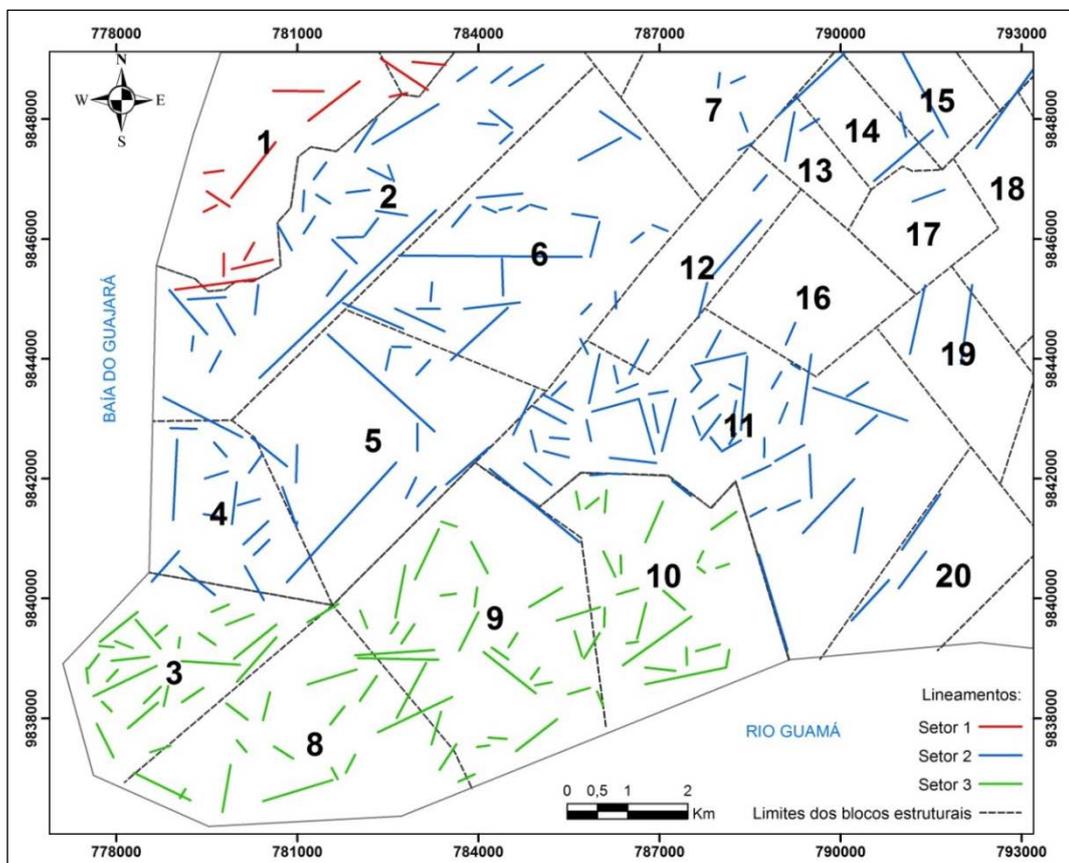


Figura 41 - Mapa de lineamentos de relevo por setor da compartimentação morfoestrutural dos blocos na área. Fonte: Do autor.

As medidas de lineação de relevo por setor (Figura 42) mostrou direções principais para:

- Setor 1 => E-W, N70°-80°E e N50°-60°W,
- Setor 2 => N40°-50°E, N0°-10°E e N30°-40°E,
- Setor 3 => N30°-40°E, N70°-80°E, N50°-60°E e N0°-10°E.

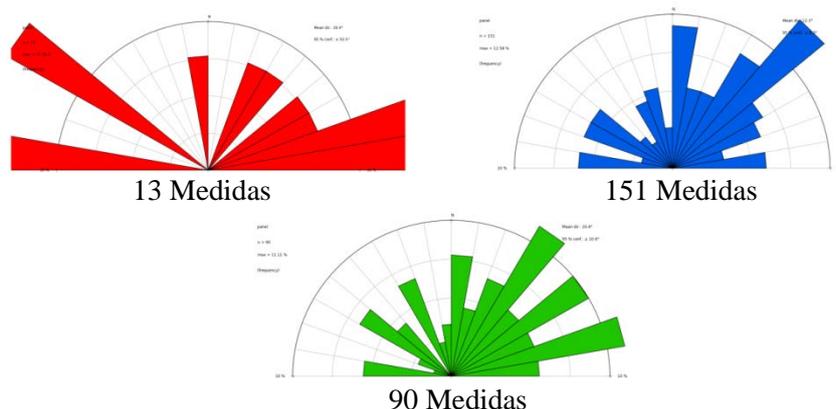


Figura 42 - Rosáceas dos lineamentos de relevo por setor na área conforme compartimentação morfoestrutural dos blocos. Fonte: Do autor.

4.5 CORRELAÇÃO LITOESTRATIGRÁFICA

A partir do mapa da Figura 36 foi realizada a correlação litoestratigráfica para os poços que captam água somente do aquífero Pirabas ou do aquífero Barreiras para as seções dos perfis A-A' e B-B' determinadas de acordo com as direções preferenciais de lineamentos de drenagem e relevo, ou seja, NE-SW e NW-SE.

Para essa correlação foram utilizados os dados e informações (Tabelas 6 e 7) dos poços cadastrados ao longo dos perfis e também às descrições detalhadas dos perfis litológicos (ANEXOS A e B) para os poços de cada aquífero. Ambos foram elaborados com base nas fichas dos poços que foram levantadas junto às empresas FEMAC GEOSOLO e CPRM.

4.5.1 Poços – Aquífero Barreiras

Nas Figuras 43 e 44, pode-se observar um contato entre o Pós-Barreiras e a Formação Barreiras, no qual este varia entre arenitos argilosos e siltitos argilosos com arenitos ferruginosos do Pós-Barreiras e os arenitos e argilitos da Formação Barreiras com leitos delgados de concreções lateríticas. A exemplo do contato entre os poços 2B e 3B (localizados no bloco 9) com deslocamento de 2,6 m no perfil A-A' se considerarmos a base de 24 m para o sistema pós-Barreiras no poço 2B e de 23,35 m no poço 3B.

Entre os poços 4B e 5B também situados no bloco 9 da seção A-A' há um deslocamento de 11,65 m para os arenitos argilosos do Barreiras, com provável indicação de falha com mergulho para SW.

O aquífero Barreiras ocorre a uma profundidade de até 125 m e 150 m, a exemplo dos poços 1B e 8B, respectivamente, caracterizado como semi-confinado a confinado⁷ e média de 29 m de espessura. Enquanto o aquífero Pós-Barreiras é observado a uma profundidade de até 24 m (poços 2B e 4B) nos poços das seções analisadas, podendo ser caracterizado como livre a semi-confinado com espessura média de 14 m (Tabela 6 e Figuras 43 e 44).

O poço 1B do perfil A-A' apresenta espessura de 30 m da camada aquífera, e maior vazão (180 m³/h) em relação aos demais poços do mesmo perfil e isso pode estar relacionado ao fato de o mesmo encontrar-se próximo ao limite por falha entre os blocos 8 de cota mais baixa em relação ao bloco 9, influenciando na interconexão com outros aquíferos e portanto na sua recarga e circulação.

De acordo com a interpretação dos dados é possível observar para as duas seções que a maioria das camadas aquíferas são compostas por arenitos de granulação fina a média, justaposto a camadas permeáveis a semi-permeáveis, tais como: arenitos argilosos, siltitos argilosos, argillitos e argilitos arenosos.

⁷ Neste estudo o conceito de aquífero confinado é restrito. Então, só existe aquífero confinado se no interior de um bloco tectônico houver uma camada permo-porosa lá dentro, que permita um acúmulo de água, e a partir dessa camada, num contexto que isole a mesma. Ela poderá ser um aquífero confinado se nenhuma grande zona de falha interceptar essa camada. Ela só será uma camada confinada nessa situação.

Tabela 6 - Cadastro de informações dos Poços Barreiras na área. Fonte: Femac - Geosolo Engenharia e SIAGAS/CPRM.

Ponto	Ponto SIAGAS	UTMN	UTME	Localização/ Bairros	Proprietário	Data de perfuração	Profund. (m)	Cota (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m³/h)	Situação	Localização do Filtro	Aquífero		Condição	Observação
														Topo (m)	Base (m)		
1B	1500002045	9836861	783777	Universitário	UFPA / Poço 4 BE 03 PA	20/06/1978	150	10,12	0,31	18,38	180	Equipado	Formação Barreiras	119	149	Confinado	Abastecimento doméstico
2B	1500001996	9838875	784375	Universitário	COSANPA / TEF 02	20/09/1972	67	7	0	47	52,66	Abandonado	Formação Barreiras	61	64	Confinado	Abastecimento urbano
3B	1500001992	9838990	784480	Universitário	COSANPA	15/09/1978	89,65	3,75	6	12,15	81,8	Abandonado	Formação Barreiras	61,35	89,65	Confinado	Abastecimento urbano
4B	1500001045	9840590	784065	Curió-Utinga	SERPRO	05/11/1983	75	20,97	9	29	25	Equipado	Formação Barreiras	9	74	Semi-Confinado	Abastecimento doméstico
5B	1500005632	9841291	783858	Curió-Utinga	CPRM	29/06/2012	100	16,12	10,43	22,52	5,5	Poço RIMAS*	Formação Barreiras	0	41	Livre	Poço de monitoramento/ sem uso
6B	1500006639	9844369	779741	Miramar	LIQUIGAS	08/07/2009	50	10,89	3	7	12	Bombeando	Formação Barreiras	40	50	Semi-Confinado	Outros (lazer, etc.)
7B	1500001114	9845540	779360	Val-de-Cães	MIN. DA MARINHA/BASE NAVAL	24/08/1987	273	10,93	16	27	49,5	Equipado	Formação Barreiras	58	92	Semi-Confinado	Abastecimento múltiplo
8B	-	9847378	780467	Val-de-Cães	Aeroporto Internacional - SCI	10/12/2007	121,75	12,61	23,05	27,29	37,43	Bombeando	Formação Barreiras	79,5	125	Semi-Confinado	Bombeado quando necessário

Legenda: Poço RIMAS* equipado c/ medidor automático de nível, Profund.= Profundidade, NE = Nível Estático, ND = Nível Dinâmico e Q = Vazão.

Tabela 7 - Cadastro de informações dos Poços Pirabas na área. Fonte: Femac - Geosolo Engenharia e SIAGAS/CPRM.

Ponto	Ponto SIAGAS	UTMN	UTME	Localização/ Bairros	Proprietário	Data de perfuração	Profund. (m)	Cota (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m³/h)	Situação	Localização do Filtro	Aquífero		Condição	Observação
														Topo (m)	Base (m)		
1P	-	9836806	783629	Universitário	UFPA P4	22/01/2009	250,6	2,62	9,69	23,44	250	Bombeando	Formação Pirabas	86	241	Semi-Confinado	Abastecimento urbano
2P	1500001963	9838781	784368	Universitário	COSANPA-T. FIRME-07	16/03/1992	268	7,25	5,60	15,40	147	Abandonado	Formação Pirabas	199	251	Confinado	Abastecimento urbano
3P	1500001960	9839918	784302	Universitário	COSANPA-T. FIRME-09	01/04/1993	270	7,59	10,50	18,60	144	Abandonado	Formação Pirabas	177	251	Confinado	Abastecimento urbano
4P	1500005376	9842092	783110	Marco	COSANPA/5º SETOR/FEMAC	13/08/1985	188	14,96	17	30	210	Poço RIMAS*	Formação Pirabas	98	188	Livre	Sem uso
5P	-	9843430	784918	Souza	Assembléia Paraense-P1	17/10/2013	254,32	31,24	30,48	44,63	124,14	Bombeando	Formação Pirabas	93	258	Semi-Confinado	Outros (lazer, etc.)
6P	-	9843676	784585	Souza	Assembléia Paraense-P2	17/03/2014	255,25	23,86	30,07	37,84	126,5	Equipado	Formação Pirabas	94	264	Semi-Confinado	Outros (lazer, etc.)
7P	1500002049	9844550	781550	Sacramenta	Loteamento - cdp/ FEMAC 01	12/06/1995	270	4,96	11,25	16,45	124	Equipado	Formação Pirabas	167	252	Confinado	Abastecimento urbano
8P	-	9847184	783135	Bengui	COHAB/Mauá jr	21/01/2010	251,45	16,44	34,7	41,25	340	Abandonado	Formação Pirabas	110	252	Semi-Confinado	-
9P	1500002054	9844619	780450	Sacramenta	COSANPA - FEMAC P03	01/05/1998	275	5,29	12,83	23,80	211,7	Equipado	Formação Pirabas	134	271	Confinado	Abastecimento urbano
10P	1500002001	9845963	780270	Val-de-Cães	Base Aérea de Belém	01/06/1989	150	10	12	25	-	Equipado	Formação Pirabas	69	143	Confinado	Abastecimento doméstico

Legenda: Poço RIMAS* equipado c/ medidor automático de nível, Profund.= Profundidade, NE = Nível Estático, ND = Nível Dinâmico e Q = Vazão.

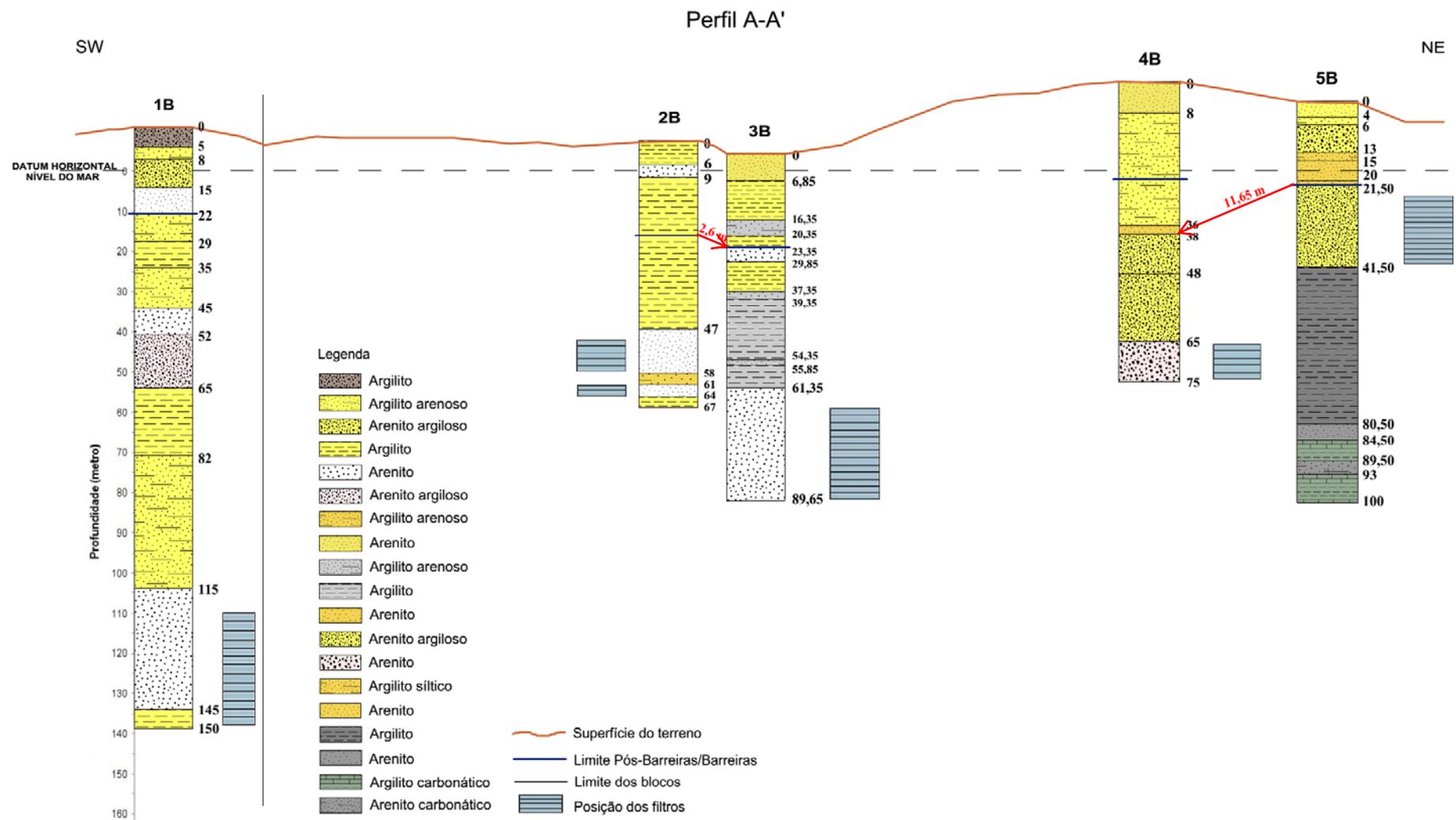


Figura 43 - Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Barreiras na área, seção A-A'. Fonte: Do autor

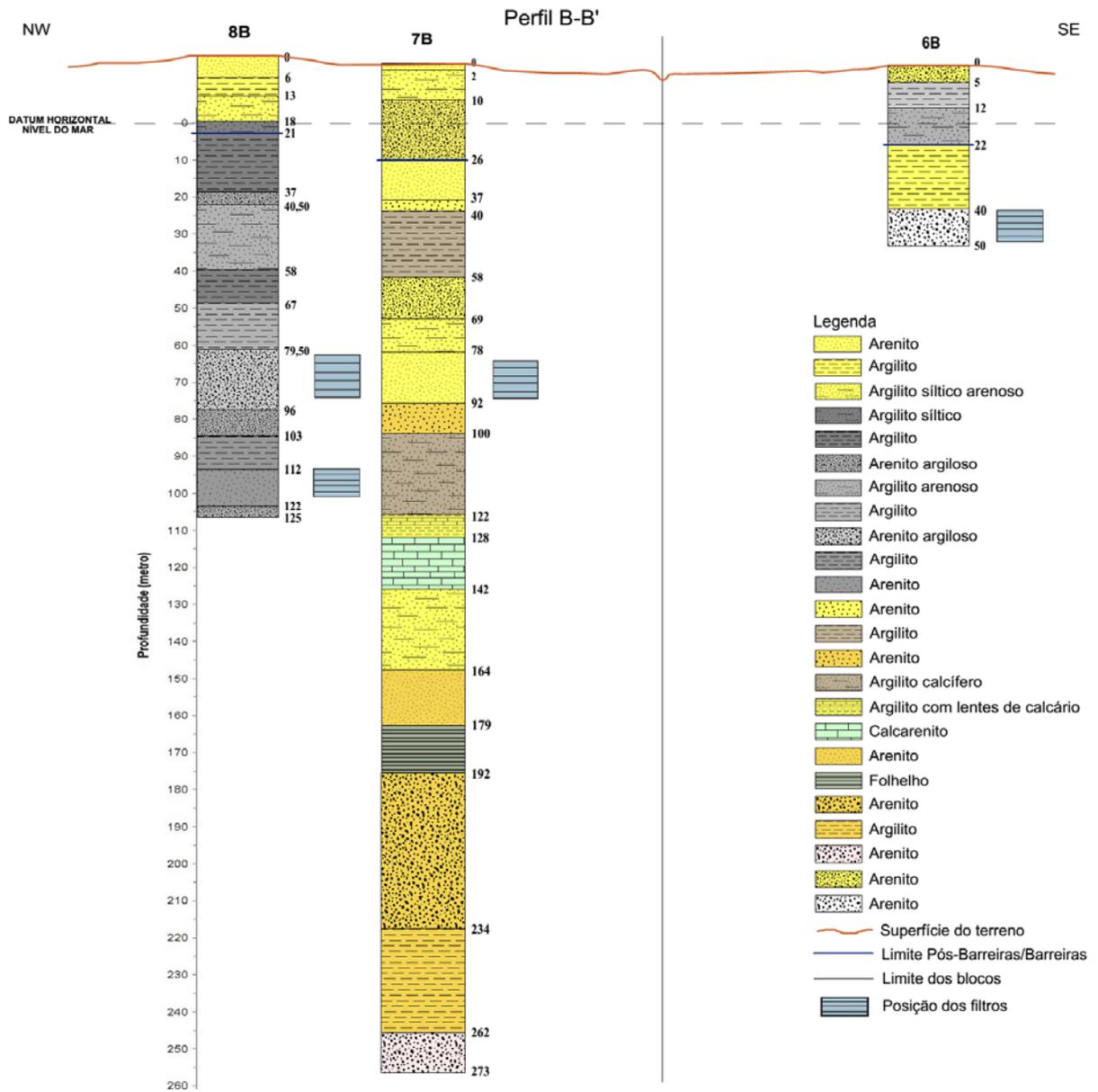


Figura 44 - Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Barreiras na área, seção B-B'. Fonte: Do autor.

4.5.2 Poços – Aquífero Pirabas

Para essa correlação litoestratigráfica foi considerado como camada guia o contato para o limite Barreiras/Pirabas marcada pela ocorrência de uma camada de argilito de cor cinza, sobreposta a um pacote de calcarenito de mesma coloração, com matriz levemente argilosa.

Na Figura 46 entre os poços 5P e 6P pode-se observar deslocamentos de 8,38 m para os pacotes de calcarenito referente ao contato da Formação Barreiras com a Formação Pirabas, de 51,38 m para o argilito carbonático cinza esverdeado, em parte laminado (folhelhos) e de 9,38 m para os arenitos cinza claro, carbonático, de granulação grossa a muito grossa, com seixos de quartzo milimétricos a centimétricos aonde foram instalados os filtros para captação de água.

Para os poços 2P e 3P (situados no bloco 9) há um deslocamento da camada de arenito conglomerático de 85,66 m e outro deslocamento de 15,66 m para os arenitos de granulação fina, sendo este último pacote também observado entre os poços 3P e 4P (localizado no bloco 9) com deslocamento de 9,37 m (Figura 46). E nessa seção, pode se observar que as camadas são deslocadas por prováveis falhas com mergulho no sentido NE.

No perfil B-B' da Figura 47 se observa um deslocamento para os pacotes de calcarenito com vestígios fósseis de 2,85 m entre os poços 9P e 8P e de 1,38 m entre os poços 6P e 5P.

Nota-se que o poço 6P foi perfurado em zona de falha (fronteira dos blocos mofotectônicos 5 e 6) conforme a figura 36, que pode ocasionar em seção repetida ou faltante na acomodação e/ou separação dos pacotes estratigráficos. Ou seja, em relação a essa separação a perfuração através de uma falha pode resultar em uma *seção repetida* ou em uma *seção faltante* no corte de falha (ponto onde a perfuração intersecta a falha). Em perfurações verticais, o caso é simples: falhas normais omitem camadas e falhas reversas causam a repetição de camadas ao longo da perfuração (Fossen, 2012).

