



**REALIZAÇÃO DE ESTUDOS HIDROGEOLÓGICOS SOBRE AS ÁREAS DE
RECARGA NO SISTEMA PERNAMBUCO-PARAÍBA COM A ELABORAÇÃO
DO MAPA DE ZONAS DE GERENCIAMENTO E ELABORAÇÃO DE
PROPOSTA DE REDE DE MONITORAMENTO DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS DO ESTADO DA PARAÍBA**

**MODELO CONCEITUAL COM IDENTIFICAÇÃO DAS ÁREAS DE RECARGA
DO SISTEMA AQUÍFERO PERNAMBUCO-PARAÍBA
PRODUTO 3**



Janeiro de 2024

 <p>GOVERNO DA PARAÍBA</p> 	<p>Tipo de Documento: Documento de trabalho</p> <p>Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03</p>	 <p>THE WORLD BANK IBRD • IDA</p>
--	---	--

**AESA – AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA
PARAÍBA**

Diretor Presidente

Porfírio Catão Cartaxo Loureiro

Diretor Executivo de Acompanhamento e Controle

Beranger Arnaldo de Araújo

Diretor Executivo Administrativo e Financeiro

Joacy Mendes Nóbrega

Diretor Executivo de Gestão e Apoio Estratégico

Waldemir Fernandes Azevedo

Coordenadora PROGESTÃO / Programas e Projetos

Ana Emilia Duarte

Gestor do Contrato

Armando César Rodrigues Braga

 <p>GOVERNO DA PARAÍBA</p>  <p>AESA</p>	<p>Tipo de Documento: Documento de trabalho</p> <p>Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03</p>	 <p>THE WORLD BANK IBRD • IDA</p>
--	---	--

CONSÓRCIO IGNEO/NIP/PROFILL

Coordenação

Flávio de Paula e Silva

Equipe Técnica

Antônio Silvio Jornada Krebs

Marcia Regina Stradioto

Ana Luiza Helfer

Sidnei Gusmão Agra

Carla Beatris Gasparini

Isabel Cristiane Rekowsky

Wilma Maria Nunes Memoria

Hygor Garcia

Carlos Ronei Bortoli

Tiago Vier Fischer

Mauro Jungblut

Dora Atman

Anna Luiza Lopes Matos

Marco Antonio Pereira Pessoa

Elisa de Mello Kich

Maurício Dambros Melati

 <p>GOVERNO DA PARAÍBA</p>  <p>AESA</p>	<p>Tipo de Documento: Documento de trabalho</p> <p>Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03</p>	 <p>THE WORLD BANK IBRD • IDA</p>
--	---	--

APRESENTAÇÃO

O Consórcio IGNEO-NIP-PROFILL vêm, por meio deste, apresentar o **Produto 3 - Modelo conceitual com identificação das áreas de recarga do Sistema Aquífero Pernambuco-Paraíba**, referente ao contrato 1-010/2022.

O presente produto segue os Termos de Referência do Edital SBQC 005/2021 (BR-SIERHMA-220426-CSBQC), realizado no âmbito do Projeto de Segurança Hídrica do Estado da Paraíba - PSH-PB. O PSH-PB é uma iniciativa do Estado da Paraíba, executado pela Secretaria de Estado da Infraestrutura, dos Recursos Hídricos e do Meio Ambiente - SEIRHMA, com apoio técnico da Agência Executiva de Gestão das Águas – AESA e apoiado pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS	12
3	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DA UNIDADE GRAMAME	16
4	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO SAPP	31
4.1	Espessuras saturadas do SAPP	31
4.2	Reservas hídricas do SAPP	33
4.3	Disponibilidades hídricas do SAPP	33
4.4	Parâmetros hidrodinâmicos do SAPP	35
4.5	Limites físicos do SAPP	44
5	CONDIÇÕES DE RECARGA E DESCARGA DO SAPP	46
5.1	Áreas potenciais de recarga e descarga	46
5.2	Favorabilidade dos terrenos à recarga	54
5.2.1	Rio Guaju	60
5.2.2	Rio Camaratuba	61
5.2.3	Rio Mamanguape	62
5.2.4	Rio Miriri	63
5.2.5	Baixo Rio Paraíba	64
5.2.6	Rio Gramame	65
5.2.7	Rio Abiaí	66
6	POTENCIOMETRIA DO SAPP	67
6.1	Generalidades	67
6.2	Análise dos registros de níveis estáticos de poços cadastrados	70
6.3	Mapa potenciométrico do subsistema livre	73
6.4	Análise da potencimetria do subsistema livre nas bacias hidrográficas da área de estudo	76
6.4.1	Análise da Potencimetria na Bacia do rio Guaju	76
6.4.2	Análise da Potencimetria na Bacia do rio Camaratuba	77