Assim, ao se analisar o perfil litológico do poço 6P verifica-se a ausência e/ou desaparecimento da seção (camada litológica) faltante, a exemplo da camada de calcarenito (93 a 108 m no poço 5P), o que pode indicar falhas normais.

Além disso, a vazão deste poço em relação à maioria é menor e, portanto neste caso a influencia do deslocamento das camadas aquíferas pelo falhamento pode estar obstruindo parcial a totalmente o fluxo hídrico em algumas camadas aquíferas.

Foi observado outro deslocamento de 11,38 m para os leitos de arenitos, carbonáticos argilosos, cinza esverdeado entre os poços 6P e 5P. E ainda, de 36,48 m e 4,1 m de deslocamento para os argilitos arenosos, carbonáticos cinza a esverdeado entre os poços 8P (situado no bloco 2) e 7P (situado entre os blocos 2 e 5), 7P e 6P, respectivamente, sendo observado o mergulho das prováveis falhas no sentido NW e SE (Ver figura 36).

O poço 7P que se encontra em zona e/ou limite de falha apresenta uma menor produtividade de vazão em relação aos demais poços, e isso pode estar relacionado às mesmas influências do processo decorrente de falhamento, situação mencionada para o poço 6P.

Ao contrário do aquífero Barreiras é possível observar que as vazões dos poços do aquífero Pirabas são maiores e que ainda para este aquífero, há uma diferença entre os níveis estáticos de mais de 18 m aproximadamente para a maioria dos poços analisados em relação aos poços da AP (Tabela 7), em razão da característica anisotrópica do aquífero cárstico.

Nos poços dos perfis analisados o aquífero Pirabas é observado em torno do intervalo de profundidade de 69 m o topo (10P) a 271 m a base (9P), considerado semi-confinado a confinado com espessura média de 114 m. Já o aquífero Barreiras ocorre a uma profundidade média de 90 m a base, alcançando uma profundidade de até 113 m (a base), a exemplo do poço 9P. A espessura média desse aquífero é de aproximadamente 31 m, sendo também caracterizado como semi-confinado a confinado (Tabela 7).

A Figura 45 apresenta em perspectiva a posição e profundidade dos poços do SABP em relação aos blocos morfoestruturais e a morfologia do terreno, no qual a maioria dos poços está localizada nas áreas de planícies fluviais, seguido das colinas pedi-planizadas.

É importante ressaltar que os dados e informações cadastrados durante todo o processo construtivo para os poços da AP (5P e 6P), a exemplo dos perfis litológico e geofísico, possibilitaram estabelecer uma correlação mais detalhada, verificando a disposição das camadas litológicas, bem como a profundidade do topo e base das camadas aquíferas existentes, definindo suas espessuras.

Foi também realizada uma composição com o perfil construtivo, tempo de penetração, perfis geofísicos (RG e SP) e litológico em escala vertical 0,1 cm = 1m para ambos os poços da AP (Figuras 48 e 49), que ajudou e facilitou a compreensão da correlação com os outros poços neste estudo, assim como a elaboração das demais correlações apresentadas. Tais composições podem também servir como base didática para auxiliar em estudo e pesquisas relacionadas a esse tema.

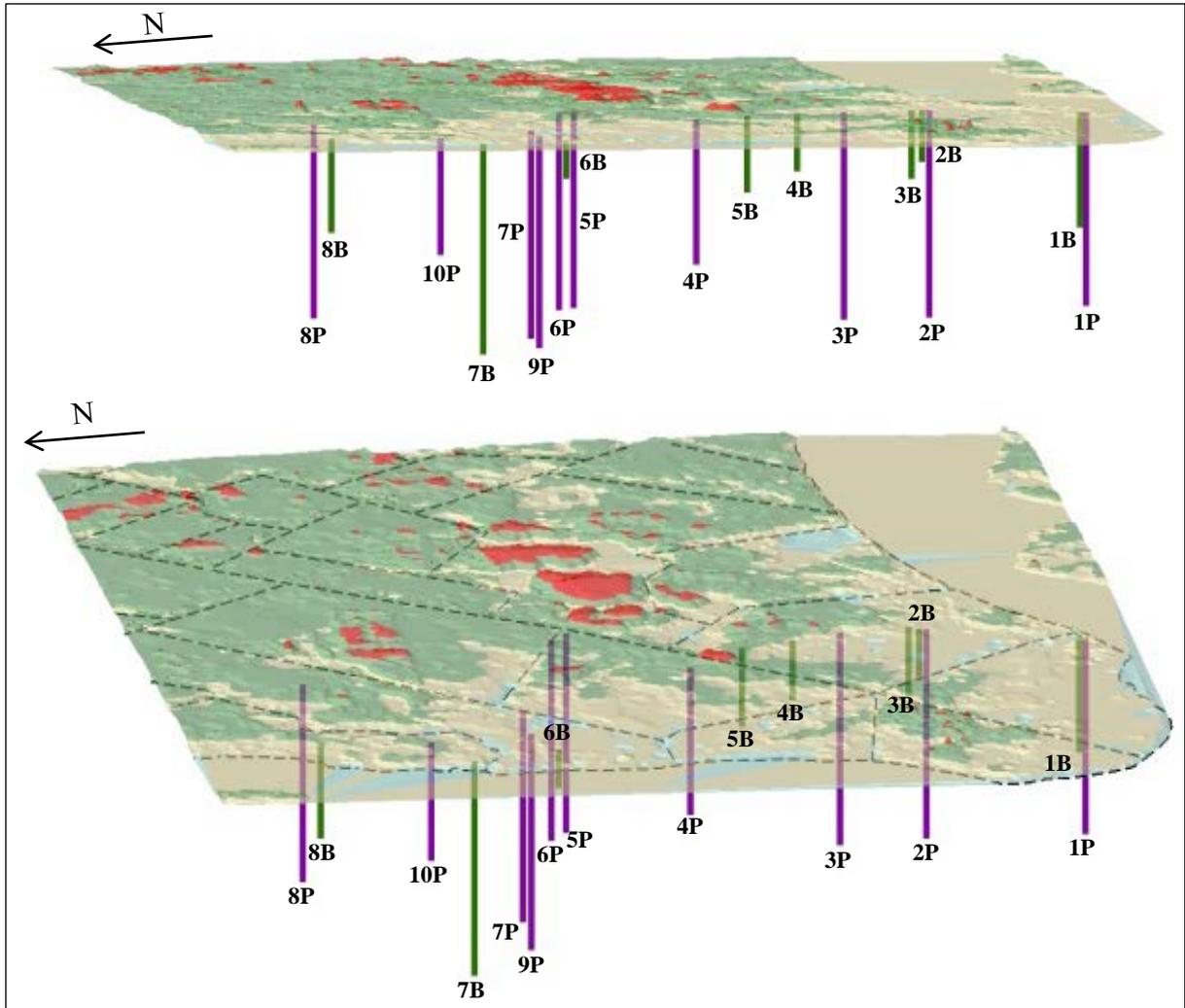


Figura 45 - Localização e profundidade dos poços Barreiras e Pirabas em relação ao relevo e aos domínios estruturais. Fonte: Do autor.

A interpretação dos perfis permitiu estabelecer características distintas, em termos geológicos entre os dois aquíferos tendo-se arenitos de granulometria variada, argilosos, intercalados a siltitos e argilitos, com presença de lentes de concreções ferruginosas para o aquífero Barreiras, enquanto o aquífero Pirabas é composto por calcários, calcarenitos e margas (calcário contendo 35 a 60% de argila), intercalados com folhelhos cinza-esverdeado, arenitos calcíferos, arenitos-argilosos e arenitos.

Com base nos estudos realizados por Sauma Filho (1996), Paranhos (2010) e Oliveira (2012) na RMB e regiões adjacentes, as águas dos aquíferos no sistema Pirabas são principalmente águas bicarbonatadas cálcicas com um $\text{pH} \geq 7,0$, como verificado nesse estudo para alguns poços. No sistema Barreiras elas são predominantemente águas cloretadas

sódicas com pH mais ácido e, portanto, essa qualidade das águas está diretamente ligada à constituição litológica das rochas dos aquíferos. Em decorrência disso as águas desses sistemas possuem características hidroquímicas no geral bem diferenciadas. Estes autores também sugerem a ocorrência de mistura entre as águas destes dois sistemas aquíferos.

As águas levemente ácidas podem se infiltrar nas fraturas/ou falhas por meio do fluxo hídrico, penetrando nas rochas carbonáticas, causando a dissolução do carbonato, e em decorrência disso levando ao aumento gradativo de CaCO_3 na água, podendo vir a ser prejudicial ao consumo humano no futuro. Quando se tratam de calcarenitos as águas produzidas podem apresentar turbidez elevada por ocorrer o enriquecimento de silicatos na água (Pinheiro, 2009).

Foi observado que os poços da AP (5P e 6P) estudados em detalhe e o da UFPA (1P) apresentaram concentrações de ferro (Fe) nas águas acima do valor máximo permitido segundo a Portaria nº. 2914/2011 do MS, que considera um intervalo para consumo humano na faixa de 0,3 mg/L. Estes teores elevados de ferro podem estar associados à variação da composição litológica das unidades do sistema Barreiras e também ao processo de bombeamento, uma vez que para se captar a água do poço, as partículas de ferro presente em solução nas águas subterrâneas apresentam o ferro no estado ferroso (Fe^{+2}), que é instável na presença de oxigênio do ar, mudando para o estado férrico (Fe^{+3}), ao serem suspensas durante tal processo, levando-se em conta a modificação de um ambiente redutor por um oxidante, podendo também ocorrer à precipitação do ferro e conseqüentemente a incrustação deste na parte interna da tubulação.

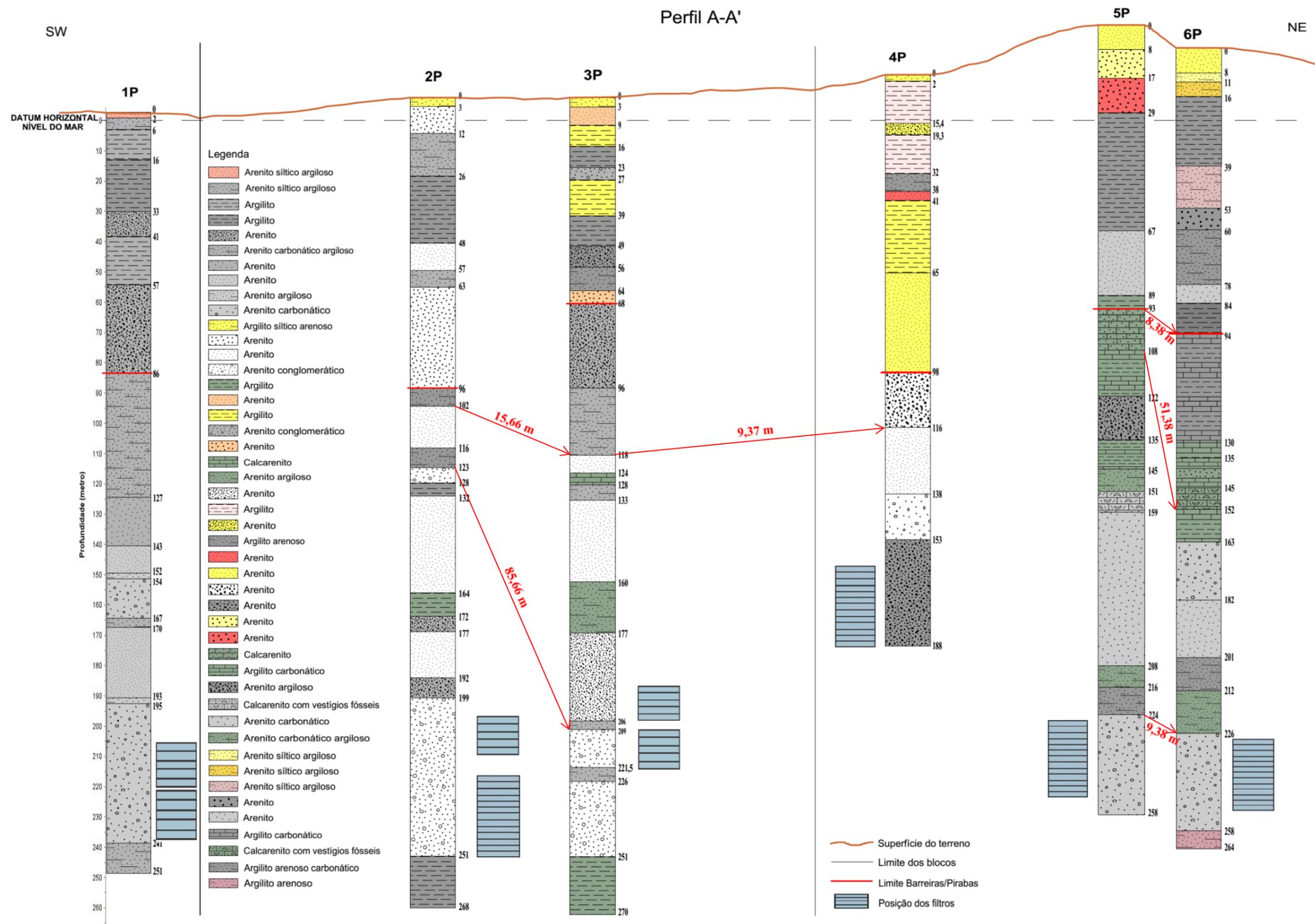


Figura 46 - Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Pirabas na área, seção A-A'. Fonte: Do autor.

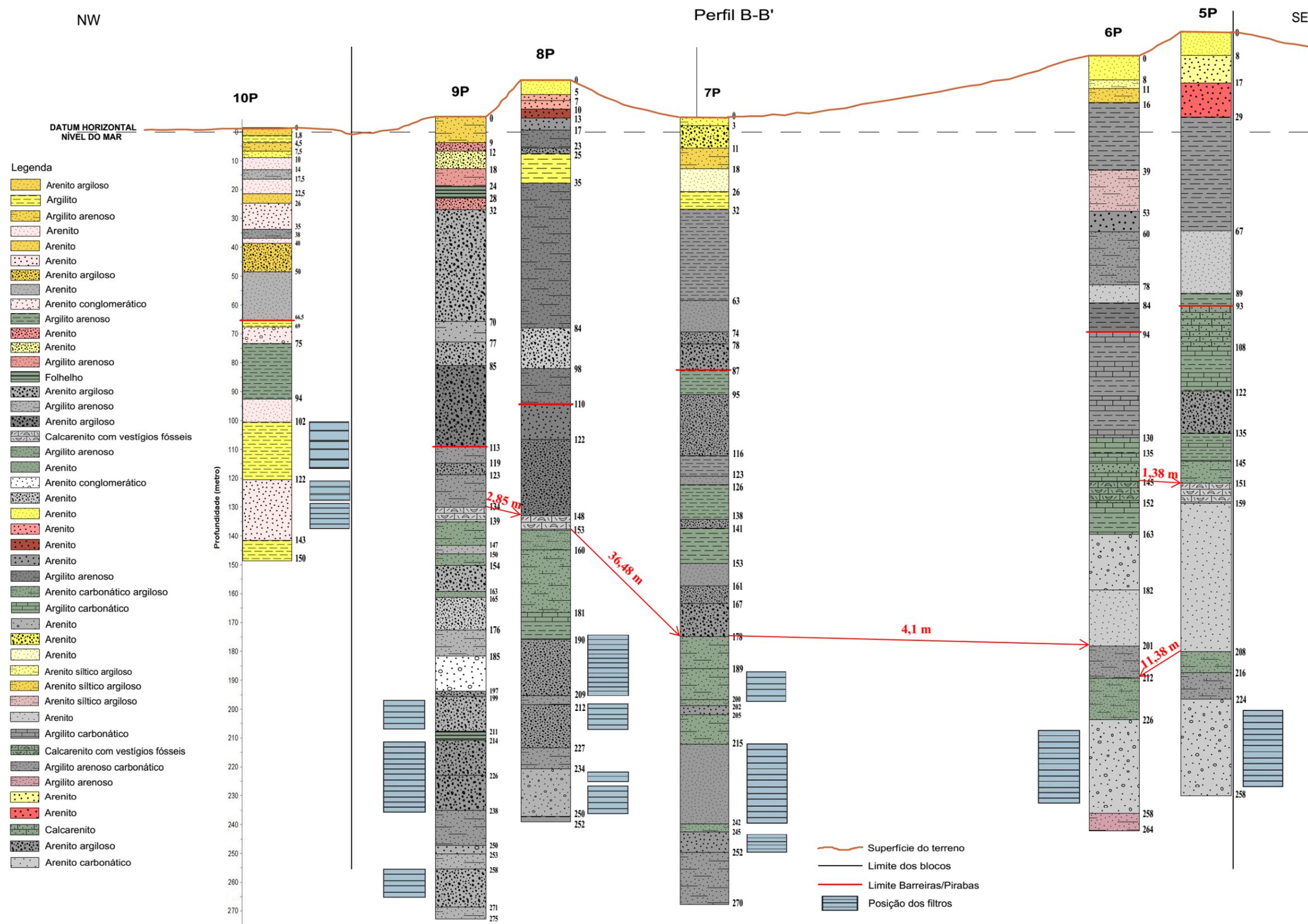


Figura 47 - Correlação litoestratigráfica demonstrada pelo perfil litológico dos poços Pirabas na área, seção B-B'. Fonte: Do autor

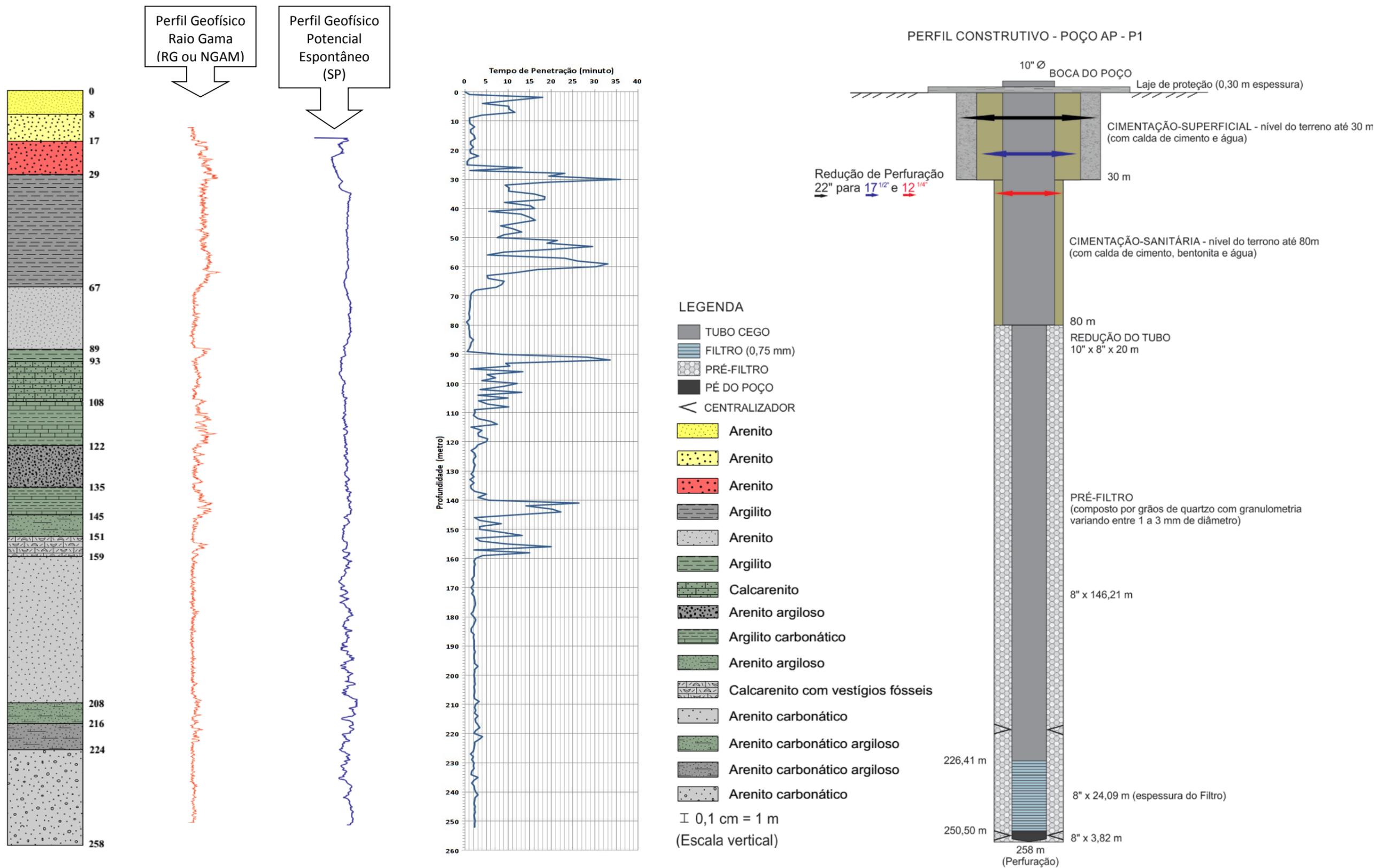


Figura 48 - Composição do Perfil Construtivo, Tempo de Penetração, Perfis Geofísicos (RG E SP) e Litológico do Poço Tubular Profundo AP - P1. Fonte: Do autor.

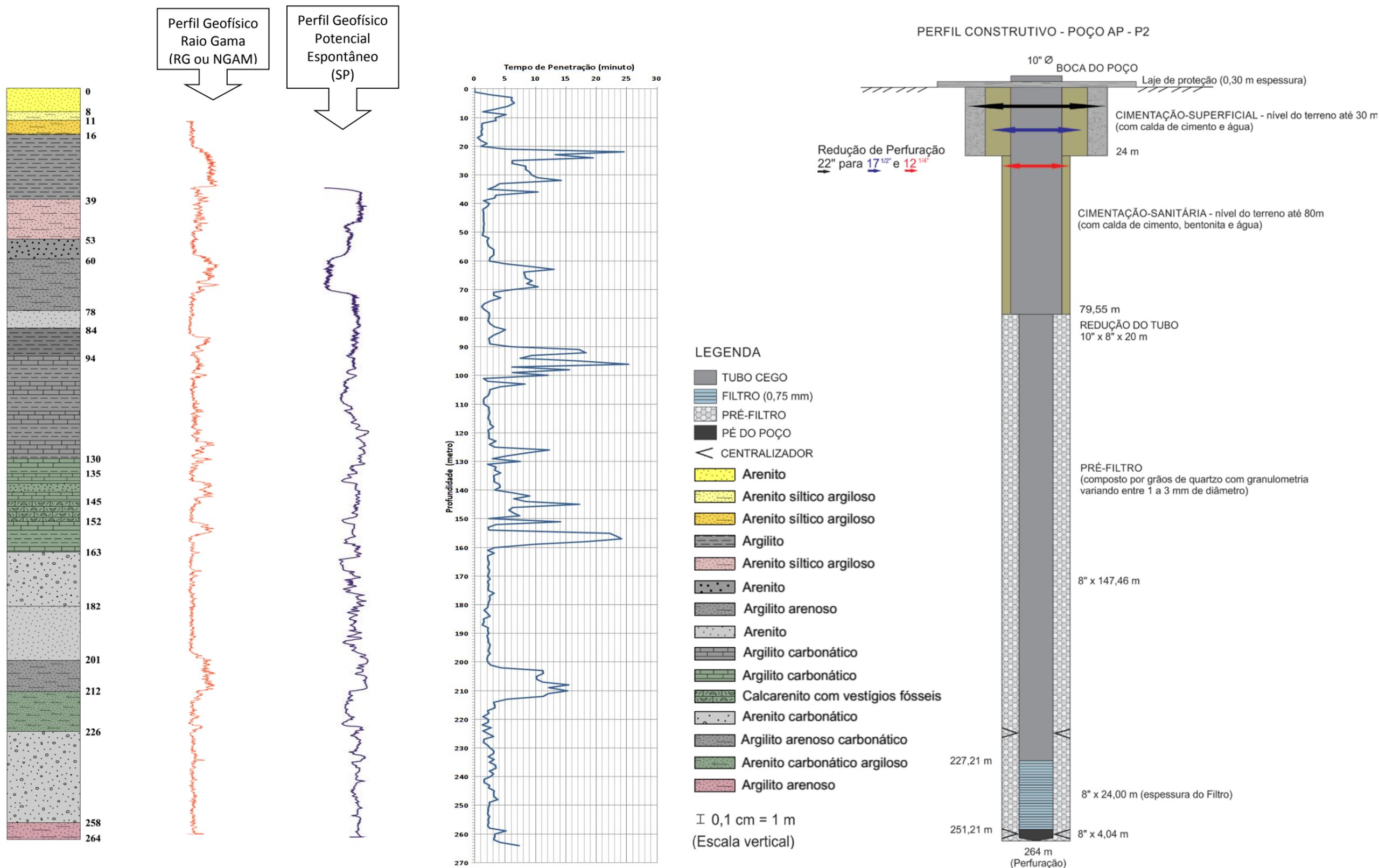


Figura 49 - Composição do Perfil Construtivo, Tempo de Penetração, Perfis Geofísicos (RG E SP) e Litológico do Poço Tubular Profundo AP - P2. Fonte: Do autor.

4.6 FLUXOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS E ZONA DE RECARGA

O estudo sobre o comportamento dos fluxos hídricos subterrâneos nos aquíferos Barreiras e Pirabas para a área, levando em consideração a análise estrutural dos lineamentos e a compartimentação morfoestrutural em blocos tectônicos, associando geologia, hidrogeologia e neotectônica, se propôs à identificação das áreas de recarga e descarga destes sistemas, como também à interação entre os mesmos.

Os dados dos poços das Tabelas 8 e 9 foram obtidos no banco do SIAGAS/CPRM e na empresa FEMAC GEOSOLO, totalizando 28 poços, 14 para cada um dos aquíferos avaliados. A partir das informações levantadas desses poços foram calculados os valores de carga hidráulica para os respectivos aquíferos, possibilitando a confecção dos mapas de potenciais hidráulicos, mapa de fluxo subterrâneo e bloco diagrama do fluxo subterrâneo para os aquíferos Barreiras e Pirabas, que serão apresentados a seguir.

Segundo Matta (2002) quando se tem um quadro em que poços mais profundos apresentam níveis de água mais rasos, isso significa gradientes ascendentes, caracterizando zonas de descarga das águas subterrâneas.

A zona de recarga é a área onde ocorre o abastecimento do aquífero, ou seja, onde as águas da chuva se infiltram no aquífero (recarga direta) por meio de suas áreas de afloramento e por descontinuidades mecânicas (falhas e fraturas) existentes nas rochas sobrejacentes. Esse processo é controlado pela geologia no que se refere à existência de rochas porosas e permeáveis, pelas condições atmosféricas e pelos condicionantes impostos pela neotectônica. Por outro lado, a zona de descarga é a área onde ocorre o escoamento, ou a área por onde as águas emergem do sistema, alimentando rios e/ou jorrando com pressão por poços artesianos.

A recarga direta nos aquíferos livres ocorre em toda a superfície acima do lençol freático.

A carga hidráulica indica o nível de energia em que a água se encontra, podendo essa sofrer influência da elevação do nível d'água no escoamento ou da pressão do mesmo.

4.6.1 Aquífero Barreiras

A tabela 8 apresenta os dados utilizados para a elaboração dos mapas de parâmetros hidrogeológicos (Figuras 50, 51, 52 e 53), relativos ao aquífero Barreiras.

Tabela 8 - Dados cadastrados de poços do Barreiras na área. Fonte: SIAGAS/CPRM.

Poços	Ponto SIAGAS	UTMN	UTME	Cota (m)	NE (m)	Carga Hidráulica
1	1500002042	9836855	783770	10,15	0,9	9,25
2	1500002045	9836861	783777	10,12	0,31	9,81
3	1500001996	9838875	784375	7,00	0	7
4	1500001045	9840590	784065	20,97	9	11,97
5	1500001047	9841100	783950	20,86	10	10,86
6	1500005632	9841292	783850	16,12	10,43	5,69
7	1500002146	9841550	783560	19,46	6,2	13,26
8	1500002144	9842300	783610	22,01	6	16,01
9	1500006791	9843231	780822	9,00	3,85	5,15
10	1500006517	9843385	780698	9,00	4,4	4,6
11	1500005666	9844030	781256	6,95	1,73	5,22
12	1500006639	9844369	779741	10,89	3	7,89
13	1500006113	9844462	779741	8,01	3,5	4,51
14	1500006093	9846765	781661	14,26	4,22	10,04

Na figura 50 a maior parte da área monitorada apresenta profundidade do lençol freático em torno de 8,5 metros. Essa baixa profundidade, aumenta a vulnerabilidade do aquífero livre e o uso desordenado de exploração dessas águas, uma vez que existe maior facilidade para se construir poços artesanalmente, fora dos padrões estabelecidos pelas normas técnicas de construção de poços.

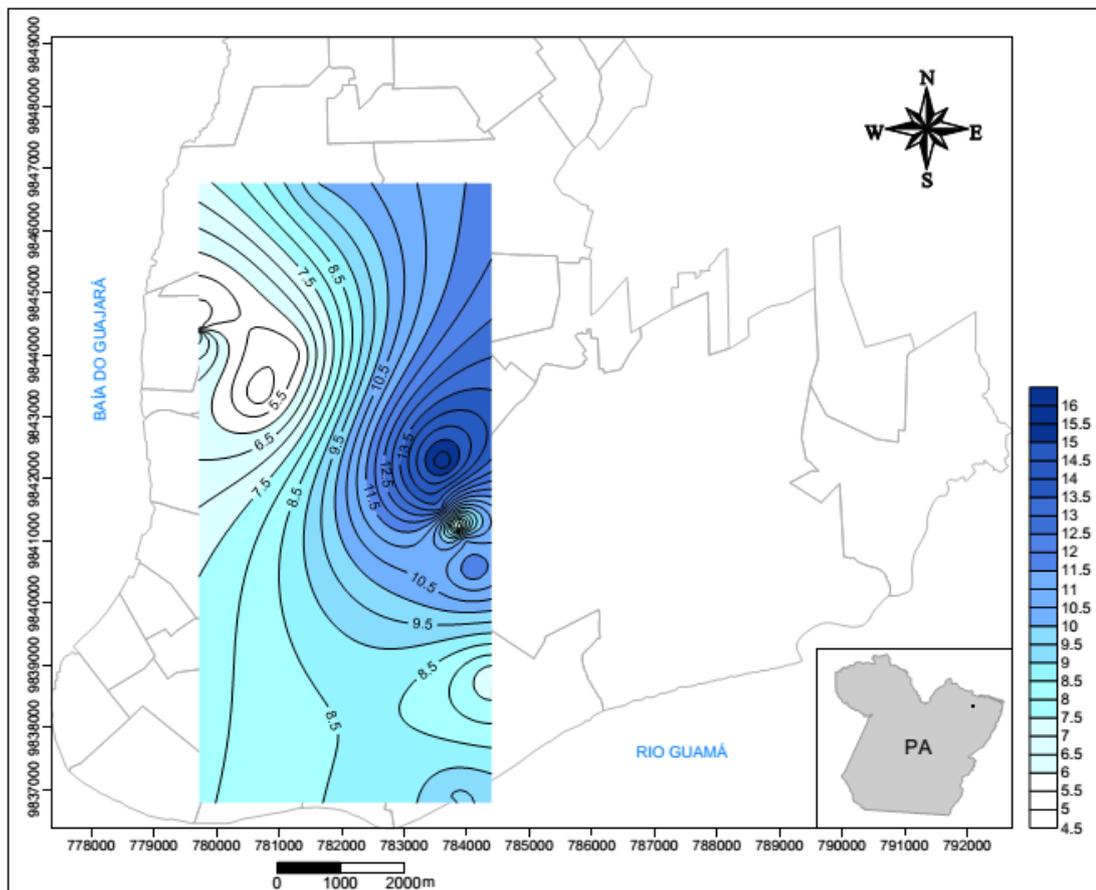


Figura 50 - Mapa de isolinhas equipotenciais hidráulicas do Barreiras na área. Fonte: Do autor.

Em relação ao comportamento do fluxo, conforme as figuras 51 e 52 pode-se identificar uma zona de recarga, onde os poços estão distribuídos aleatoriamente ao longo do lineamento NE/SW para os blocos 2 e 6, mesma direção de um dos principais lineamentos identificados, no caso o ígarapé São Joaquim que limita esses blocos e que possui direção de fluxo principal para NE, o que reflete a influência da estruturação neotectônica sobre o fluxo subterrâneo. E também, outra zona de recarga no sentido NW/SE para os blocos 8 e 9, referente a um dos principais eixos da bacia do rio Guamá. Ou seja, estes blocos possuem linhas de fluxo em direção ao Rio Guamá de acordo com as figuras 51, 52 e 53.

Verifica-se que estas zonas de recarga são caracterizadas por vetores de fluxo representados pelas setas divergentes, que é o indicativo provável de movimentação e/ou sentido das falhas. E ainda, uma zona de descarga de fluxo hídrico é observada entre os blocos 3 e 4 caracterizada pelas setas convergentes no mapa.

Portanto como mostrado anteriormente, no contexto regional estas zonas de recarga e descarga estão associadas às direções estruturais NNW-SSE e NE-SW das faixas Gurupi e Araguaia, respectivamente.

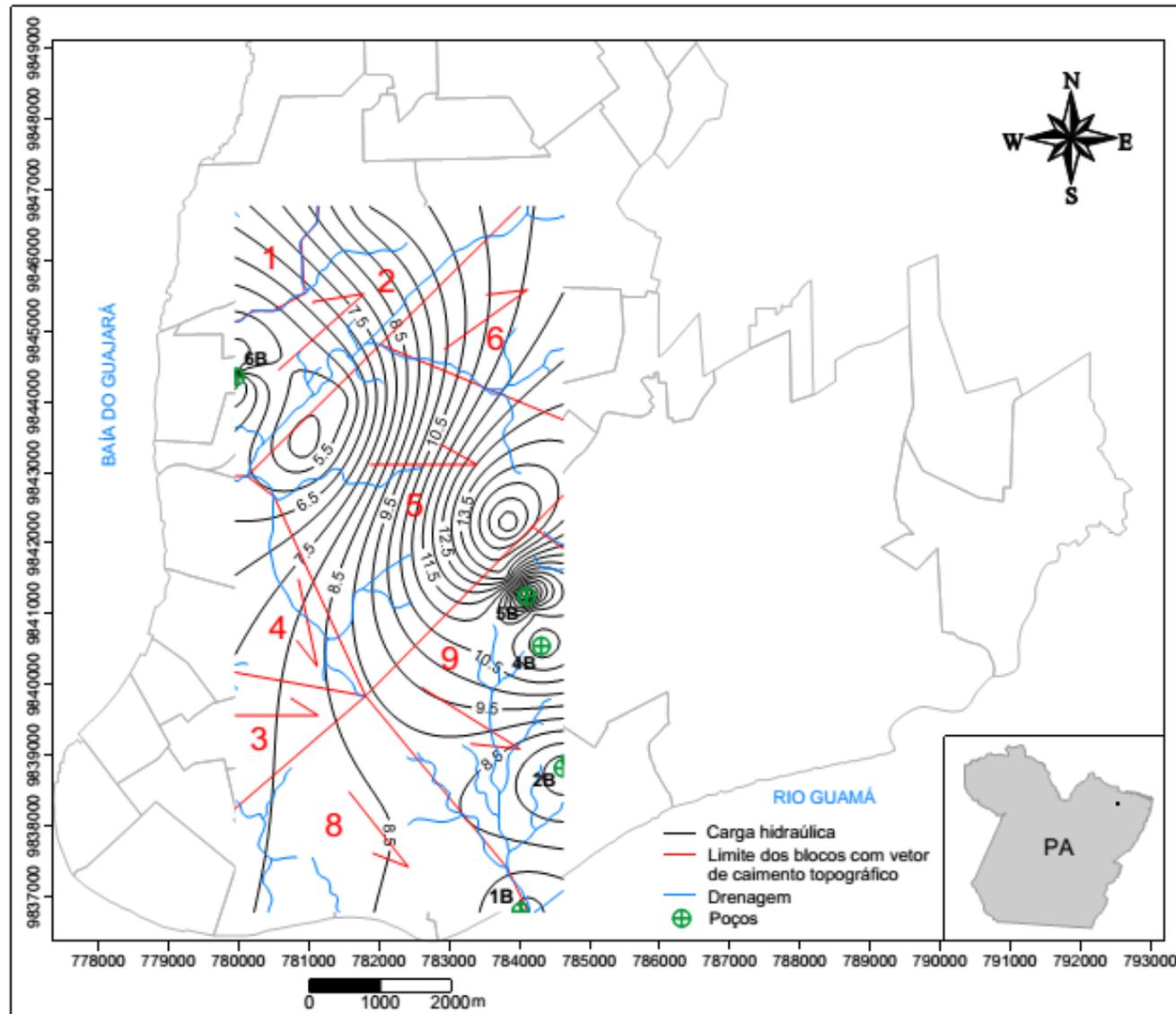


Figura 51 - Mapa de Fluxo Subterrâneo da área mostrando as linhas equipotenciais para carga hidráulica no Barreiras. Fonte: Do autor.

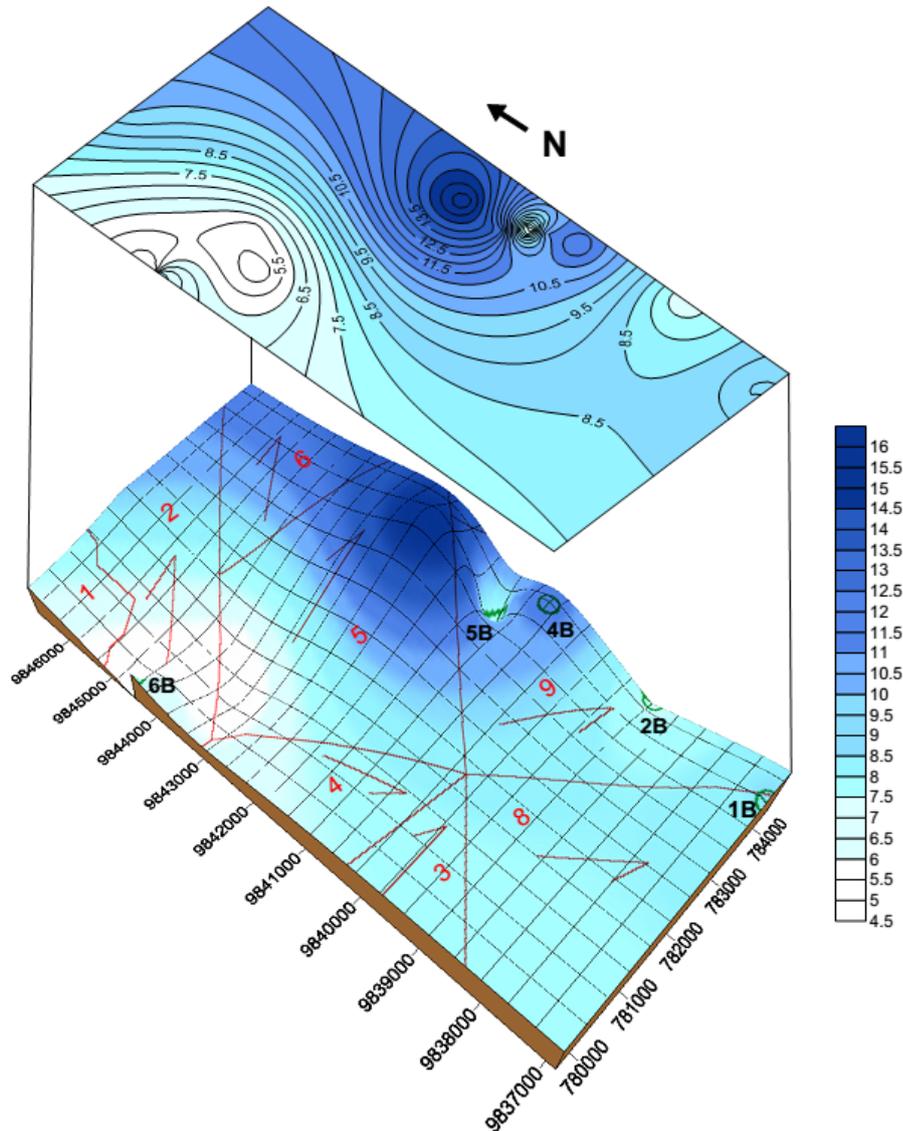


Figura 52 - Bloco diagrama de fluxo subterrâneo da área para o aquífero Barreiras. Fonte: Do autor.

A Figura 53 apresenta o comportamento da superfície potenciométrica em relação ao relevo. Nota-se que em alguns blocos o fluxo acompanha a inclinação do mesmo, porém nos blocos 5 e 6, isso não acontece visto que o sentido do fluxo ocorre da superfície mais baixa para a mais elevada, isso pode ser devido a influência da elevação do nível d'água no escoamento ou da pressão do mesmo, pois neste último caso, ao observar a faixa e/ou superfície potenciométrica destes blocos, percebe-se que ela se assemelha com a dos poços 1B e 2B que possuem aquíferos confinados.

Nos aquíferos livres a recarga ocorre por infiltração direta da água da chuva, principalmente nas áreas de altos topográficos de blocos.

É observado também que o poço 4B apresenta a maior profundidade do nível freático aproximadamente 12 m.

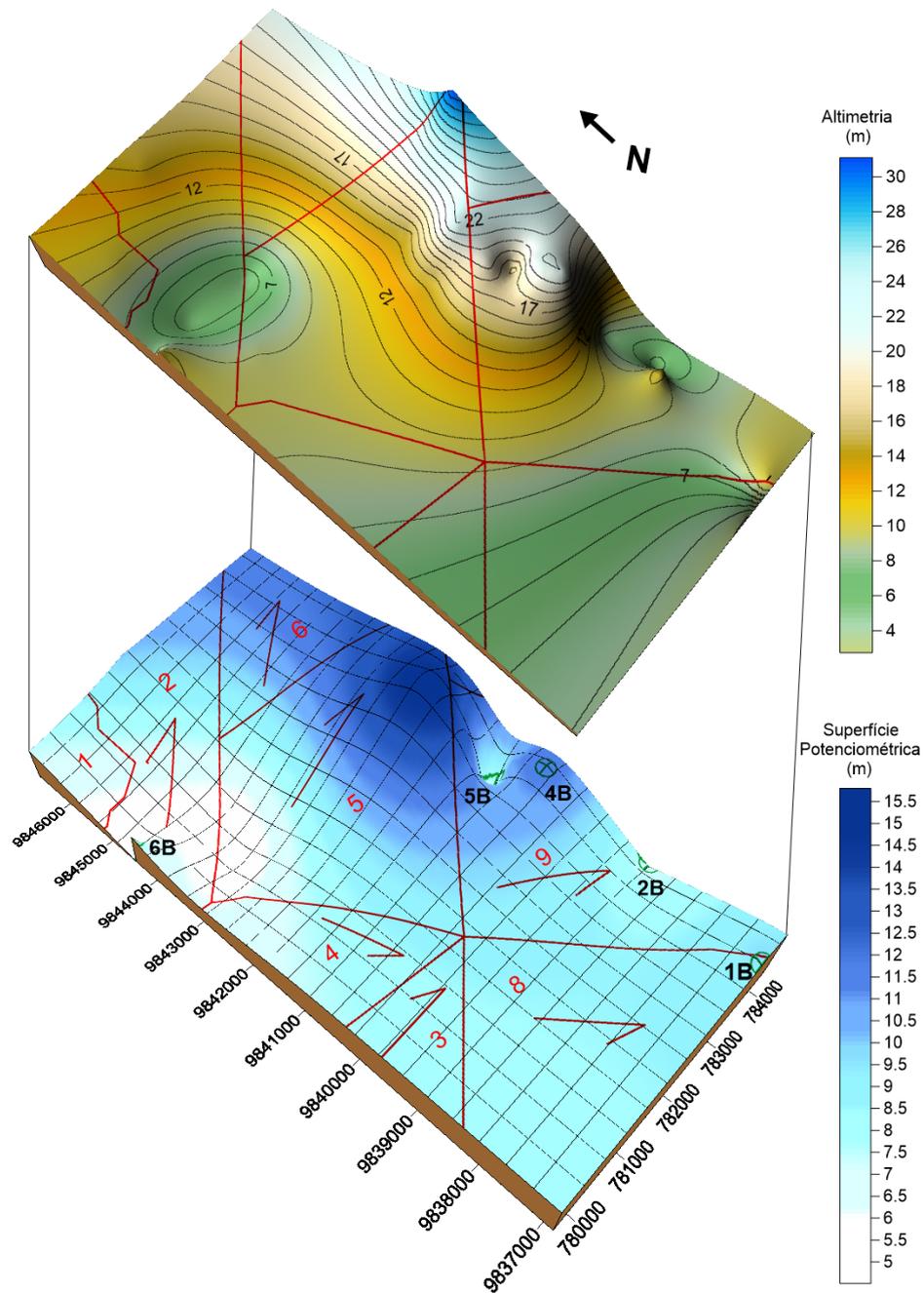


Figura 53 - Bloco diagrama de fluxo subterrâneo e topografia da área para o aquífero Barreiras. Fonte: Do autor.

4.6.2 Aquífero Pirabas

A tabela 9 apresenta os dados que foram obtidos para os poços deste aquífero e que auxiliaram na construção dos mapas (Figuras 54 e 55), e os blocos diagramas com as características geométricas da superfície freática para este aquífero (Figuras 57 e 58).