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

6.4.3	Análise da Potenciometria na Bacia do rio Mamanguape	77
6.4.4	Análise da Potenciometria na Bacia do rio Miriri	79
6.4.5	Análise da Potenciometria na Bacia do Baixo Paraíba	80
6.4.6	Análise da Potenciometria na Bacia do rio Gramame	82
6.4.7	Análise da Potenciometria na Bacia do rio Abiaí.....	83
6.5	Mapa potenciométrico do subsistema confinado	84
6.6	Análise das oscilações de níveis nos subsistemas livre e confinado do SAPP	88
6.6.1	Oscilações de níveis do subsistema livre.....	88
6.6.2	Oscilações de níveis do subsistema confinado.....	89
7	MODELO CONCEITUAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO DO SAPP	93
8	INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS POR EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	97
9	CONCLUSÕES.....	101
10	REFERÊNCIAS	104
11	Anexos	108
11.1	Anexo I - Dados de nível estático (NE) de poços levantados por Costa et al. (2007).	108
11.1	Anexo II – Anexo digital – mapa potenciométrico em escala A0.....	110
APÊNDICE	111

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Distribuição dos aquíferos componentes do SAPP na área de estudo. Fonte: CPRM (2019)	13
Figura 3.1 – Mapa geológico da porção sul do SAPP (CPRM,2004).	18
Figura 3.2 – Área de ocorrência da Formação Gramame, segundo Barbosa et al. (2007), delimitada sobre mapa geológico da CPRM (2004).	19
Figura 3.3 - Mapa de isópacas da Formação Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba. Fonte: Barbosa et al. (2007)	20
Figura 3.4 – Poços com descrição litológica extraídos do cadastro SIAGAS, plotados sobre a área da Formação Gramame, definida por Barbosa et al. (2007).	22
Figura 3.5 – Mapa de localização das seções geológicas apresentadas da Figura 3.6 à Figura 3.9.....	24
Figura 3.6 – Seção geológica 1 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.....	25
Figura 3.7 – Seção geológica 2 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.....	26
Figura 3.8 – Seção geológica 3 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.....	27
Figura 3.9 – Seção geológica 4 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.....	28
Figura 3.10 – Delimitação da área de ocorrência da unidade Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.....	29
Figura 3.11 – Mapa de isópacas da Formação Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.....	30
Figura 4.1 – Espessuras saturadas do SAPP na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.....	32
Figura 4.2 – Distribuição das disponibilidades anuais totais do SAPP.....	34
Figura 4.3 – Mapa hidrogeológico da área de estudo (CPRM, 2019)	37
Figura 4.4 – Distribuição estatística do nível estático, nível dinâmico e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 1.	42
Figura 4.5 – Distribuição estatística do nível estático e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 2.	42
Figura 4.6 – Distribuição estatística de nível estático, nível dinâmico e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 3.	43
Figura 5.1 – Variações sazonais do nível de água subterrânea em cursos superficiais, lagos e áreas de planícies úmidas. Observa-se a descarga de água subterrânea nos corpos de água superficiais nos períodos mais úmidos [a e b] e a recarga do aquífero no período seco [c]. Fonte: Woessner, 2020.	47
Figura 5.2 - Modelo conceitual de condições de fluxo contínuo ou “ <i>flow-through conditions</i> ” sob regime permanente e condições isotrópicas e homogêneas (Woessner, 2020).....	48
Figura 5.3 – Exemplo de região classificada como área de descarga e uma ilustração do porquê na região central da bacia hidrográfica do rio Mamanguape	49
Figura 5.4 – Áreas potenciais de recarga e áreas de descarga do SAPP.	51

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Figura 5.5 – Distribuição da recarga total do SAPP na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.....	52
Figura 5.6 – Análise em SIG realizada com os quatro fatores. Fonte: Adaptado de Yeh et al. (2016).	56
Figura 5.7 – Representação dos fatores considerados para a análise de favorabilidade de recarga subterrânea.	57
Figura 5.8 – Mapa de áreas favoráveis para a ocorrência de recarga subterrânea.....	58
Figura 5.9 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Guaju.	60
Figura 5.10 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Camaratuba.....	61
Figura 5.11 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Mamanguape.....	62
Figura 5.12 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Miriri.	63
Figura 5.13 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do baixo Paraíba.	64
Figura 5.14 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Gramame.....	65
Figura 5.15 - Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Abiaí.	66
Figura 6.1- Monitoramento de níveis de água de um aquífero livre. (A) Ciclos sazonais de recarga por chuvas e descarga natural; (B) Variações por efeito de marés terrestres.	68
Figura 6.2 - Correlação altitude do terreno versus cota do NE com filtro para pontos com NE ≤ 15 m e NE > 15 m	71
Figura 6.3 - Correlação entre a altitude do terreno e cota do NE para 256 poços com profundidades de até 50 m (cadastro SIAGAS).....	72
Figura 6.4 - Correlação entre a altitude do terreno e cota do NE para 399 poços com profundidades maiores do que 100 m (cadastro SIAGAS).	73
Figura 6.5 – Potenciometria e direções de fluxo do subsistema livre do SAPP.	75
Figura 6.6 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Guaju	76
Figura 6.7 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Camaratuba	77
Figura 6.8 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Mamanguape.	78
Figura 6.9 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Miriri	79
Figura 6.10 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Baixo Paraíba ..	80
Figura 6.11 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Baixo Paraíba na região da conurbação de João Pessoa.....	81
Figura 6.12 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Gramame.	82
Figura 6.13 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Abiaí.....	83
Figura 6.14- Sistemas locais, intermediários e regionais de fluxo de água subterrânea (Freeze & Cherry, 1979).....	84

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Figura 6.15 – A: Mapa potenciométrico do SAPP elaborados por Costa et al. (2007); B: Mapa potenciométrico do subsistema confinado elaborado pelo Projeto BRAMAR (2018)..... 86

Figura 6.16 – Mapa potenciométrico do subsistema confinado subjacente ao Aquitardo Gramame..... 87

Figura 6.17 - Variação da carga hidráulica no poço de monitoramento P-09. 89

Figura 6.18 - Flutuações de níveis de água de monitoramento de longo termo do subsistema confinado em poços do RIMAS/CPRM. 91

Figura 6.19- Variação dos níveis de água do subsistema confinado em poços monitorados no projeto Bramar..... 92

Figura 7.1 – Modelo conceitual de fluxo subterrâneo do SAPP em área do Aquitardo Gramame 94

Figura 7.2 – Modelo conceitual de fluxo subterrâneo do SAPP em área de não ocorrência do Aquitardo Gramame. 95

Figura 8.1 – Mapa de intensidade de exploração do SAPP. 100

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

1 INTRODUÇÃO

Esse documento refere-se à atividade 5.3 dos Termos de Referência dos “Estudos hidrogeológicos sobre as áreas de recarga no Sistema Pernambuco- Paraíba com a elaboração do mapa de zonas de gerenciamento e elaboração de proposta de rede de monitoramento de águas subterrâneas do estado da Paraíba”, que trata da “Elaboração do modelo conceitual hidrogeológico do SAPP”. O modelo conceitual hidrogeológico foi baseado nas informações obtidas a partir das atividades 5.1 e 5.2 dos TRs, e em visitas a campo para consolidação do conhecimento sobre o sistema aquífero. O documento ora apresentado descreve o comportamento do sistema de fluxo subterrâneo do SAPP e identifica os elementos condicionantes desse movimento em seus diversos capítulos, a partir da consolidação de dados disponíveis e conhecimento existente.