Tabela 9 - Dados cadastrados de poços do Pirabas na área. Fonte: SIAGAS/CPRM.

.Poços	Ponto SIAGAS	UTMN	UTME	Cota (m)	NE (m)	Carga Hidráulica
1	*	9836806	783629	2,62	9,69	-7,07
2	1500001963	9838781	784368	7,25	5,60	1,65
3	1500001959	9838918	784302	11,25	8,41	2,84
4	1500001950	9838980	784471	6,59	4,00	2,59
5	1500001962	9839006	784453	4,43	3,50	0,93
6	1500001960	9839918	784302	7,59	10,50	-2,91
7	1500005376	9842092	783110	14,96	17	-2,04
8	1500002040	9842870	783440	14,92	18	-3,08
9	*	9843430	784918	31,24	30,48	0,76
10	*	9843676	784585	23,86	30,07	-6,21
11	1500002049	9844550	781550	4,96	11,25	-6,29
12	1500002054	9844619	780450	5,29	12,83	-7,54
13	1500002001	9845963	780270	10,00	12	-2
14	*	9847184	783135	16,44	34,7	-18,26

* >Poços Femac-Geosolo.

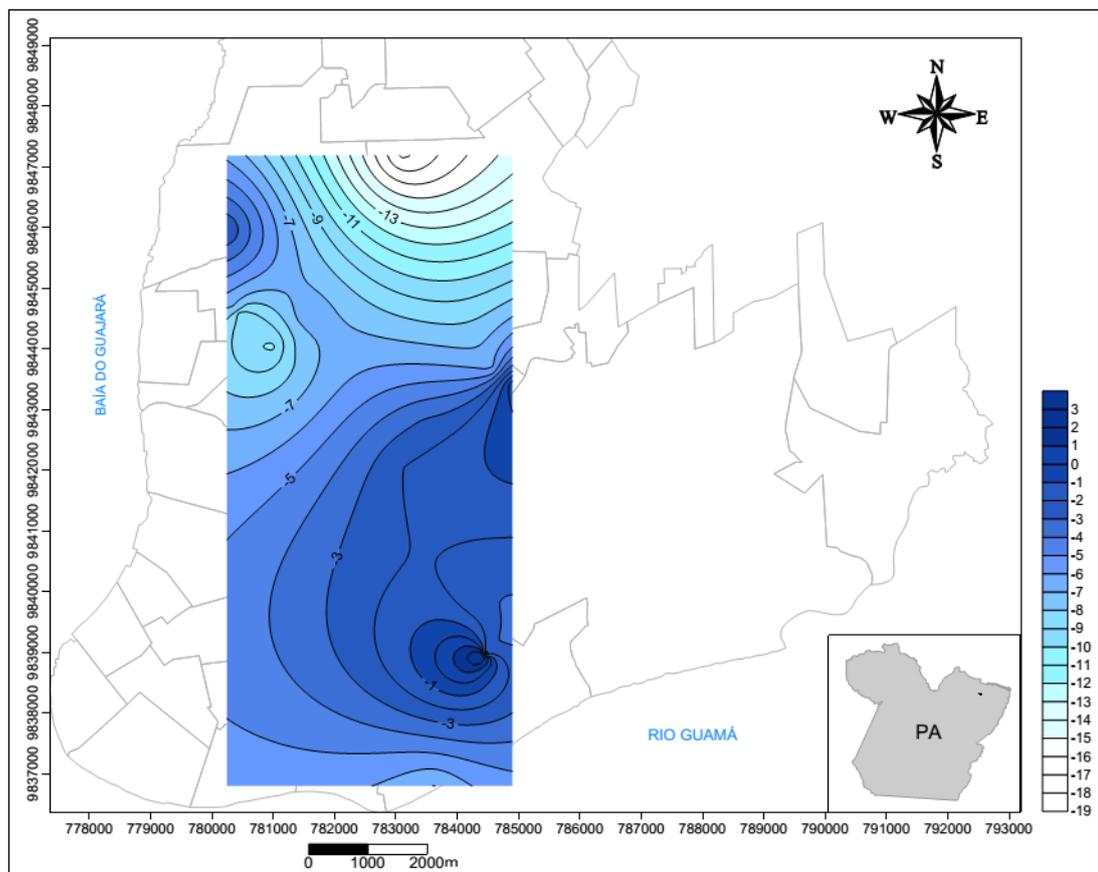


Figura 54 - Mapa de isolinhas equipotenciais hidráulicas do Pirabas na área. Fonte: Do autor.

O comportamento de fluxo na área é semelhante ao do aquífero Barreiras como mostra as figuras 55 e 57, pois apresenta a mesma zona de recarga de direção NE/SW (blocos 2 e 6) e NW/SE (blocos 8 e 9), e também a mesma zona de descarga (blocos 3 e 4). Então, pode-se

afirmar que essas semelhanças entre estes aquíferos se deve a um forte controle estrutural que está associado ao processo de evolução neotectônico regional caracterizado por transcorrência, com componente transtensiva NE-SW, onde se desenvolveram falhas normais na direção NW-SE com mergulhos no sentido NE (Costa et al., 1996).

As superfícies potenciométricas destes blocos são limitadas, na parte interna da área, pelas drenagens dos igarapés Val-de-Cães (blocos 1 e 2), São Joaquim (blocos 2 e 5 / 2 e 6), Água Cristal (blocos 5 e 6), Galo (blocos 4 e 5) e tributários do Tucunduba (blocos 8 e 9) que evidencia um controle da topografia em relação a essas superfícies, que resulta da estruturação em blocos (Figura 55).

Os poços 6P (AP-P2) e 7P estão localizados em área de fronteira de blocos como mostra a figura 55, ou seja, limitados por falha. Sendo assim estes podem sofrer mistura de água entre os aquíferos rasos a profundos, conforme mostra a figura 56 elaborado por Palheta (2008).

Com base nisso, é possível afirmar que os aquíferos semi-confinado (poço 6P) e confinado (poço 7P) podem apresentar interconexão com outros aquíferos por meios dessas zonas de circulação de água promovida pelas zonas de fraqueza, aonde se instalaram falhas trativas ou superfícies potenciais de menor pressão. Isto é, essas falhas constituem locais de maior favorabilidade para recarga dos sistemas hidrogeológicos, que mesmo não aflorando na área, são abastecidos por águas pluviais e drenagens controladas pelas mesmas, por drenança vertical descendente.

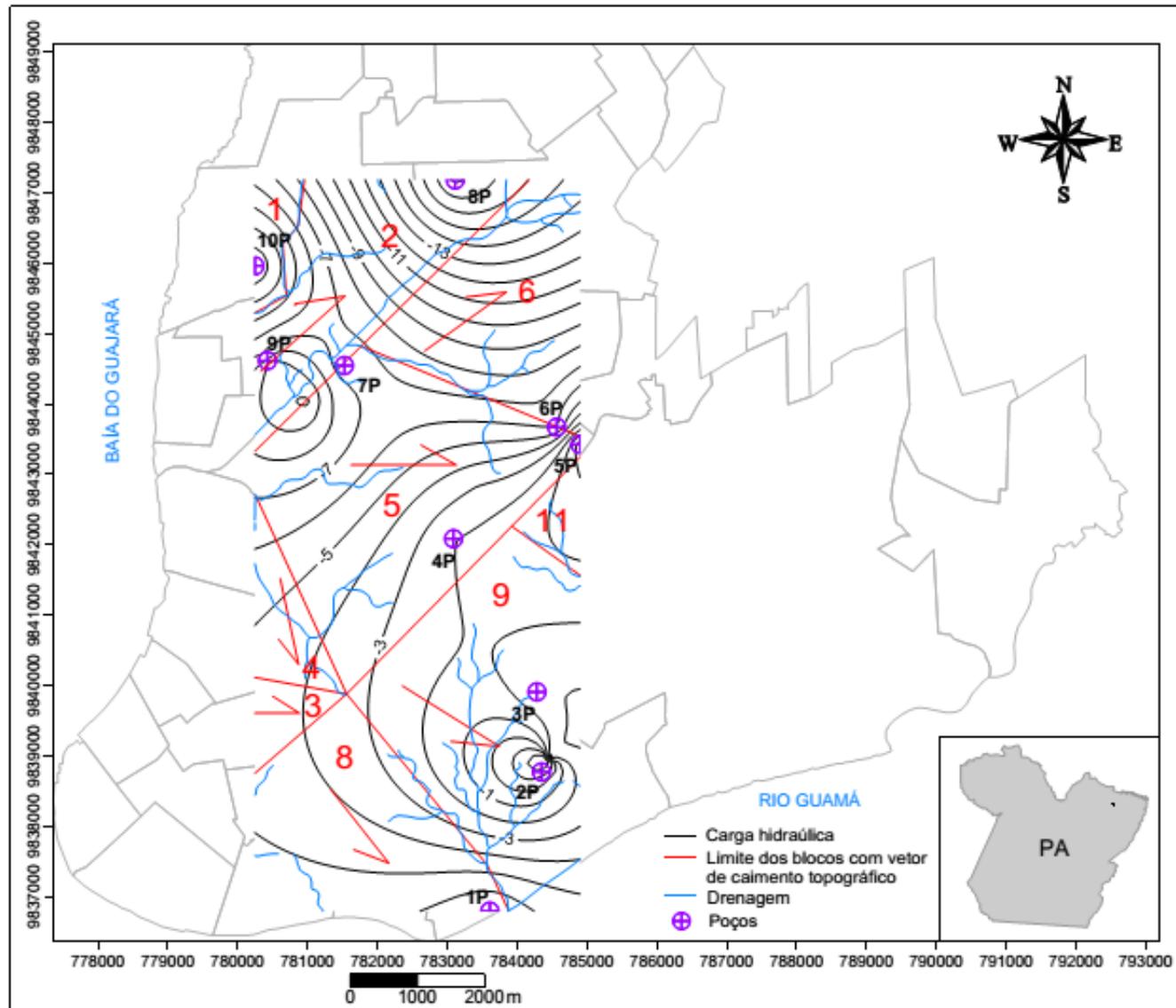


Figura 55 - Mapa de Fluxo Subterrâneo da área mostrando as linhas equipotenciais para carga hidráulica no Pirabas. Fonte: Do autor.

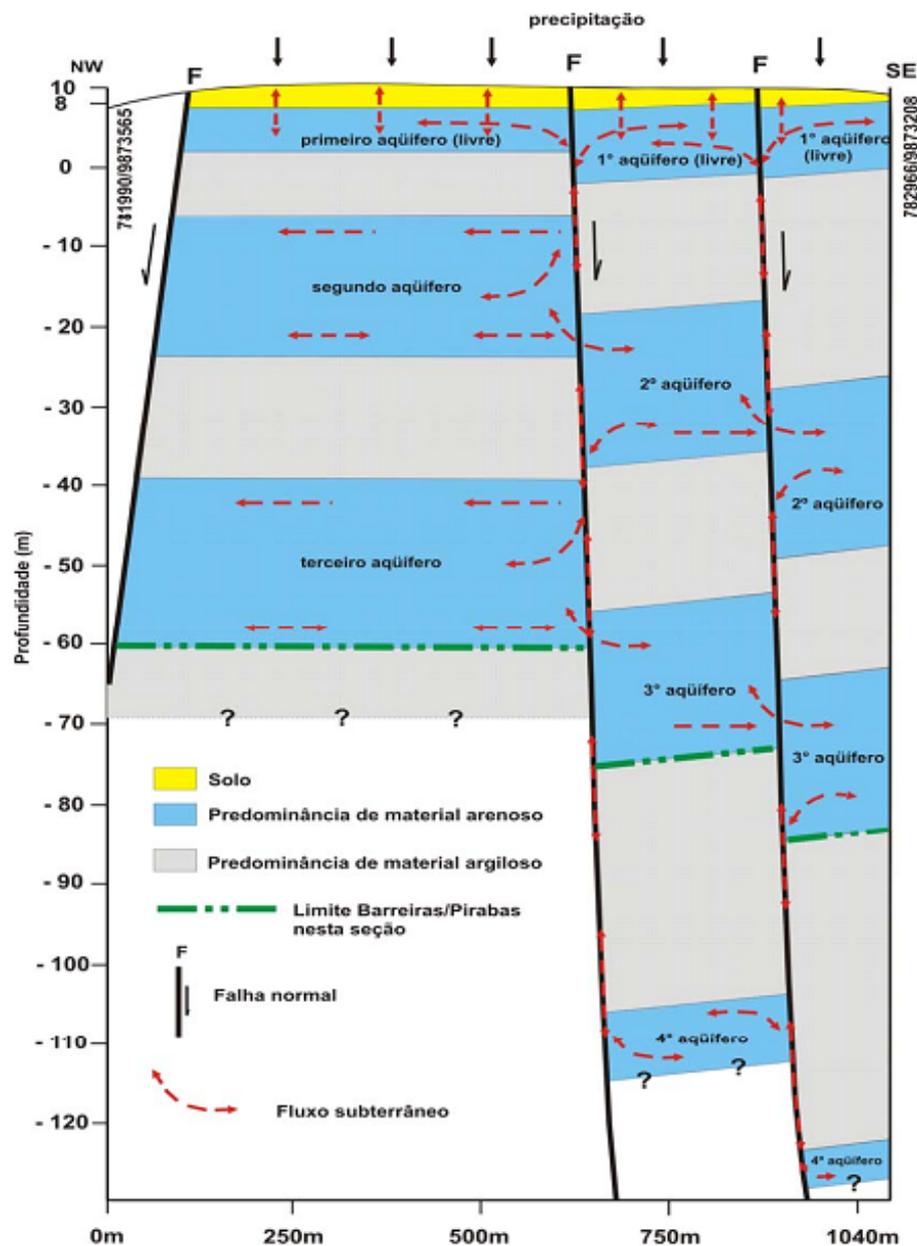


Figura 56 - Modelo proposto para o mecanismo de recarga e fluxo subterrâneo dos aquíferos rasos (infiltração direta) e intermediários (infiltração através de falhas trativas). Fonte: Palheta 2008.

Os poços 1P e 5P (AP-P1) estão situados em área próxima ou mesmo sobre zona de falhamento e, portanto, as camadas aquíferas presentes nestes podem sofrer influência direta dessas falhas.

Os poços mais produtivos 8P, 1P, 9P e 4P com vazões de 340 m³/h, 250m³/h, 211 m³/h e 210 m³/h, respectivamente encontram-se localizados às proximidades ou nas zonas de recarga NE-SW. Neles as vazões provavelmente sofrem influência da maior favorabilidade da recarga e da circulação de águas, justamente pela incidência em maior grau de penetrabilidade dessas discontinuidades mecânicas (falhas e fraturas).

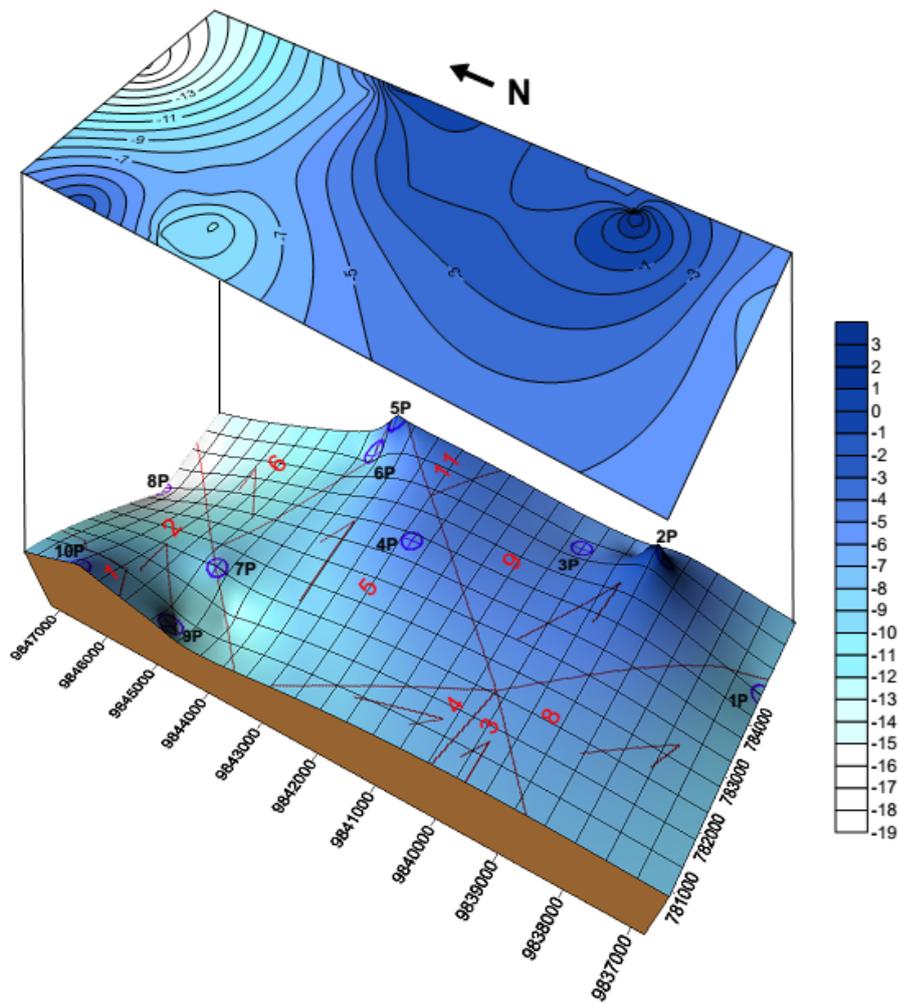


Figura 57 - Bloco diagrama de fluxo subterrâneo da área para o aquífero Pirabas. Fonte: Do autor.

Um comportamento semelhante ao observado no aquífero Barreiras para a superfície potenciométrica em relação ao relevo, foi também verificado no Pirabas para os mesmos blocos 5 e 6 e também para o bloco 9 (Figura 58), sofrendo as mesmas influências descritas anteriormente para o aquífero Barreiras. Assim pode-se presumir que estes vetores de fluxo principal vão ser função da deposição espacial desses blocos e do arranjo das camadas dentro dele.

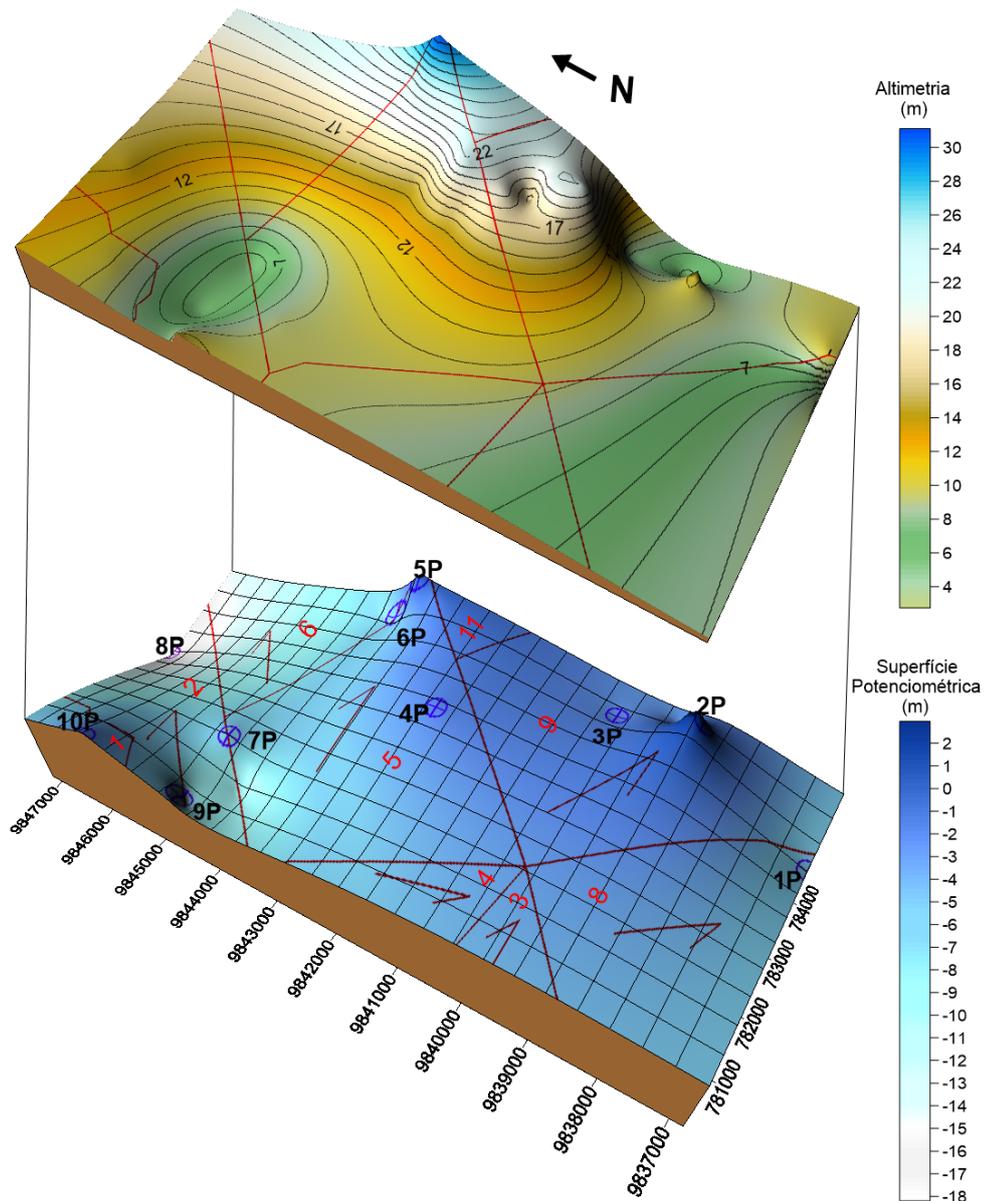


Figura 58 - Bloco diagrama de fluxo subterrâneo e topografia da área para o aquífero Pirabas. Fonte: Do autor.

Segundo Palheta (2008) as diferentes estruturas identificadas e suas direções implicam a compreensão do arranjo geométrico-espacial das diversas camadas em subsuperfície. Deste modo, estas estruturas interferem na posição dos diversos aquíferos, que se re-arranjam por meio de blocos soerguidos, rebaixados e deslocados, os quais são fatores que influenciam fortemente no mecanismo de fluxo subterrâneo e as condições de recarga, como observado neste estudo.

Considerando-se os estudos já realizados na RMB; o quadro de evolução geotectônica no qual a área está inserida, caracterizado por falhas normais com direção NW-SE, correspondentes à transtensão vinculada à atuação de sistemas transcorrentes dextrais; que não há possibilidade de recarga dos sistemas aquíferos do Pirabas, por não existir ocorrência

de afloramentos de rochas permoporosas da Formação que o nomeia; que a argilosidade das várias camadas superiores a este sistema dificulta a infiltração vertical de água; é bastante provável que esse sistema aquífero tenha a sua recarga relacionada à:

- a) contribuição das águas do estuário guajarino que se conectam ao sistema aquífero por camadas permo-porosas e zonas trativas.
- b) infiltração a partir de águas pluviais em zonas trativas *in loco*.
- c) contribuição das águas pluviais a partir das áreas de afloramento desse sistema, na região Nordeste do Pará.