O termo modelo refere-se a qualquer representação simplificada de uma situação real. O modelo conceitual constitui uma etapa fundamental para o desenvolvimento de modelos numéricos de fluxo subterrâneo, cujos objetivos são dar suporte ao planejamento da exploração e uso racional dos recursos hídricos subterrâneos, e realizar previsões sobre o comportamento dos aquíferos ao longo do tempo, entre outros, de modo a conservar a qualidade natural das águas subterrâneas e a capacidade de fornecimento de água dos aquíferos (ANA, 2018). Assim, a descrição da dinâmica de circulação hídrica subterrânea e dos fatores intervenientes no sistema hidrogeológico são descritas neste produto, a partir dos resultados obtidos na etapa de diagnóstico deste projeto.

Com relação a estudos existentes, que abordam modelos conceituais do SAPP, podem ser citados Batista et al. (2010) e Braga (2014), ambos realizados na bacia hidrográfica do Baixo Curso do Rio Paraíba.

Braga (2014) construiu um modelo conceitual com uma única camada com condutividade hidráulica equivalente e espessura constante, em área definida como um subsistema hidrogeológico livre, composto pelos aquíferos Barreiras, Beberibe Superior e Beberibe Inferior. Batista (2010), por sua vez, considerou dois subsistemas aquíferos, um livre, em toda a extensão constituída pelas formações Barreiras e os sedimentos aluviais e flúvio-marinhos; e um subsistema confinado pela formação Gramame, também em toda a extensão da área de estudo, constituído pelas formações Beberibe

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

superior e inferior; mas desenvolveu um modelo com apenas uma camada confinada. Os modelos conceituais distintos desenvolvidos pelos autores refletem a complexidade hidrogeológica e as dificuldades em se definir um modelo consistente de fluxo subterrâneo para o SAPP, em escala regional.

O desenvolvimento do modelo conceitual de fluxo subterrâneo abrange diversas atividades, as quais foram preconizadas pelos Termos de Referência como:

- (a) As condições de contorno e identificação das possíveis fontes de recargas e descargas – representando entradas e saídas – do sistema – tal atividade foi contemplada nos capítulos:
 - i. “5 - CONDIÇÕES DE RECARGA E DESCARGA DO SAPP”
- (b) Estimativas de direções dos fluxos subterrâneos – tal atividade foi contemplada nos capítulos:
 - i. “6 - POTENCIOMETRIA DO SAPP”;
 - ii. “7 - MODELO CONCEITUAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO DO SAPP”
- (c) Possíveis conexões com os recursos hídricos superficiais – tal atividade foi contemplada nos capítulos:
 - i. “5 - CONDIÇÕES DE RECARGA E DESCARGA DO SAPP”
 - ii. “6 - POTENCIOMETRIA DO SAPP”;
 - iii. APÊNDICE – Relatório de campo.
- (d) Possíveis intervenções antrópicas que podem estar alterando o sistema – tal atividade foi contemplada nos capítulos:
 - i. “5.2 - Favorabilidade dos terrenos à recarga”
 - ii. “8 - INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS POR EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA”
 - iii. APÊNDICE – Relatório de campo.

O desenvolvimento das atividades elencadas acima, levaram em consideração os dados levantados no relatório de diagnóstico (atividades 5.1 e 5.2 do TR) e visitas de campo foram realizadas afim de consolidar o conhecimento sobre o sistema aquífero. O relatório das visitas de campo está apresentado no Apêndice.

Por fim, todas as atividades apresentadas e elaboradas englobam a definição do modelo conceitual que permite conhecer o comportamento do sistema e identificar processos

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

de fluxo, assim como os elementos que condicionam o movimento da água. Também foi considerada interposição do sistema aquífero com as bacias hidrográficas.

2 CARACTERIZAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

Os reservatórios subterrâneos componentes do SAPP na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba integram as unidades hidroestratigráficas a seguir: Coberturas Sedimentares, Barreiras, Gramame e Beberibe, distribuídas em área total de 4.356 km² (Figura 2.1). A base do SAPP é constituída por rochas ígneas e metamórficas que atuam como substrato impermeável (Aquiclude).