Na figura 59 (B1 e P1) se apresenta o modelo clássico de mapa de fluxo, conforme sugerido por alguns autores e destacadamente por Palheta (2008). Um aprimoramento pode ser feito nesse modelo considerando que ele não leva em conta o mapa de vetor de caimento topográfico e todos os processos que envolvem a estruturação tectônica na qual a área ou região foi submetida e, portanto, esses mapas não representam de forma plausível o que está ocorrendo nelas.

De modo que a figura 60 (B2 e P2) desenvolvida neste estudo leva tudo isso em consideração, a partir da utilização das ferramentas de análise estrutural para a elaboração de mapa de fluxo e por isso, é mais adequada para uma análise e interpretação. Visto que considera então, o conhecimento geométrico-cinemático dos sistemas aquíferos da região nordeste do Pará, possibilitando uma melhor compreensão do comportamento e influência desses no mecanismo de circulação e recarga dos sistemas aquíferos.

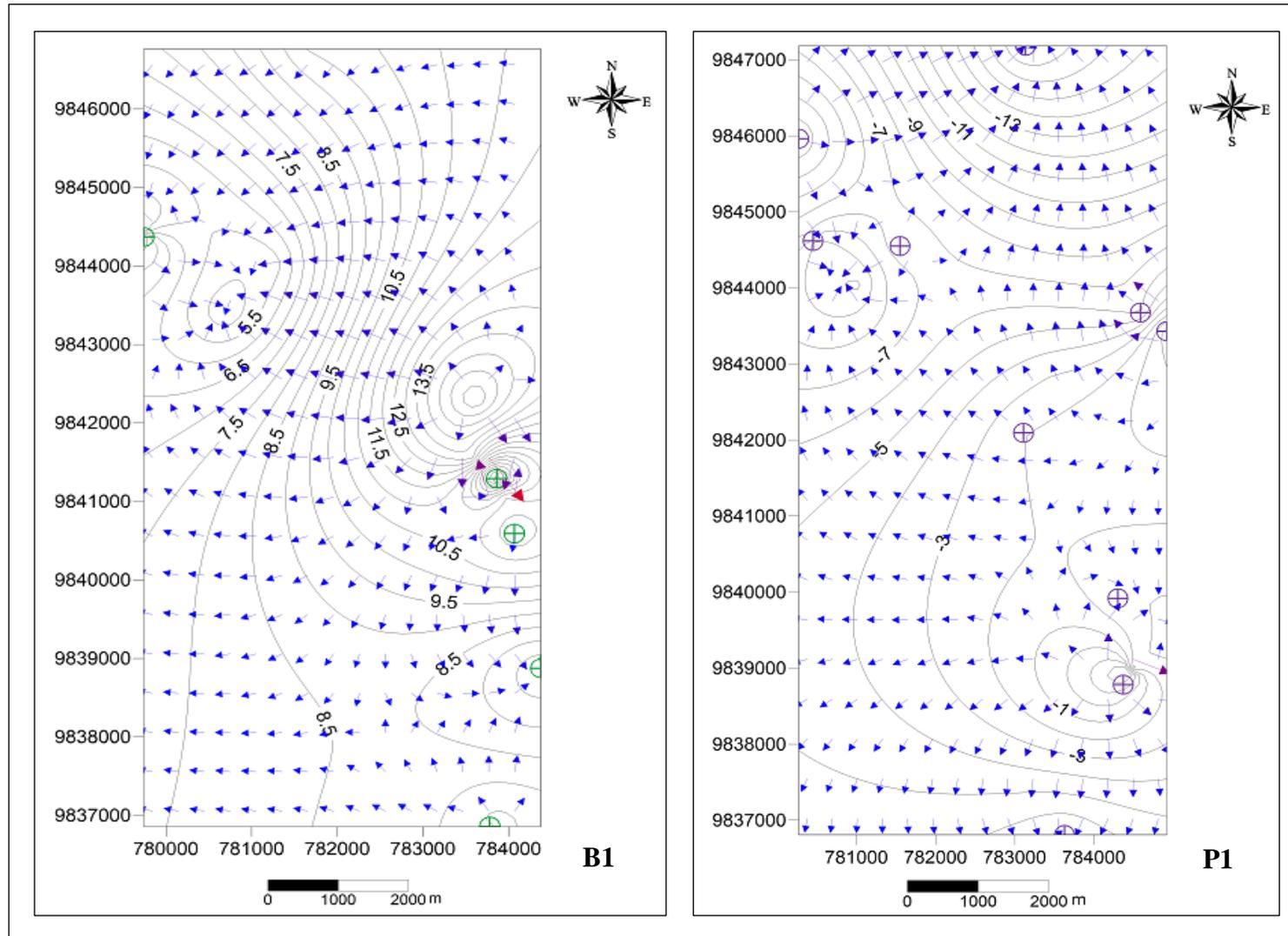


Figura 59 - Modelo clássico de mapa de fluxo subterrâneo utilizado por outros autores, B1- Barreiras e P1- Pirabas. Fonte: Do autor.

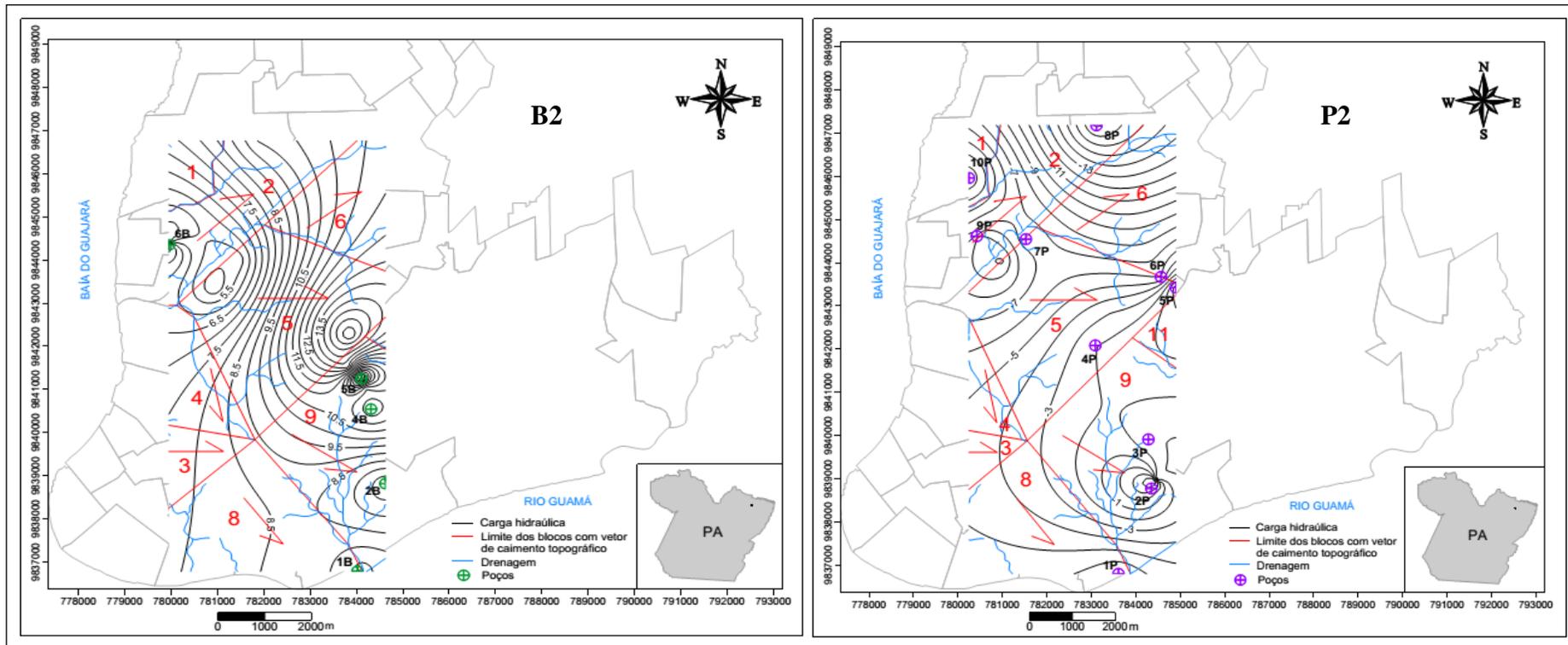


Figura 60 - Modelo de mapa de fluxo subterrâneo sugerido neste estudo, B2- Barreiras e P2- Pirabas. Fonte: Do autor.

5 ARCABOUÇO SINTÉTICO DOS RESULTADOS DA PESQUISA

A partir da integração de dados e informações, interpretação dos mesmos, acrescidos de resultados obtidos referentes a esse estudo pode-se destacar os seguintes estratos sintéticos a cerca da pesquisa realizada:

- O quadro tectono-estrutural da região materializa os seus primeiros arranjos ainda no Arqueano/Proterozóico, avança pelo Paleozóico/Mesozóico e se delinea de forma final a partir do Mioceno no contexto da evolução neotectônica. Essa configuração permitirá configurar uma série de blocos arqueanos delimitados por estruturas NW-SE e NE-SW.

- Descontinuidades mecânicas reveladas por essa análise se compatibilizam em um modelo de cisalhamento simples, rotacional de movimentação dextral E-W, configurando um compartimento transtensivo na região nordeste do Pará com a ocorrência de falhas NW-SE e NE-SW, semelhante as das sub-bacias a qual estão inseridas, a exemplo o rio Mocajatuba e os igarapés Val-de-Cães e Una, nas quais se encaixam.

- As orientações N30°-40°E e N40°-50°E representam, as direções dominantes das principais drenagens da área indicadas pelo igarapé São Joaquim e rios Maguariaçu, Mocajatuba e Aurá, concordante com a da Baía do Marajó. Essas descontinuidades nas suas intercalações formatam blocos morfoestruturais.

- Estes permitem a compartimentação da área em três setores de blocos morfoestruturais (totalizando 20 blocos): o Setor 1 localizado na porção N a NW da área, não possui uma forma geométrica regular bem definida e o vetor de caimento topográfico é variado, evidenciado pelo padrão da rede de drenagem. O Setor 2 com blocos bem definidos, é o mais representativo deles. Ali os blocos losangulares a retangulares localizados na parte S e SE da área tem vetor de caimento topográfico para NW. O Setor 3 na porção S a SW da área, com blocos mal definidos geometricamente com caimento do vetor topográfico para NW-SE e E-W se refere ao eixo principal da bacia do Rio Guamá.

- O padrão geométrico-cinemático de acordo com o modelo de *Riedel* mostrou que o Setores 2 e 3 apresentam movimentação dextral, com direção NW-SE que configura a de maior estiramento (σ_3) e falhas normais de direção NE-SW. E no Setor 1 a movimentação é sinistral com direção NW-SE de maior estiramento e também falhas normais de direção NE-SW.

- A individualização dos lineamentos em setores morfoestruturais permitiu observar que a direção N40°-50°E é predominante em todos os domínios.

- Dessa evolução geométrica-cinemática resultou a configuração da área de estudo em três unidades morfológicas principais: planícies fluviais, caracterizada por sistema de relevo de agradação e, colinas pediplanizadas e colinas de topos aplainados, por sistema de relevo de degradação.

- Para os poços analisados que captam água somente do sistema hidrogeológico Barreiras, o sistema é observado a uma profundidade de até 150 m (base da camada aquífera), caracterizado como semi-confinado a confinado e média de 29 m de espessura. Enquanto, o sistema Pós-Barreiras ocorre a uma profundidade de até 24 m (base), caracterizado como livre a semi-confinado, com espessura média de 14 m.

- Já nos poços que fazem captação de água subterrânea do sistema hidrogeológico Pirabas, o sistema é observado a uma profundidade de no mínimo 69 m (topo) até 271 m (base), considerado semi-confinado a confinado com espessura média de 114 m. E o sistema Barreiras ocorre a uma profundidade média de 90 m a base, alcançando até 113 m de profundidade desta, com espessura média de 31 m, caracterizado também como semi-confinado a confinado.

- A análise dos perfis litológicos e a correlação entre eles mostraram que a disposição das camadas de rochas sofrem influência de deslocamentos como foi verificado para o poço 6P, com rejeitos verticais que alcançam mais de 50 m. Podendo esses rejeitos obstruírem parcial ou totalmente a possibilidade de fluxo hídrico horizontal para algumas camadas aquíferas.

- A indicação de falhas normais, seja pela ocorrência de variação lateral das espessuras de camadas litológicas, como também o desaparecimento dessas em corte de falha, a exemplo do que foi observado no poço 6P para a camada de calcarenito em relação ao poço 5P.

- Com base na interpretação dos perfis em termos litológicos, tem-se o seguinte: Pirabas - constituído por calcários, calcarenitos e margas (calcário contendo aproximadamente 35 a 60% de argilito), intercalados com folhelhos cinza-esverdeado, arenitos calcíferos, arenitos argilosos e arenitos. E o Barreiras - composto por arenitos de granulometria variada, argilosos, intercalados a siltitos e argilitos, com presença de lentes de concreções ferruginosas.

- Os blocos morfotectônicos refletem baixos e altos estruturais com mergulhos de planos de falhas que os limitam no sentido NE e SW resultantes da interação das falhas normais com as transcorrentes. Esses arranjos controlam o mecanismo de fluxo subterrâneo e

as condições de recarga como observado neste estudo através dos resultados na análise de dados de produção de poços.

- A integração das informações obtidas permitiu indicar a influência de zonas de recarga nos blocos do SABP, ao longo dos lineamentos NE/SW e NW/SE caracterizadas por vetores de fluxo hídrico divergente. E ainda, uma zona de descarga entre os blocos 3 e 4 caracterizada por fluxo hídrico convergente.

- A geometria, a configuração dos blocos e a postura espacial das camadas geológicas apresentam características diferenciadas e, portanto a correlação entre os poços situados em blocos diferentes deve ser analisada com atenção. As correlações destas podem induzir a erros em relação ao mergulho das camadas e assim à continuidade lateral das mesmas.

- Visto que a Baía do Marajó tem influência direta na Baía do Guajará que limita a porção oeste da área estudada, é mais provável que a água adicionada à contribuição de água fluvial da baía do Marajó, infiltra-se no subsolo, penetra e interage com as diversas camadas de profundidades distintas, ativamente por meio de fraturas/falhas não preenchidas e, secundariamente, pelos poros, principalmente nas áreas distensivas, que servem como condutores na conexão vertical.

- Portanto, a área de estudo está inclusa no contexto de um sistema hidrogeológico regional com zonas direta de recarga por meio de infiltração de água de chuva, como também através de zonas estruturais equivalentes aos limites dos blocos morfotectônicos, que representam as zonas potenciais de circulação e, comunicação implicando na mistura das águas entre o aquífero livre, intermediários e confinados.

- Em outras palavras, pode se considerar que os mecanismos gerais da recarga ocorrem por meio do princípio físico dos vasos comunicantes, ou seja, se a água estiver em equilíbrio com o sistema geológico e em uma determinada área ou porção, essa água apresentar uma pressão maior ela vai tentar equilibrar com a área aonde possui uma pressão menor. Porém, nesse sistema de vasos comunicantes, há uma recarga por meio da água de chuva em determinados locais. Então, se os vasos comunicantes estão em equilíbrio, e essa comunicação entre os vasos é desestabilizada em algum lugar essa água irá fluir do local aonde tem pressão para água que não tem pressão, e assim o mecanismo de circulação dessa recarga irá tender a reestabelecer o equilíbrio.

- No entanto, isso pode acarretar em áreas potencialmente condutoras de água de boa qualidade ou não, considerando-se que os aquíferos mais próximos à superfície do terreno

estão mais vulneráveis à contaminação, proveniente de atividades antrópicas podendo comprometer então os sistemas aquíferos mais profundos, a exemplo do Pirabas, caracterizado como o melhor sistema para captação de água de boa qualidade.

Essa vulnerabilidade pode também não estar relacionada apenas a contaminação ou parâmetros de qualidade das águas subterrâneas, mas também a quantidade de água, devido a uma superexploração do sistema aquífero. Por isso, a proteção dos aquíferos contra as principais cargas contaminantes, é primordial tendo-se em vista o atual crescimento das demandas de água subterrânea (Matta, 2011).

A carga contaminante disponível no meio físico, relacionada a diferentes atividades antrópicas e o grau de vulnerabilidade natural dos sistemas aquíferos, são fatores de interação com o risco potencial de contaminação/poluição das águas subterrâneas (Matta, op cit.).

É atribuído em geral um conjunto de fatores para os processos que ocorrem na interação das águas subterrâneas com as possíveis cargas contaminantes de acordo, com Mestrinho (1995), sendo esses:

- Composição e volume da água que abastece o aquífero;
- Tipo de ambiente geológico de superfície e subsuperfície;
- Características hidrogeológicas do aquífero como: porosidade, permeabilidade, volume armazenado, velocidade de fluxo, etc;
- Características inerentes à água tais como: pH, solubilidade, agressividade, etc;
- Reações químicas e biológicas que acontecem dentro do próprio sistema de fluxo;
- Características climáticas: pluviometria, evaporação, evapotranspiração, variação de temperatura.

Assim, segundo Cavalcante (1998, p.144):

A gestão dos riscos significa selecionar e avaliar os instrumentos legais e institucionais disponíveis para se corrigir, mitigar e prevenir os efeitos danosos associados às ações antrópicas que afetam os sistemas aquíferos como parte do meio ambiente.

- Contudo, é importante ressaltar que é inadequada a elaboração de mapa de fluxo de uma área e/ou região sem levar em consideração os aspectos geométricos cinemáticos a que os sistemas hidrogeológicos estão submetidos, como foi realizado anteriormente em outros estudos por alguns autores.

6 CONCLUSÃO

- ❖ Existe conexão hidráulica entre os sistemas aquíferos demonstrados pela:
 - ✓ Variação das espessuras de camadas litológicas associadas à ocorrência de zonas trativas (falhas);
 - ✓ Disposição dos blocos morfotectônicos em baixos e altos estruturais com mergulhos de planos de falhas que os limitam no sentido NE e SW, resultantes da interação das falhas normais com as transcorrentes, no qual esses arranjos são responsáveis pelo controle do mecanismo de fluxo subterrâneo e as condições de recarga;
 - ✓ Zonas estruturais equivalentes à fronteira dos blocos morfotectônicos, que expressa às zonas potenciais de circulação e, comunicação implicando na mistura das águas entre os sistemas aquíferos;
 - ✓ Análise estrutural realizada, que considerou os elementos geométrico-cinemático dos sistemas aquíferos da área e os demais processos relacionados a essa estruturação neotectônica;
- ❖ Há uma reestruturação geométrica dos corpos geológicos representativos das formações Barreiras e Pirabas configurada pela formação de blocos tectônicos limitados por falhas que imprimem movimentos laterais e verticais, que influenciam os mecanismos de recarga e circulação dos sistemas aquíferos o que torna esse processo bastante complexo em suas definições.
- ❖ Os tensores tectônicos atuantes a partir do Mioceno e o arcabouço estrutural herdado da história evolutiva dessa região em que a área de pesquisa se insere, são responsáveis pelo arranjo geométrico-cinemático da área, o qual inserido no esquema de cisalhamento não coaxial de *Riedel* permitiu definir zonas trativas, na direção NE-SW, sítios principais de recarga dos sistemas aquíferos aqui presentes.
- ❖ A composição de mapas potenciométricos e de fluxo, em áreas compostas por meios geológicos homogêneos não podem ser feitas sem o concurso da análise estrutural, sob pena de serem cometidos erros na elaboração dos mesmos e assim de interpretações hidrogeológicas equivocadas. Assim, há que se rever as metodologias para a elaboração desses importantes instrumentos de análise hidrogeológica.
- ❖ Por fim, incorporar nos estudos hidrogeológicos as ferramentas da análise estrutural é fator determinante para se chegar a resultados muito mais eficazes na consideração dos mecanismos de circulação, recarga e descarga de sistemas aquíferos.

REFERÊNCIAS

- Abreu, F.A.M. 2010. Plano de gestão das águas subterrâneas da Região Metropolitana de Belém – RMB. In: Banco Mundial – ANA. *Relatório Técnico*: Produto 04.
- Abreu, F.A.M.; Gorayeb, P.S.S.; Hasui, Y. 1994. Tectônica e inversão metamórfica no Cinturão Araguaia. In: SBG, 4º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. *Resumos expandidos*. p. 1-4.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992a. *NBR12211*: Estudos de concepção de sistemas públicos de abastecimento de água. Rio de Janeiro, 14p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992b. *NBR12212*: Projeto de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 5p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992c. *NBR12214*: Projeto de sistema de bombeamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 15p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992d. *NBR12216*: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 18p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. 1992e. *NBR12244*: Construção de poço para captação de água subterrânea. Rio de Janeiro, 6p.
- Ackermann, F.L. 1964. Geologia e fisiografia da região bragantina – Estado do Pará. *Cadernos da Amazônia*, **21**(2):1-90.
- Ackermann, F.L. 1969. *Esboço para Geologia entre a cidade de Belém - Rio Gurupi Atlântico – Rio Guamá*. Belém: Imprensa Universitária do Pará, 90p.
- Ackermann, F.L. 1976. *A Formação Pirabas, sua evolução e interpretação*. Belém, Imprensa Universitária – Universidade Federal do Pará, 83p.
- Allmendinger, R.W. 1999. *Introduction to structural geology*. Cornell: Department of Geological Sciences, Cornell University. Disponível em: http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/RWA/GS_326/_Media/lecture_01-20.pdf. Acesso em: 08 abr. 2016.
- Almaraz, J.S.U. & Formoso, M.L.L. 1971. Contribuição ao ambiente da Formação Pirabas – mineralogia de argilas. In: SBG, 25º Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo. *Anais*. p. 247-264.
- Almeida, F.F.M. 1978. A evolução dos cratões Amazônico e do São Francisco comparada com seus homólogos do Hemisfério Norte. In: SBG, 30º Congresso Brasileiro de Geologia. Recife. *Anais*. v. 6, p. 2393-2407.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y.; Brito Neves, B.B. 1976. The Upper Precambrian of South America. *Boletim Instituto de Geociências USP*, **7**: 45-80, (Série Científica, 7).

Alvarenga, C.J.S. de M., C. A. V, Gorayeb, P. S. D. S., Abreu, F.A.M. 2000. Paraguay and Araguaia Belts. *In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. & Campos, D.A. (Ed.). Tectonic Evolution of South America*. Rio de Janeiro: 31° International Geological Congress, p. 183-193.

Anderson, E.M. 1942. *The dynamics of faulting*. Edinburgh, Oliver and Boyd. 183p.

Bandeira, I.C.N. 2008. *Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/PA*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 144 p.

Bandeira, I.C.N., Abreu, F. M. 2012. Neotectônica e estruturação dos sistemas hidrogeológicos da região de Castanhal/PA. 2012. *Revista Águas Subterrâneas*, ABAS, **26(1)**:1-17.

Bezerra, P.E.L. 2003. *Compartimentação morfotectônica do interflúvio Solimões-Negro*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 335p.

Cavalcante, I.N. 1998. *Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão de Recursos Hídricos na Região Metropolitana de Fortaleza Estado do Ceará*. Phd Thesis, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 164p.

Cavalcante, L.M. 2000. *Neotectônica na área do Tiracambú (NE do Estado do Pará, NW do Estado do Maranhão)*. MS Dissertation Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 160 p.

Centeno Junior, F.M. 2008. Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária - Infraero. Perfuração do Poço Tubular Sci P2 Aeroporto Internacional de Belém - PA. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 31p.

Centeno Junior, F.M. 2009. Construção do Poço Tubular Profundo UFP^a 04. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 37p.

Centeno Junior, F.M. 2010. Construção do Poço Tubular Profundo COHAB – Mauá Jr, Para o Sistema de Abastecimento de Água da Comunidade Pantanal, no Município de Belém – Estado do Pará. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 17p.

Centeno Junior, F.M. 2012. Construção do Poço P10-CPRM-BEL, na Cidade de Belém - PA. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 24p.

Centeno Junior, F.M. 2013. Construção do Poço Tubular Profundo, AP Sede Campestre P1 em Belém – PA e Perfilagem Geofísica do Poço AP 01. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 40p.

Centeno Junior, F. M. 2014. Construção do Poço Tubular Profundo, AP Sede Campestre P2 em Belém – PA e Perfilagem Geofísica do Poço AP 02. *In: Femac - Geosolo Engenharia Ltda. Belém: Relatório Técnico Final*, 41p.

Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM. 2011. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em 08 dez. 2011.

Costa, F.R. da. 2004. *Influência da neotectônica sobre os arranjos geométricos dos aquíferos na Região Metropolitana de Belém*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 157 p.

Costa, J.B.S, Bemerguy, R.L, Hasui, Y., Borges, M.S., Junior, C.R.P.F., Bezerra, P.E.L., Costa, M.L., Fernandes, J.M.G. 1996. Neotectônica da região Amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos*, **4**(2):23-44.

Costa, J.B.S.; Gorayeb, P.S.S.; Hasui, Y. 1988. Relações estruturais entre a Faixa Araguaia e o Maciço Goiano na região de Paraíso do Norte – Gurupi - GO. *In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais. v. 5, p. 2187-2196.*

Costa, J.B.S & Hasui, Y. 1991. O quadro geral da evolução tectônica da Amazônia. *In: SBG, Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos, Rio Claro/UNESP. Boletim de resumos expandidos. n. 3, p. 142-145.*

Costa, J.B.S & Hasui, Y. 1992. Aspectos tectônicos fundamentais do Proterozóico Médio na Amazônia Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*, **22**(4):487-492.

Costa, J.B.S; Igreja, H.L.S; Borges, M. S; Hasui, Y. 1991. O quadro tectônico regional do Mesozóico na região norte do Brasil. *In: SBG, 3º Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Anais. p. 166-178.*

Costa, M.L da & Angelica, R.S. 1997. *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém: FINEP SBG-NO, p. 21-72.

Costa, T.C.D. 2001. *Análise crítica das metodologias gerais de mapeamento geotectônico visando formulação de diretrizes para a cartografia geotécnica no trópico úmido e aplicação na Região Metropolitana de Belém, Escala 1: 50.000*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém. 256p.

Craveiro, G.S. 2007. *Um Sistema de Informação Geográfica (SIG) como instrumento de Gestão dos Recursos Hídricos da Bacia do Mata Fome, Belém-PA*. Monograph. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 120p.

Deffontaines, B. & Chorwicz, J. 1991. Principles of drainage basin analysis from multsource data: application of the structural analysis of the Zaire Basin. *Tectonophysics*, Amsterdam, **194**:237-267.

Diário de Justiça do Estado do Pará (DJPA). 2013. Lei Complementar n.º 076/2011. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 28 dezembro 2011. p. 102. Disponível em: < <http://www.jusbrasil.com.br/diarios/58414636/djpa-29-08-2013-pg-102>>. Acesso em: 25 nov. 2016.

Farias, E.S.; Nascimento, F.S; Ferreira, M.A.A. 1992. *Estágio de Campo III: Relatório Final. Área Belém/Outeiro*. UFPA. 247p.

Ferreira, C.S. 1966. Características Lito-paleontológicas da Formação Pirabas, Estado do Pará. *In: Conf. Geol. Guianas, Belém. Anais*. Rio de Janeiro, DNPM., da Divisão de Geologia e Mineralogia, n. 6, p. 101-111. (avulsos 41)

Ferreira, C. S. 1977. Fácies da Formação Pirabas: novos conceitos de ampliações. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, **49**(2):353.

Ferreira, C.S. 1980. Correlação da Formação Pirabas (Mioceno Inferior). N e NE do Brasil, com as Formações Chipola e Tampa da Península da Florida, USA. *In: Latinoamer. Paleont.*, Buenos Aires. *Atas. APA*, **1**(3):49-55.

Ferreira, C.S. 1982. Notas Estratigráficas sobre o Cenozóico Marinho do Estado do Pará. *In: Simpósio de Geologia da Amazônia, Belém. Anais*, n. 1, p. 81-88.

Ferreira, C. S. & Cunha, O. R. 1957. Notas sobre a Formação Pirabas com descrição de novos intervalos fósseis I (Mollusca-Gastropoda). *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Nova Série Geologia, **2**:1-61.

Ferreira, C.S. & Francisco, B.H. 1988. As relações da Formação Pirabas (Oligoceno-Mioceno) com as Formações continentais terciárias no nordeste do Pará. *In: SBG, 35º Congresso Brasileiro de Geologia, Belém. Anais*. v. 2, p. 761-764.

Ferreira, C. S.; Vilcalvi, M. A.; Macedo, A. C. M. 1984. Os limites meridionais da bacia de Pirabas, Estado do Pará. *In: SBG, 33º Congresso Brasileiro de Geologia, Rio de Janeiro. Anais*. v. 1, p. 326-329.

Folk R.L. Ward W.C. 1957. Brazas river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology*, (27):3-26.

Fonseca, M.A.; Evangelista, H.J.; Oliveira, H.J. 1999. Estruturas transcorrentes N-S na Faixa Araguaia e seu significado no contexto das interações dos Cratons Amazônico, São Francisco Congo e Oeste Africano. *In: 6º Simpósio de Geologia da Amazônia, Manaus. SBG-Núcleo Norte. Anais*. v. 1, p. 251-254.

Fossen, H. 2012. *Geologia Estrutural*; Tradução: Fábio R.D. de Andrade. São Paulo. Oficina de Textos.

Góes, A.M.; Rossetti, D.F.; Nogueira, A.C.R.; Toledo, P.M. 1990. Modelo deposicional preliminar para Formação Pirabas, nordeste do Pará. Belém. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, **2**:3-15.

Góes, A.M. & Truckenbrot, W. 1980. Caracterização faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na Região Bargantina, nordeste do Pará. *In: SBG, 31º Congresso Brasileiro de Geologia, Camboriú. Anais*. v. 2, p. 766-771.

- Hasui, Y. 1990. Neotectônica e aspectos fundamentais da tectônica ressurgente no Brasil. In: SBG, Workshop sobre Neotectônica e Sedimentação Cenozóica Continental no Sudeste Brasileiro, 1., Belo Horizonte/MG. p. 1-31.
- Hasui, Y. 1996. Evolução geológica da Amazônia. In: SBG, Simpósio de Geologia da Amazônia, 5. Belém. *Boletim de resumos expandidos*. p. 31-34.
- Hasui, Y.; Abreu, F.A.M.; Villas, R.N.N. 1984. Província Paraíba. In: Almeida, F.F.M de; Hasui, Y. (Coordenadores.). *O Pré-Cambriano no Brasil*. São Paulo: Edgard Blucher. 984. p. 36-46.
- Hirata, R; Viviani-Lima, J.B, Hirata, H. 2009. Água como recurso. In: Teixeira, W, Fairchild, T.R, Toledo, M.C.M, Taioli, F. (Organizadores). *Decifrando a Terra*. 2ª edição. São Paulo. Companhia Editora Nacional, p.448-458.
- Howard, A.D. 1967. Drainage analysis in geologic interpretation: summatio. *Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol.* Chicago, **51**(11):2246-2259.
- Igreja, H.L.S de; Borges, M.S.; Alves, R.J.; Costa Júnior, P.S. da & Costa, J.B.S. 1990. Estudo Neotectônico nas Ilhas de Outeiro e Mosqueiro. In: SBG, 36º Congresso Brasileiro de Geologia, Natal-Núcleo Nordeste. *Anais*. v. 5, p. 2110-2123.
- Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. 2012. Plataforma IPEA de Pesquisa em rede/IDESP-Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará. *Projeto Governança Metropolitana no Brasil*. Oficina 1: Arranjos Institucionais de Gestão Metropolitana. Novembro, 2012. Disponível em: < <http://www.ipea.gov.br>>. Acesso em: 25 nov. 2016.
- Klein, E.L., Moura, C.A.V., Krymsky, R.S., Griffin, W.L. 2005b. The Gurupi belt in northern Brazil: lithostratigraphy, geochronology, and geodynamic evolution. *Precambrian Research*, v. 141, p. 83-105.
- Koury, F.S.A. 2007. *Viabilidade Econômica e Técnica da Utilização de Poços Tubulares para o Abastecimento de Água na Região de Belém e Ananindeua, Estado do Pará – Brasil*. 123f. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 123 p.
- Matta, M.A. da S. 2002. *Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 292p.
- Matta, M. A. da S. 2011. *Hidrogeologia – Módulo I*. Belém, Instituto de Geociências e Faculdade de Geologia da UFPA. Assessoria de Educação a Distância – Gestão Hídrica e Ambiental. 70 p. Apostila.
- Maury, C.J. 1925. *Fósseis terciários do Brasil com novas descrições de Formas Cretáceas*. Rio de Janeiro, Serviço Geológico e mineralógico do Brasil. 665p. Monograph 4.

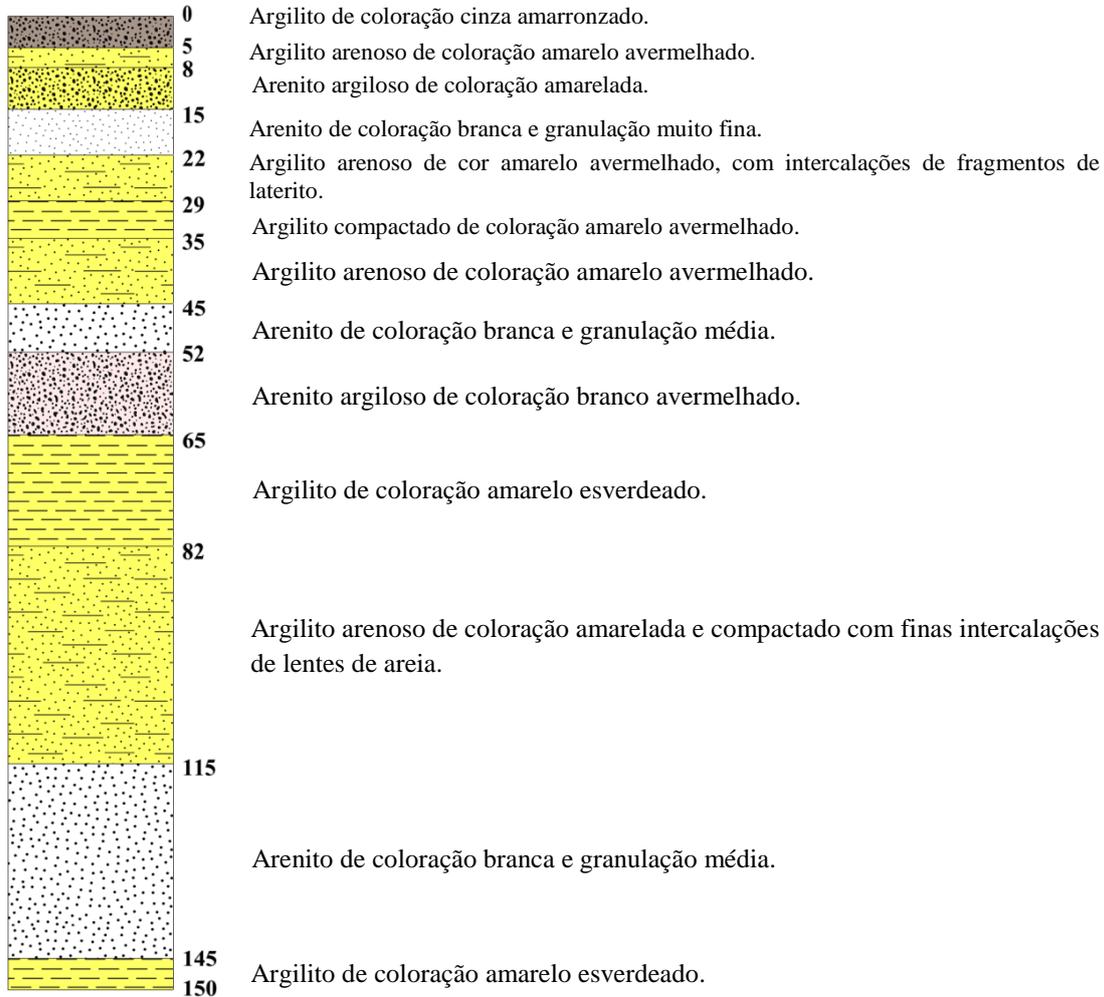
- Mendes, 2000. *Geofísica Aplicada ao Mapeamento de Aquíferos da Região Metropolitana de Belém*. MS Dissertation, Centro de Geociências-CG, Universidade Federal do Pará, 72 p.
- Oliveira, J.G.F & Silva, R.C.S. 2011. *Geologia e recursos minerais da Folha Belém – SA.22-X-D-III, Estado do Pará, escala 1:100.000*: Programa Geologia do Brasil (PGB), Integração, Atualização e Difusão de Dados da Geologia do Brasil. Projeto Cartografia da Amazônia. CPRM. 90p.
- Oliveira Filho, O.B.Q. 2012. *Investigação de Mistura de Águas entre o Sistema Barreiras e Pirabas com base na Assinatura Isotópica de Estrôncio (Sr) e Hidrogeoquímica em Ananindeua, Belém e Backgrounds em Benevides e Capanema, Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 98 p.
- Palheta, E.S. de M. 2008. *Estudo da Compartimentação e Arcabouço Neotectônico da Ilha de Mosqueiro – Pará Empregado no Conhecimento Hídrico Subterrâneo*. Phd Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 269p.
- Paranhos, P.F. 2010. *Caracterização Hidroquímica do Sistema Aquífero Pirabas em Icoaraci, Região Metropolitana de Belém – Estado do Pará*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 106 p.
- Passchier, C.W. & Trouw, R.A.J. 2005. *Microtectonics*. 2^a ed. Springer.
- Petri, S. 1957. Foraminíferos Miocênicos da Formação Pirabas. *Boletim da Faculdade da Filosofia Ciências Letras (Geologia) – Universidade de São Paulo*, 216:1-79.
- Pinheiro, A.V.R. 2009. *Uso de Ferramentas Multidisciplinares na Avaliação de Vulnerabilidade e Risco a subsidência no meio Cárstico na cidade de Castanhal, Nordeste do Pará-Brasil*. PhD Thesis, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, 210p.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. 1987. *The Techniques of Modern Structural Geology: folds and fractures*. London, Academic Press Inc. 700p.
- Reading, H.G. 1980. Characteristics and recognition of strike-slip fault system. In: Balance, P.F. & Reading, H.G (Eds.). *Sedimentation in oblique-slip mobile zone*. International Association of Sedimentologists, Special Publication , v. 4, p. 7-26.
- Ribeiro, J.T.A., Pacheco, J.J., Palheta, M.V.O., Costa Júnior, R.N. da Frota, Costa, S.V., Tostes, W. S. 2011. *Estatística Municipal – Belém*. Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará. 74p.
- Rossetti, D.F. 2001. Late cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 14, p.77-89.
- Sá, J.H.S. 1969. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, Estado do Pará. *Boletim Geológico (UFRJ)*, 3:21-36.

- Sauma Filho, M. 1996. *As águas subterrâneas de Belém e adjacências: Influência da Formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade*. MS Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 128 p.
- Shepard F.P. 1954. Nomenclature based on sand-silt-clay Ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, **24**(3):151-138.
- Soares, P.C & Fiori, A.P. 1976. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. Campinas/SP, *Nota Geomorfológica*, **16**(32):71–104.
- Stewart, L. S. & Hancock, P. L. 1994. Neotectonics. In: Hancock, P. L. (Ed). *Continental deformation*. Oxford, Pergamon Press. p. 370-409.
- Suguio, K. 2003. *Geologia Sedimentar*. In: Capítulo 8 - Ambiente de Sedimentação e Fácies Sedimentares. São Paulo, Editora Bluncher, p. 261-266.
- Turner F.J. & Weiss L.E. 1963. *Structural Analysis of Metamorphic Tectonites*. New York. McGraw – Hill Book Co.
- Twiss, R.J. & Moores, E.M. 2007. *Structural Geology*. 2ª ed. New York. W.H. Freeman and Company.
- Van Der Pluijm, B.A. & Marshak, S. 2004. *Earth structure - an introduction to structural geology and tectonics*. 2 ed. New York – London, W W Norton & Company. 656p.
- Vasquez, M.L. & Rosa-Costa, L.T. da. 2008. *Geologia e Recursos Minerais do Estado do Pará: Sistema de Informações Geográficas – SIG: texto explicativo dos mapas Geológico e Tectônico e de Recursos Minerais do Estado do Pará, escala 1:1.000.000*. Belém: CPRM. 328p. 1 CD-ROM.
- Wentworth C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, **30**: 377 – 392.

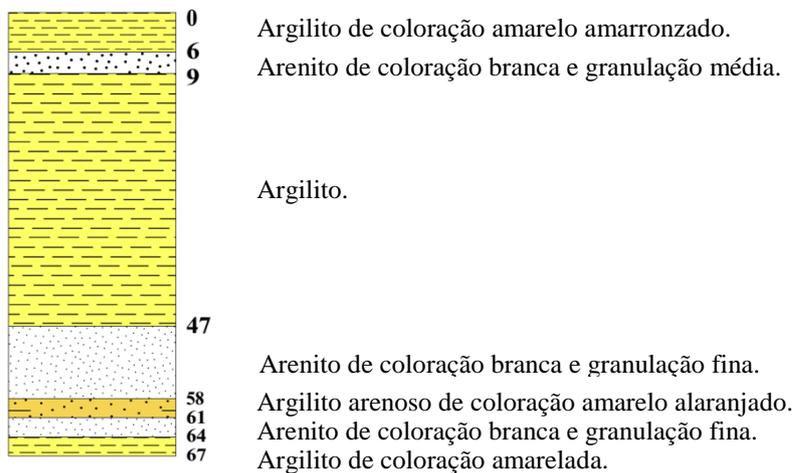
ANEXOS

ANEXO A - PERFIS DOS POÇOS BARREIRAS COM A DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