As Coberturas Sedimentares ocupam área de 1.836 km² da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba no Estado da Paraíba, correspondente a 42% da superfície do SAPP. Reúnem depósitos aluvionares, sedimentos de praias, dunas e coberturas colúvio-eluviais. São também denominadas de coberturas sedimentares superficiais.

Os depósitos aluvionares estão distribuídos nas planícies de inundação e ao longo dos principais cursos de água superficiais. Esses depósitos são compostos predominantemente de areia, cascalho, silte e argila. As planícies aluvionares recebem e armazenam as águas que fluem para as bacias hidrográficas e contribuem com o escoamento de base dos rios.

Os sedimentos de praias, dunas e coberturas colúvio-eluviais compõem as formações superficiais depositadas sobre as principais unidades hidroestratigráficas da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba. As coberturas colúvio-eluviais estão mais bem preservadas da erosão nos terrenos topograficamente mais elevados dos relevos de tabuleiros. As espessuras desse aquífero são reduzidas – estimadas entre 5 m e 20 m, mas eventualmente maiores – razão pela qual não favorecem um grande armazenamento de água subterrânea. De natureza livre e porosidade granular, suas características litológicas predominantemente arenosas propiciam a infiltração de águas pluviais e a recarga vertical dos aquíferos inferiores.