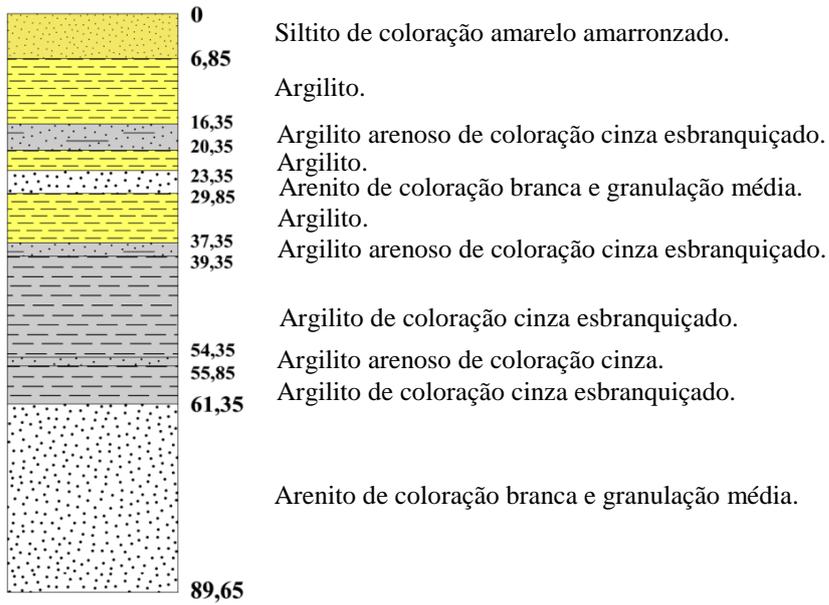
Ponto 1B - Poço UFPA / Poço 4 BE 03 PA



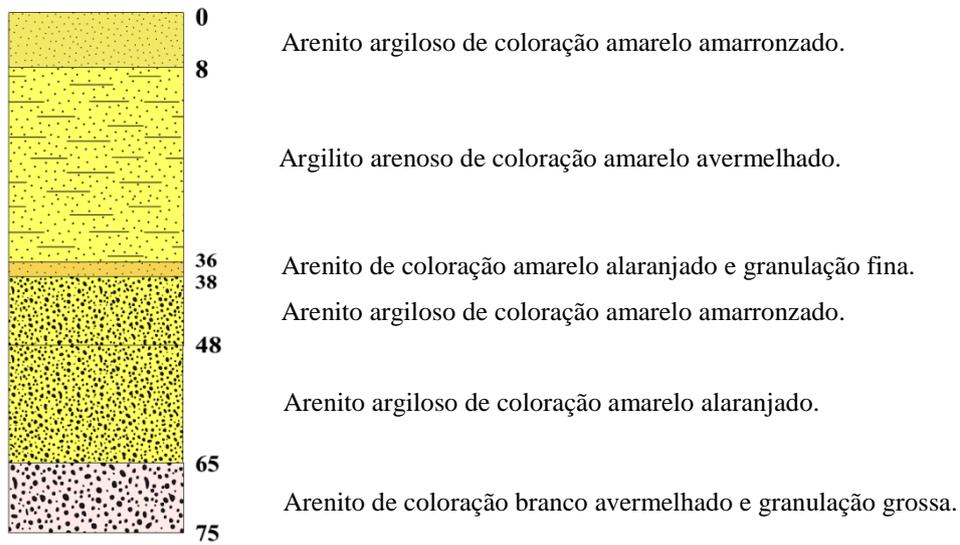
Ponto 2B - Poço COSANPA / TEF 02



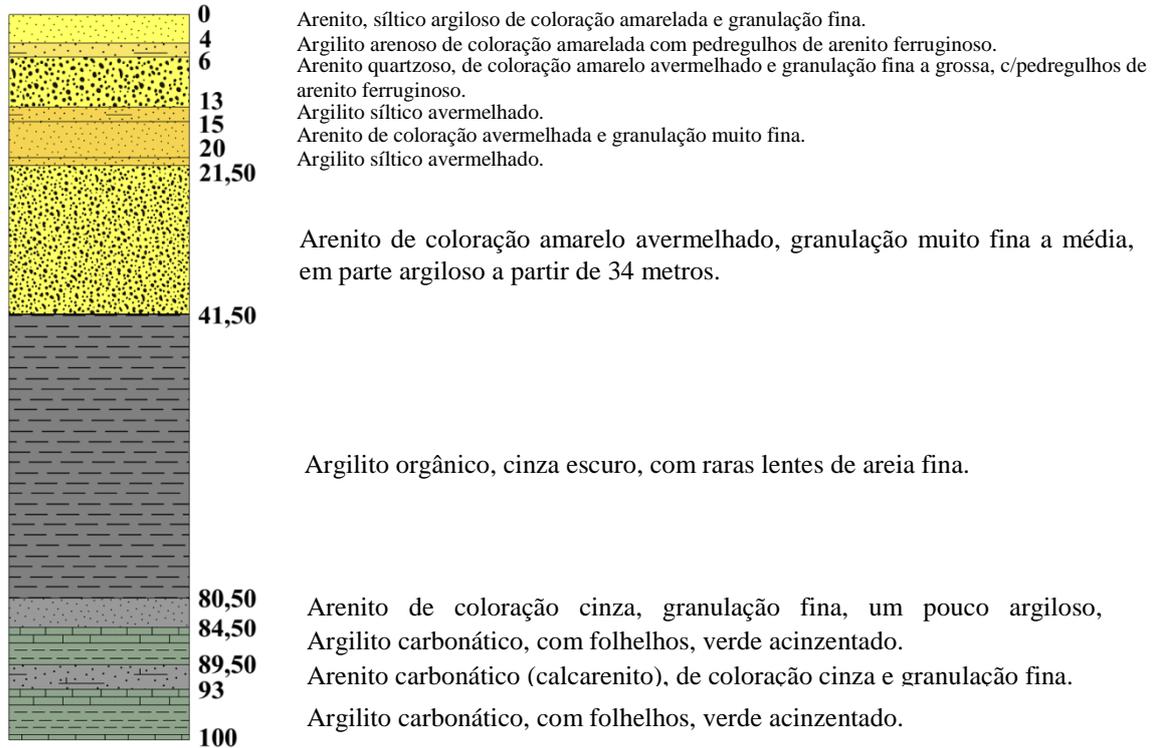
Ponto 3B - Poço COSANPA



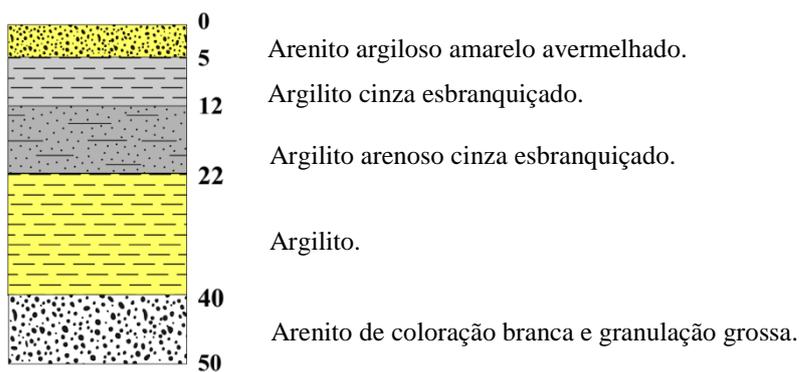
Ponto 4B - Poço SERPRO



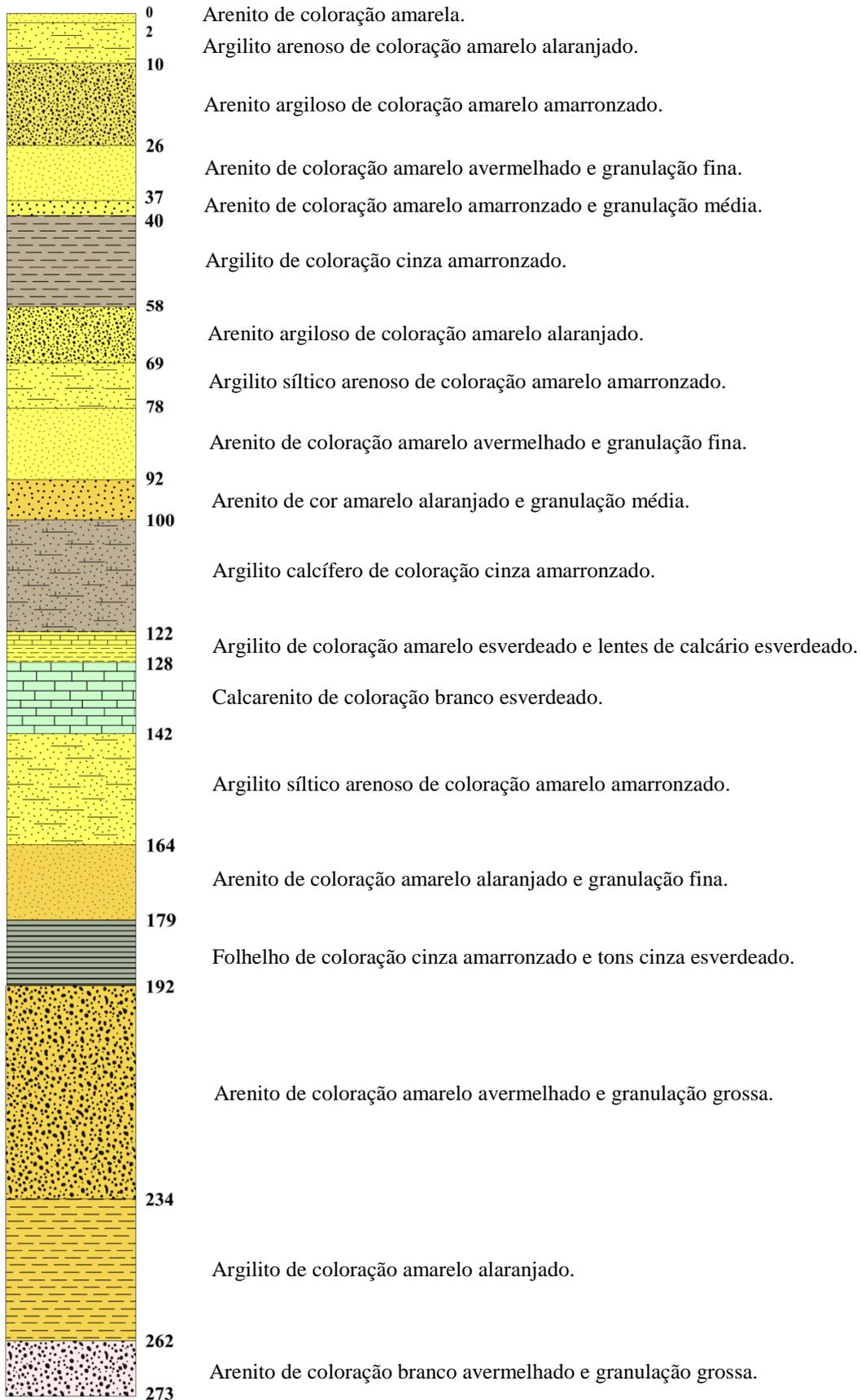
Ponto 5B - Poço CPRM



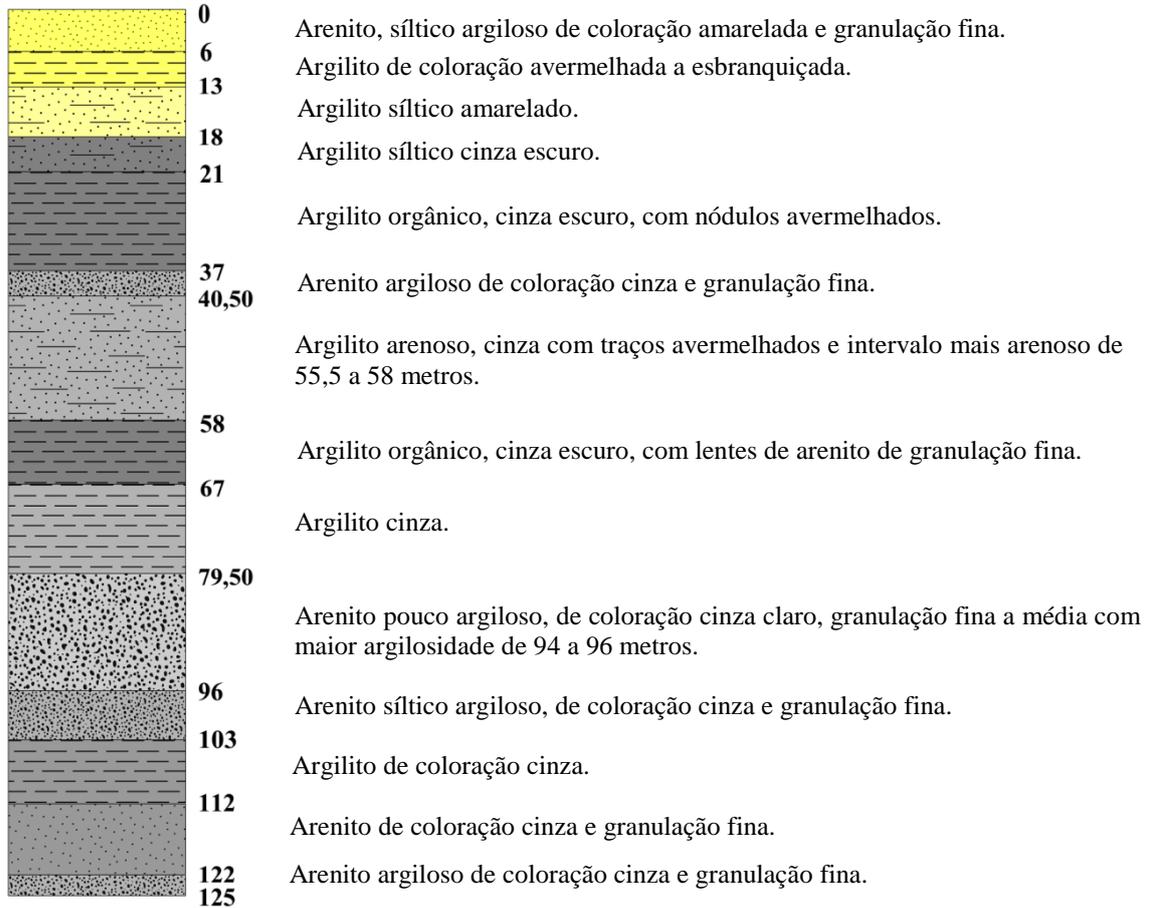
Ponto 6B - Poço LIQUIGAS



Ponto 7B - Poço MIN. DA MARINHA/BASE NAVAL

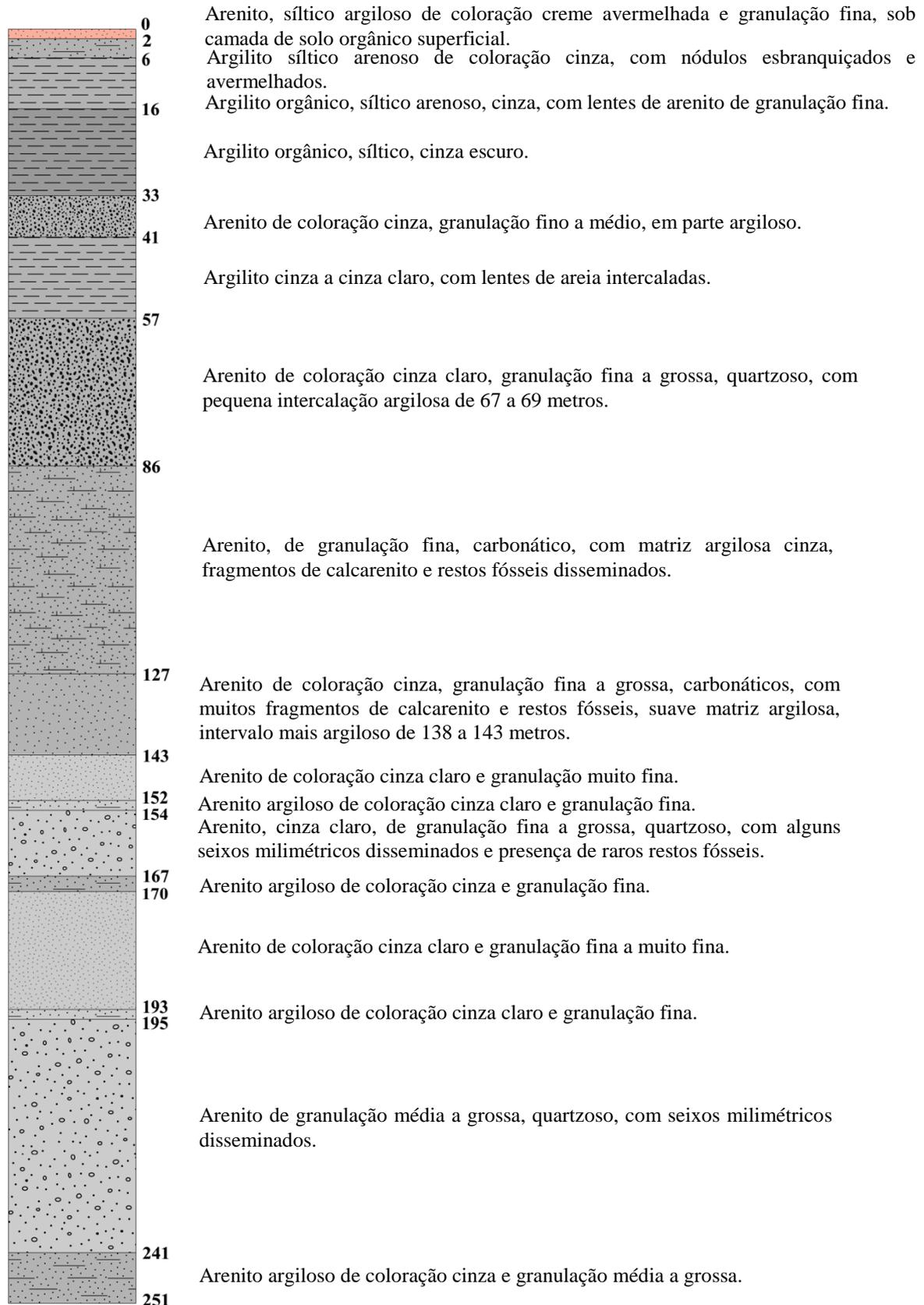


Ponto 8B - Poço SCI P2 – INFRAERO

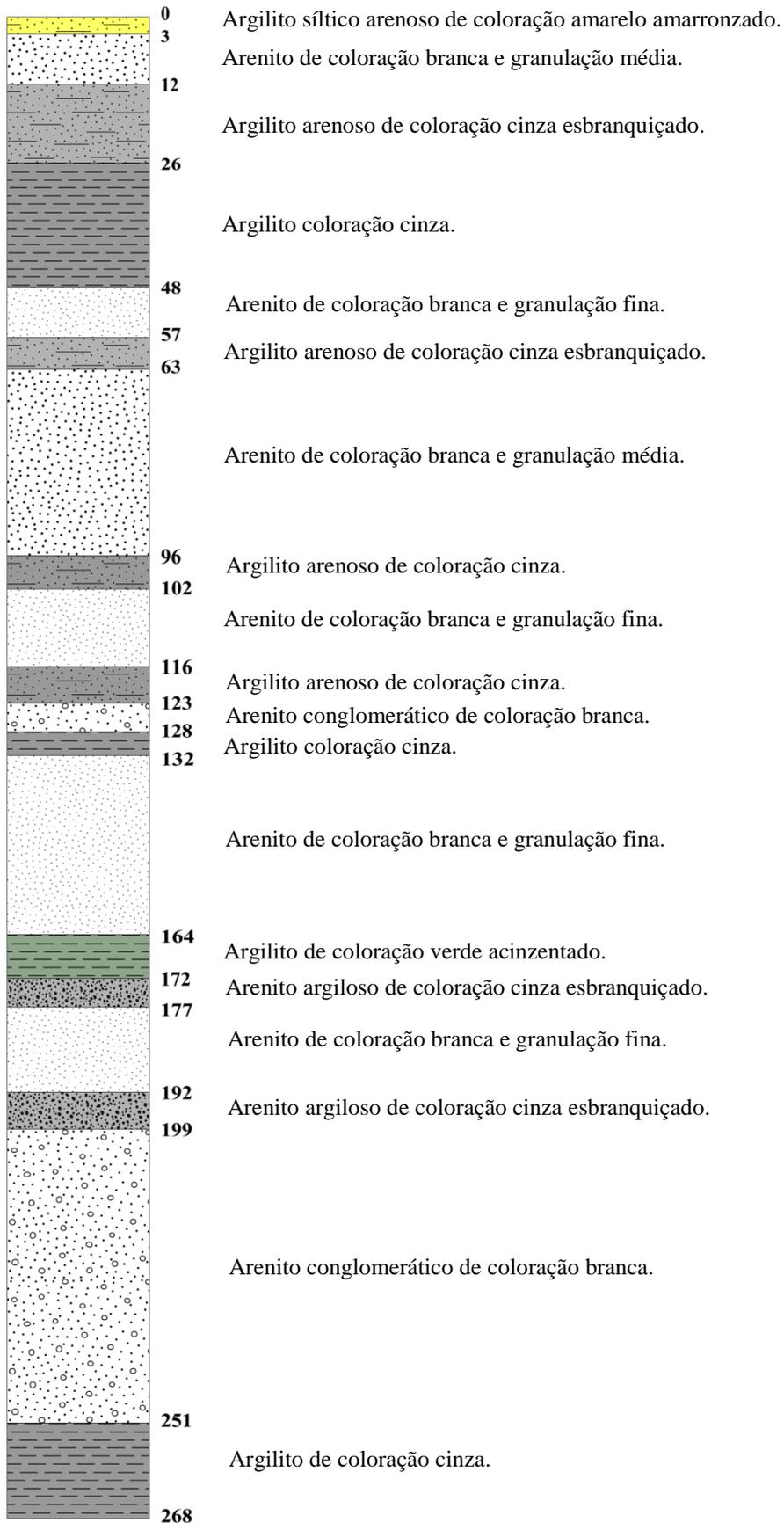


ANEXO B - PERFIS DOS POÇOS PIRABAS COM A DESCRIÇÃO LITOLÓGICA

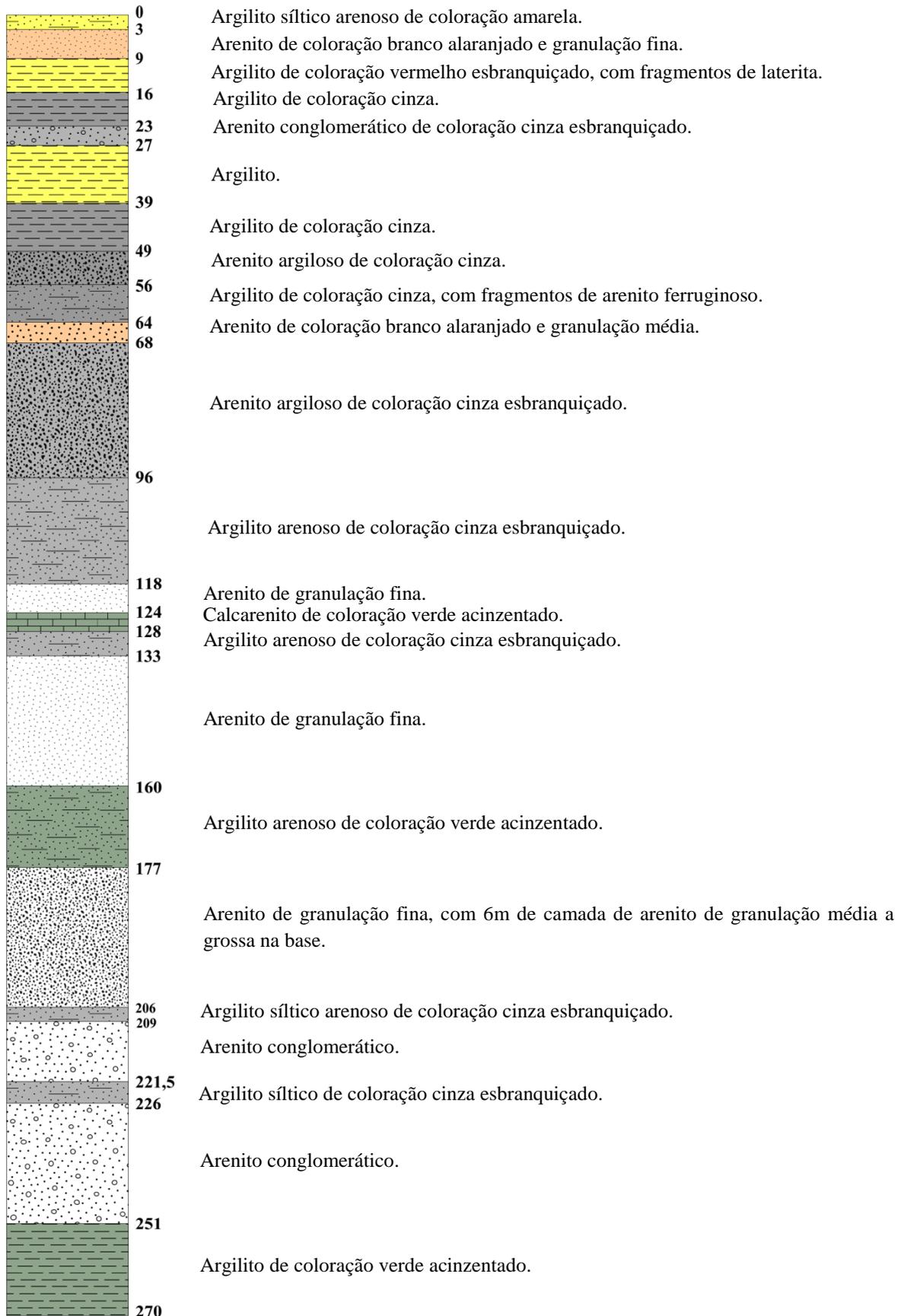
Ponto 1P - Poço UFPA-P4



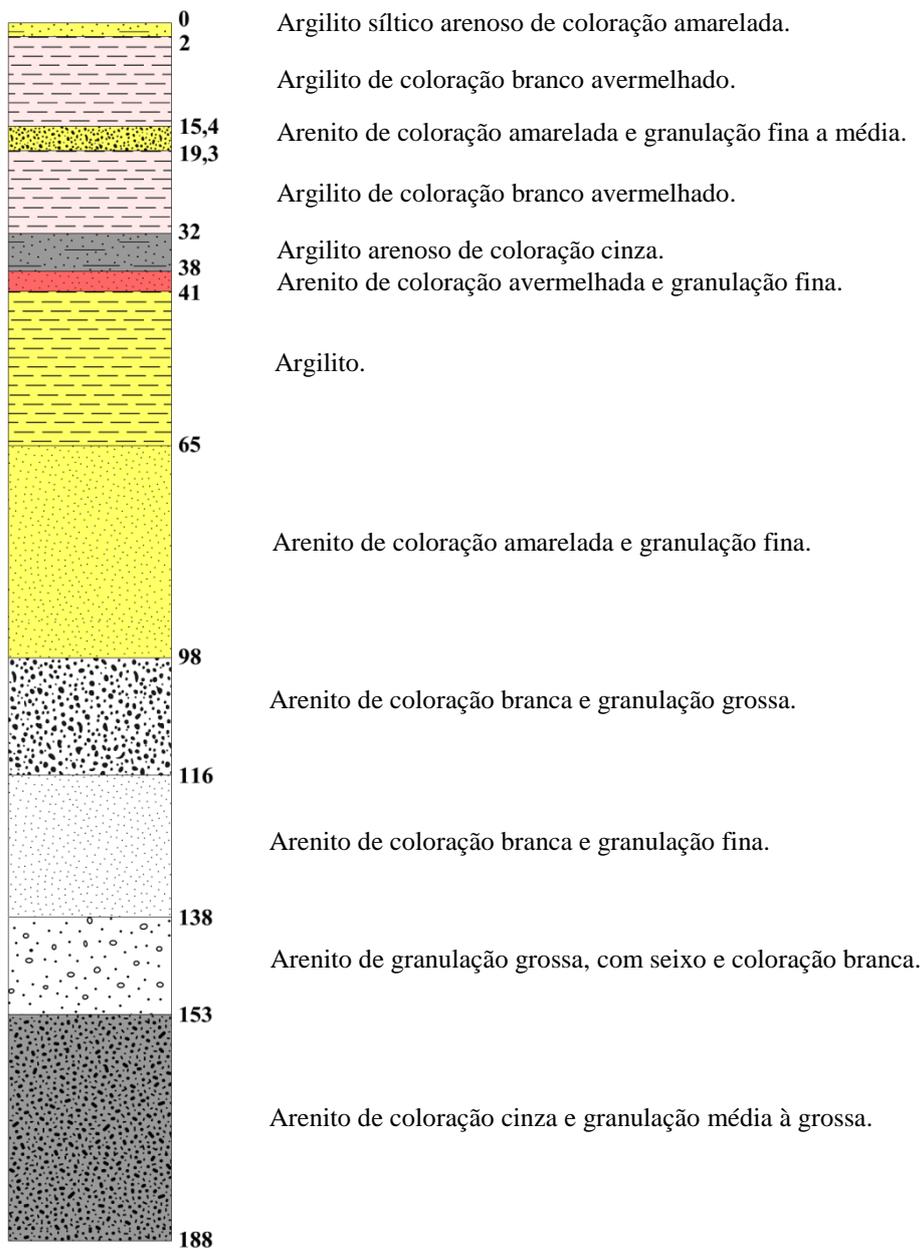
Ponto 2P - Poço COSANPA-T. FIRME-07



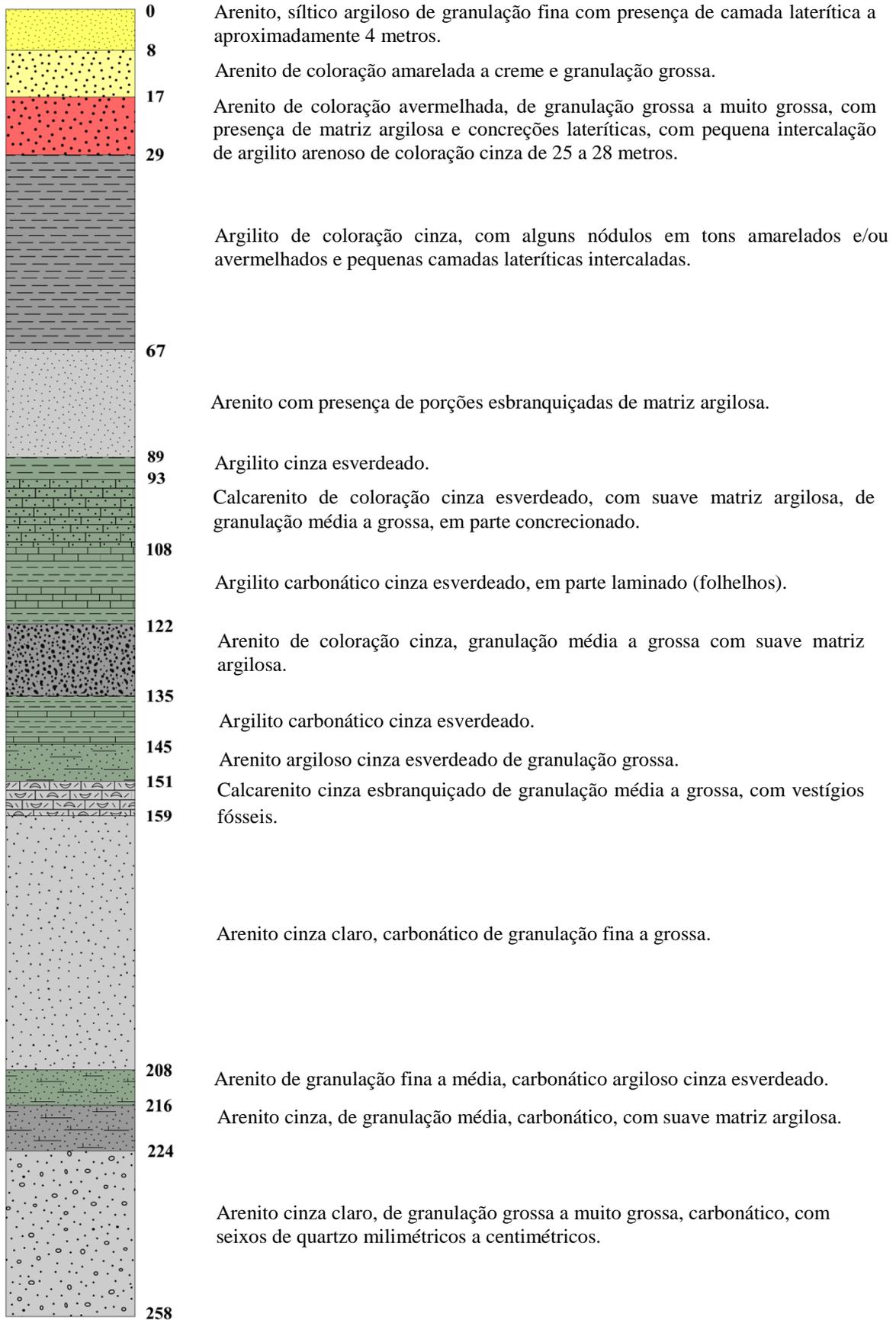
Ponto 3P - Poço COSANPA-T. FIRME-09



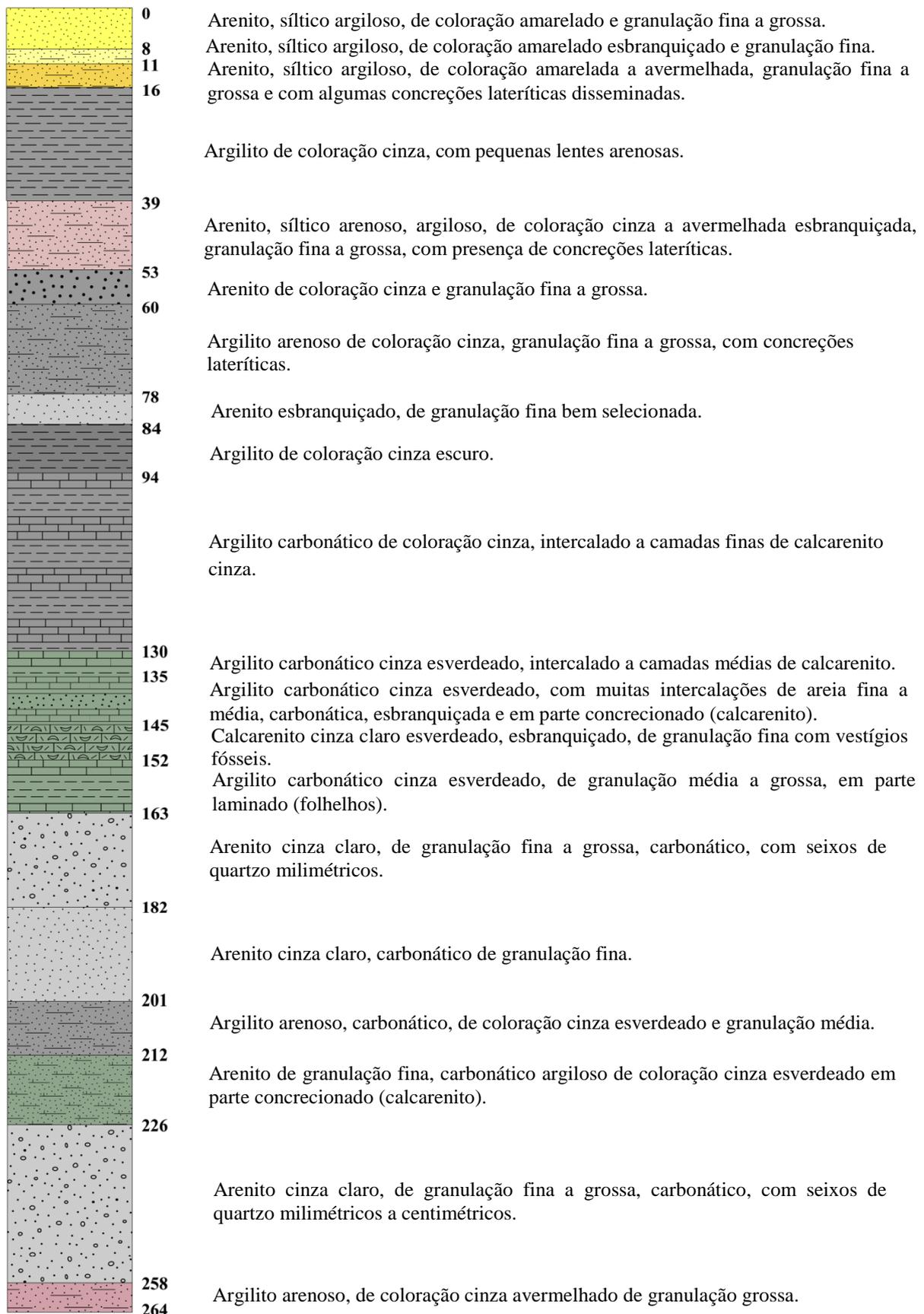
Ponto 4P - Poço COSANPA/5º SETOR/FEMAC



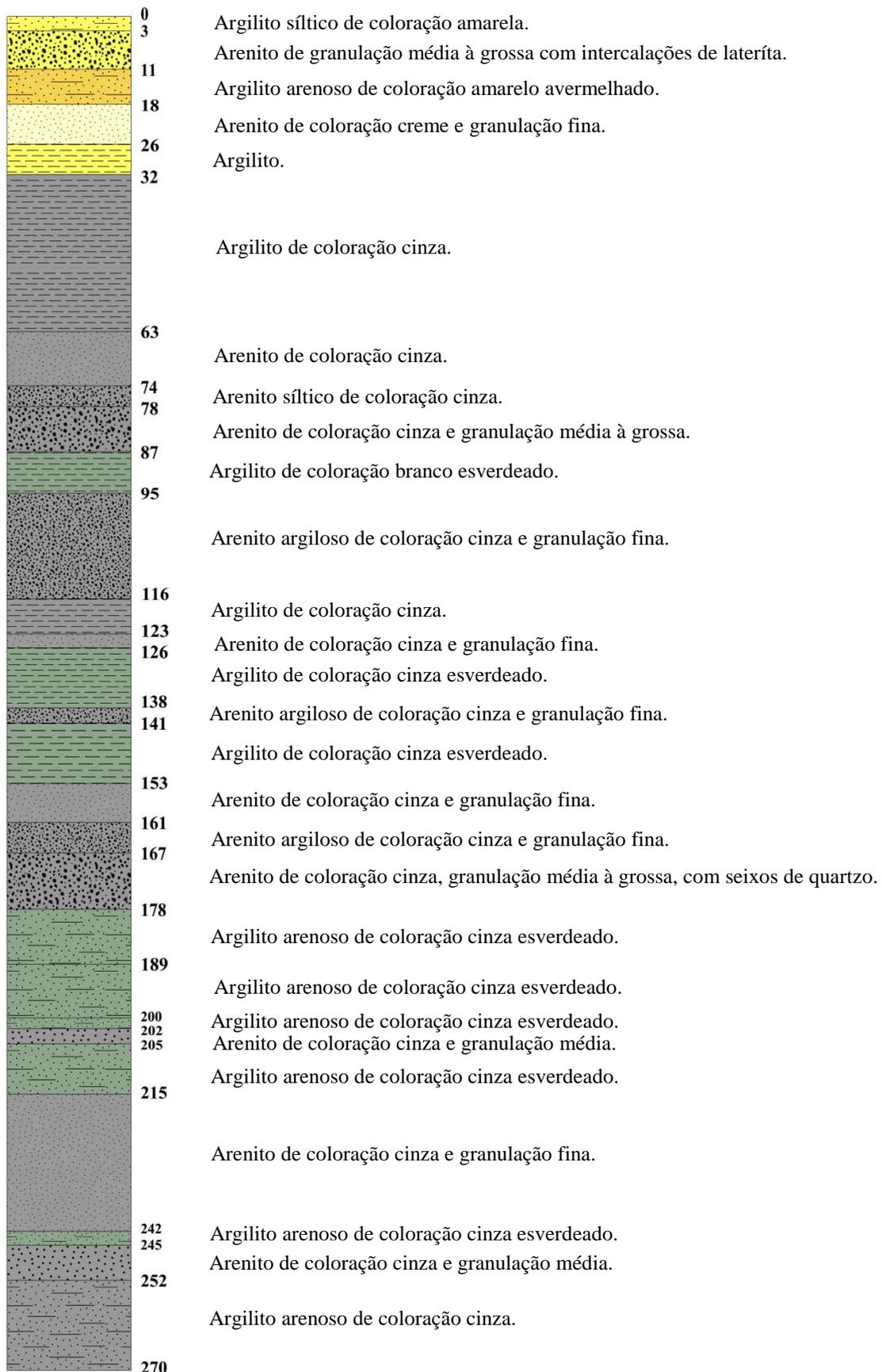
Ponto 5P - Poço AP-P1



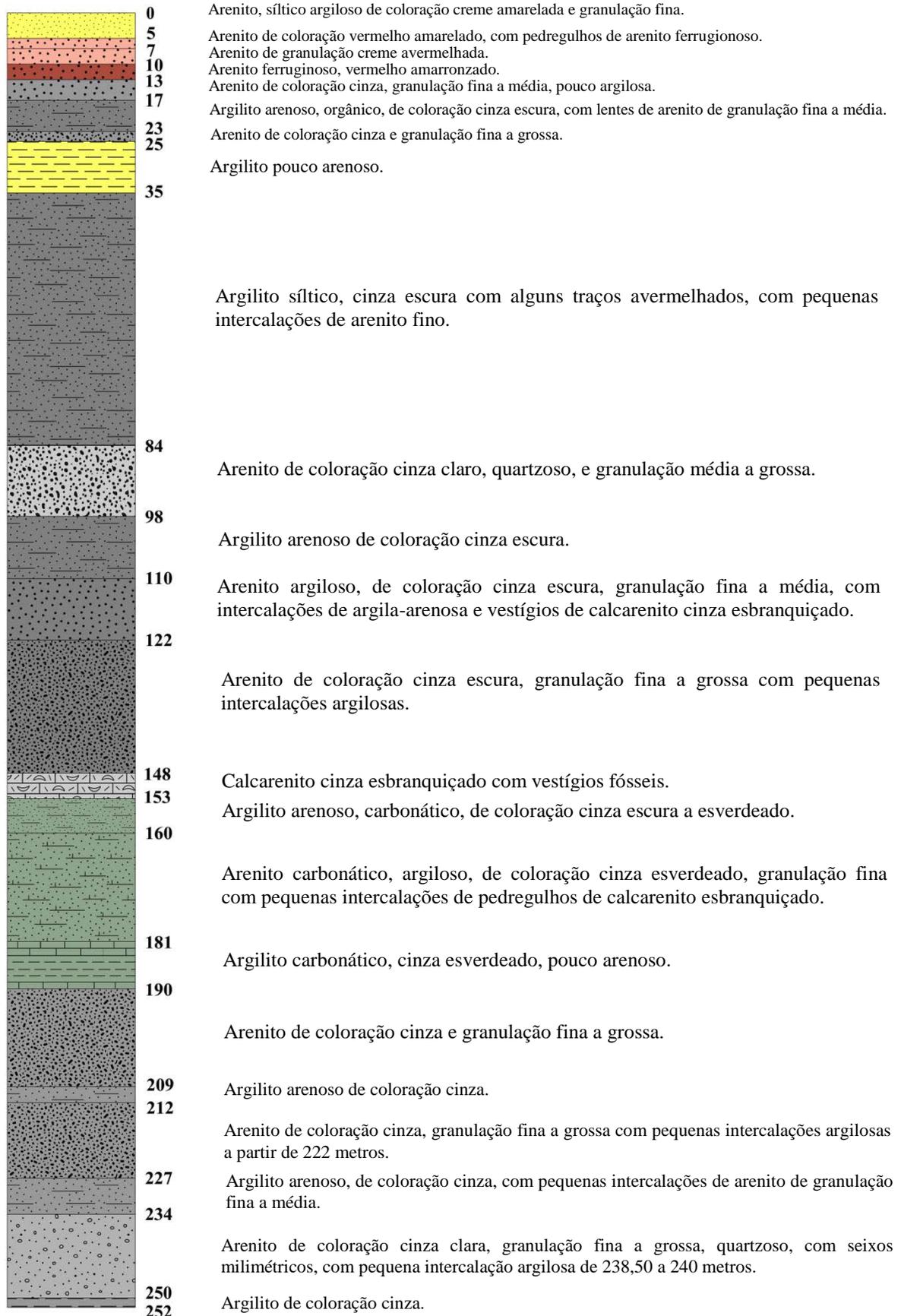
Ponto 6P - Poço AP-P2



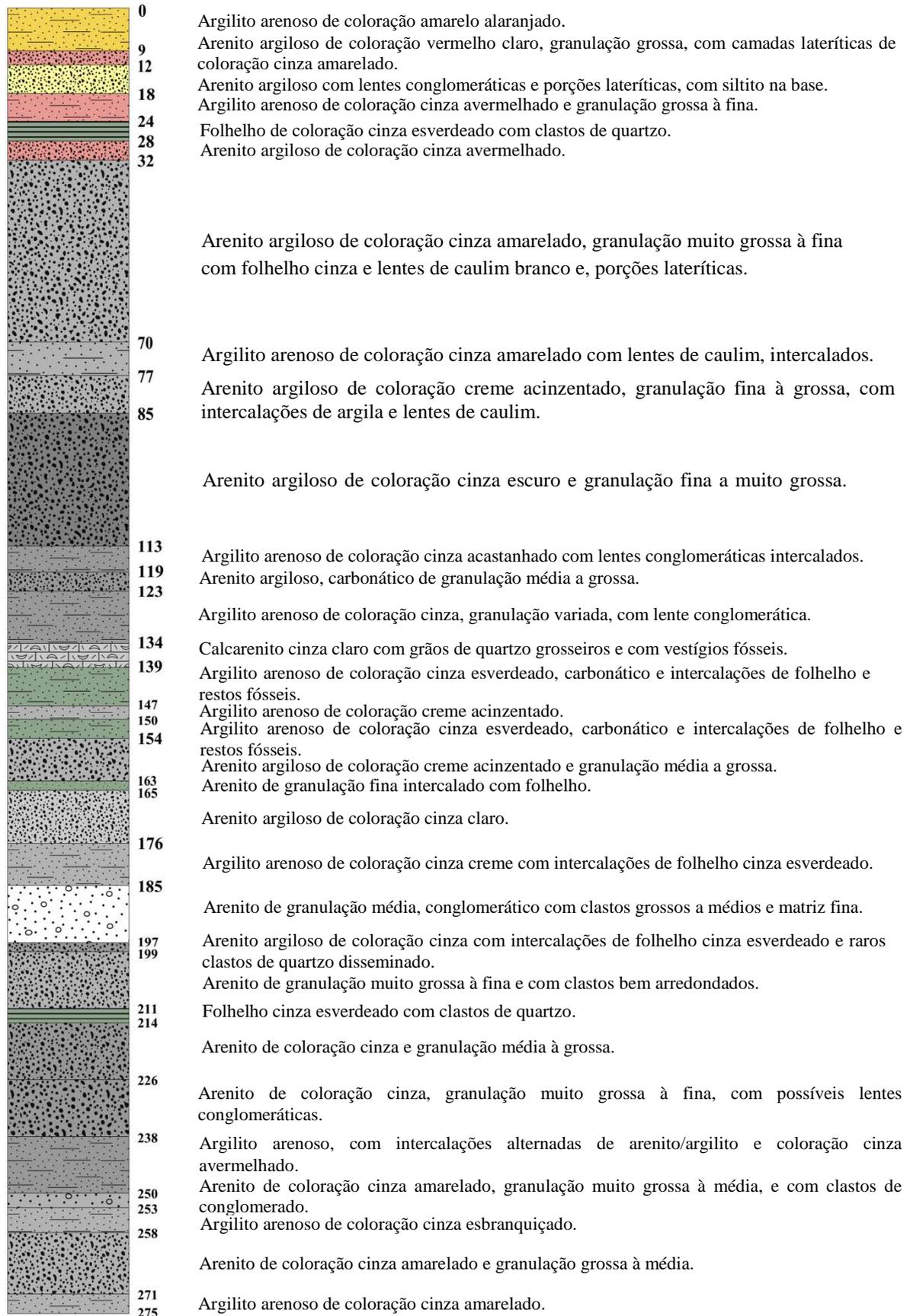
Ponto 7P - Poço Loteamento - cdp/ FEMAC 01



Ponto 8P - Poço COHAB/MAUÁ JR - COMUNIDADE PANTANAL



Ponto 9P - Poço COSANPA - FEMAC P03



Ponto 10P - Poço Base Aérea de Belém