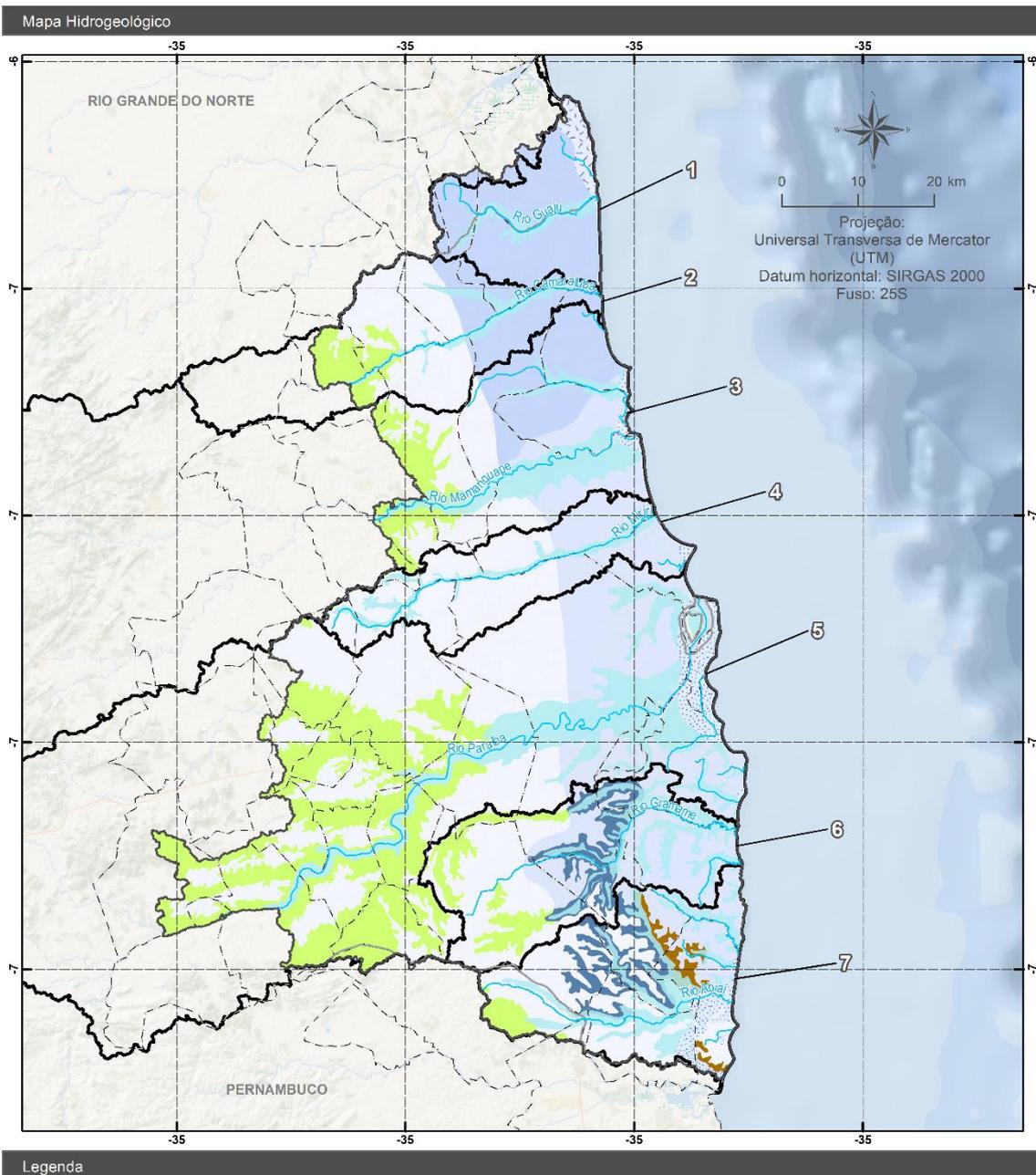


Figura 2.1 - Distribuição dos aquíferos componentes do SAPP na área de estudo. Fonte: CPRM (2019)

 GOVERNO DA PARAIBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

O Aquífero Barreiras aflora extensivamente por 2.386 km² da área de estudo, em superfície equivalente a 55% da área do SAPP. Está recoberto pelos sedimentos do Aquífero Coberturas Sedimentares em boa parte de sua extensão e sobrepõem-se, ora diretamente ao embasamento pré-cambriano, ora sobre o Aquitardo Gramame ou o Aquífero Beberibe. Apresenta espessuras variando entre 30 m e 120 m e ocorre sob a forma de extensos tabuleiros ou de suaves ondulações ao longo de todo o litoral (Lima et al., 2004). É caracterizado como de extensão regional, natureza livre a semilivre, contínuo, heterogêneo, anisotrópico e de porosidade granular.

O Aquitardo Gramame aflora em extensão reduzida de apenas 23 km², numa faixa descontínua orientada NW-SE, no extremo sul da área de estudo, onde encontra-se sobreposto ao Aquífero Beberibe. É composto de sucessão de calcários e margas depositados em uma plataforma carbonática. Sondagens elétricas indicaram que essa unidade hidroestratigráfica ocorre descontinuamente no sistema e de modo restrito no norte da área de estudo (Costa et al., 2007). Segundo Furrier et al. (2006), essa unidade é encontrada somente até 20 quilômetros continente adentro. Sua espessura pode atingir até mais de 100 m e a média é de 50 m (Costa et al., 2007). É caracterizado como de extensão local, heterogêneo, descontínuo e de porosidade granular.

O Aquífero Beberibe aflora descontinuamente em extensão reduzida de apenas 111 km² da área de estudo, a sul da Falha de Itabaiana, em superfície correspondente a 2,5% da área do SAPP. Assenta-se sobre rochas pré-cambrianas do embasamento e é recoberto localmente pelo Aquitardo Gramame, ou diretamente pelo Aquífero Barreiras. É constituído por arenitos continentais médios a grossos variando até arenitos conglomeráticos de ambientes flúvio lacustres, com frequentes intercalações de pelitos. Essa unidade hidroestratigráfica compreende também as fácies litorânea-marinhas rasas que predominam na porção superior, atribuídas à Formação Itamaracá (Costa et al., 2007). O Aquífero Beberibe, com base nos estudos existentes, é caracterizado como de extensão regional, natureza livre a semiconfinada/confinada, contínuo, heterogêneo, anisotrópico e de porosidade granular. Suas espessuras podem atingir entre 150 m e 250 m (Lima et al., 2004).

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Segundo a concepção hidrogeológica prevalente (PERH-PB, 2022; AESA, 2022); Costa et al., 2007), o SAPP na área de estudo tem sido subdividido em dois subsistemas principais:

- O subsistema livre, composto predominantemente por sedimentos do Grupo Barreiras e, eventualmente, pelos sedimentos quaternários (de praia, dunas e aluviões) que se lhe sobrepõem e, mais restritamente, pelos calcários sotopostos da Formação Gramame, podendo englobar, ainda que localmente, os arenitos calcíferos da porção superior da Formação Beberibe, denominada de Formação Itamaracá;

O subsistema confinado a semiconfinado ocorre bem caracterizado no Bloco João Pessoa- Pitimbu e na parte leste do Bloco Alhandra-Pedras de Fogo, onde a Formação Gramame ainda foi preservada da erosão, sendo sobreposto pelo subsistema livre, contido nos sedimentos da Formação Barreiras e depósitos quaternários (Costa et al., 2007).Do ponto de vista prático, não existem informações suficientes e de qualidade disponíveis que permitam avaliar separadamente esses dois subsistemas no âmbito da área de estudo, uma vez que a espessura e extensão da camada confinante superior – que separa o aquífero livre, acima, do aquífero confinado, abaixo – ainda é desconhecida.

Estudos anteriores realizados na área não apresentaram uma delimitação clara da extensão e espessura da interface confinante e das variações de espessura de cada subsistema do SAPP, reconhecendo a carência de dados. A definição da área de ocorrência da camada confinante, apresentada no capítulo seguinte, reveste-se de caráter operacional, tendo em vista a necessidade de se estabelecer um perímetro aproximado da unidade Gramame, em subsuperfície, para avaliação do subsistema confinado. Estudos geológicos futuros deverão refinar esses limites.

Outro obstáculo refere-se à distribuição das espessuras das unidades livre e confinada na área, tendo em vista a escassez de poços contendo descrições litológicas das unidades hidroestratigráficas e a inexistência de perfilagens geofísicas. Segundo BRAMAR (2018), perfis litológicos são cruciais para a modelagem hidrogeológica e devem ser mais bem avaliados.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

A dificuldade de separação e delimitação das unidades hidroestratigráficas, tanto em campo como em dados de subsuperfície, foi bem enfatizada por Costa et al. (2007), que concluíram que o conjunto de aquíferos, aquíferos e/ou aquíferos do SAPP deveriam ser tratados como um sistema hidrogeológico único, de modo a possibilitar uma avaliação exequível desse reservatório subterrâneo. O relatório do Projeto BRAMAR (2018) nas bacias hidrográficas dos rios Gramame e Paraíba, na região de João Pessoa, aponta que a transição entre os sistemas Barreiras (livre) e Beberibe (confinado) é gradual e ainda não completamente esclarecida, confirmando a dificuldade de separação e delimitação das unidades hidroestratigráficas, mesmo assim, o próprio Projeto BRAMAR e também ASUB utilizam a concepção de análise dos aquíferos de maneira separada, ou seja, um aquífero livre e um confinado.

Segundo Barbosa et al. (2007), o arcabouço estratigráfico da faixa costeira Recife-Natal, que engloba sub-bacias Olinda e Alhandra-Miriri, é carente de dados geológicos, principalmente no trecho que ocorre desde o Alto de Mamanguape até o Alto de Touros, resultando em generalizações a respeito da evolução e do preenchimento sedimentar dessa faixa. Apesar dessas limitações, Barbosa et al. (2007) elaboraram mapas de isópacas das unidades litoestratigráficas do SAPP com base em análise de registros poços.

Esses aspectos técnicos foram discutidos e avaliados na etapa de diagnóstico e a proposição de Costa et al. (2007) mostrou-se procedente para avaliação das espessuras, reservas e disponibilidades preliminares do SAPP, em escala regional. Para a escala de bacias hidrográficas, as informações publicadas por Barbosa et al. (2007) serão consideradas para distinção entre os subsistemas livre e confinado do SAPP, como previsto para o relatório R4.

3 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE OCORRÊNCIA DA UNIDADE GRAMAME

A unidade Gramame tem sido considerada a superfície de confinamento do reservatório subterrâneo Beberibe, em parte da área de estudo, de acordo com diversos estudos publicados.

Essa unidade aflora em apenas 23 km² da região sudeste da Paraíba (CPRM, 2004), em porções alongadas e estreitas ao longo da Falha de Mata Redonda (Figura 3.1),

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

tanto de um como de outro lado dessa estrutura. Em subsuperfície sua extensão ainda não está bem clara, por conta da inexistência de perfilagens geofísicas e de escassos dados litológicos de poços. A seguir, são apresentadas as evidências derivadas de estudos e dados que proporcionam inferências e conjecturas sobre a área de ocorrência e distribuição das espessuras do Aquitardo Gramame. Estes fatores desempenham um papel crucial no controle da natureza do fluxo subterrâneo, influenciando, por conseguinte, as diretrizes de gestão na região ocupada pela referida unidade

Em estudo regional compreendendo a faixa litorânea de Pernambuco ao Rio Grande do Norte, Barbosa et al. (2007) apresentaram uma delimitação da unidade Gramame no Estado da Paraíba, cujo limite norte situa-se na Falha de Miriri e o limite sul na divisa com o Estado de Pernambuco. A área abrange 686 km², com largura máxima da ordem de 30 km e espessura máxima em torno de 100 m, e abrange as áreas de afloramento da unidade reconhecidas na porção sul da área de estudo (Figura 3.2).

Este mesmo estudo apresenta um mapa de isópacas da Formação Gramame, baseado em informações litológicas da área de estudo, fornecendo detalhes sobre a distribuição de suas espessuras (Figura 3.3).

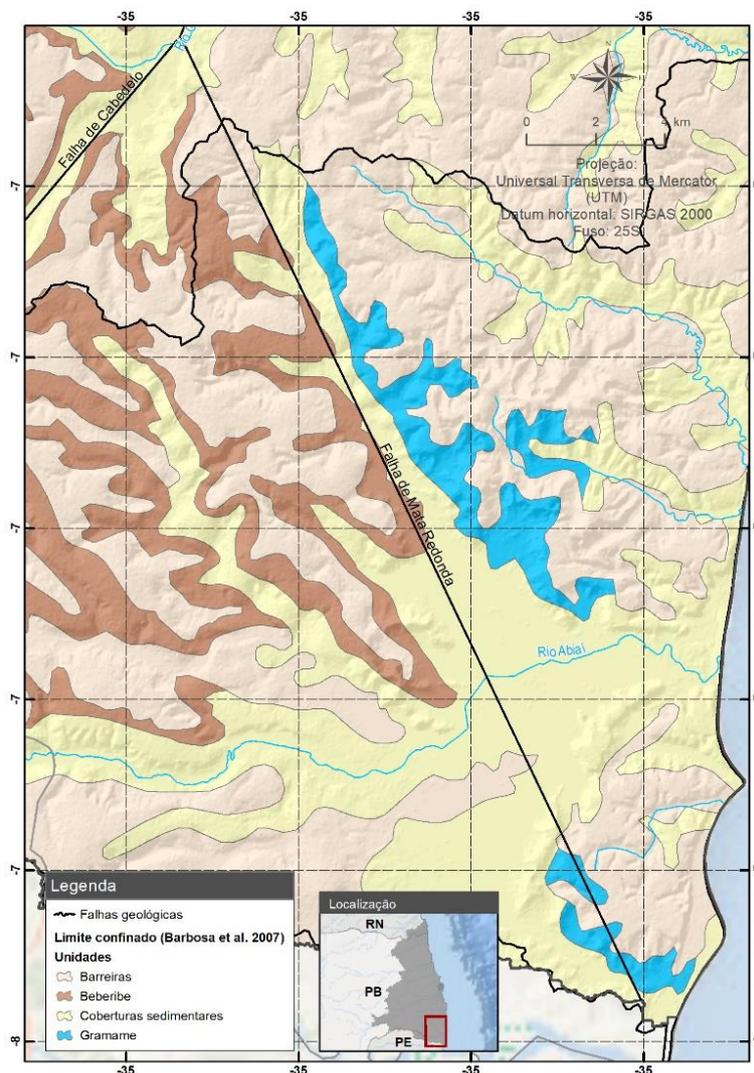
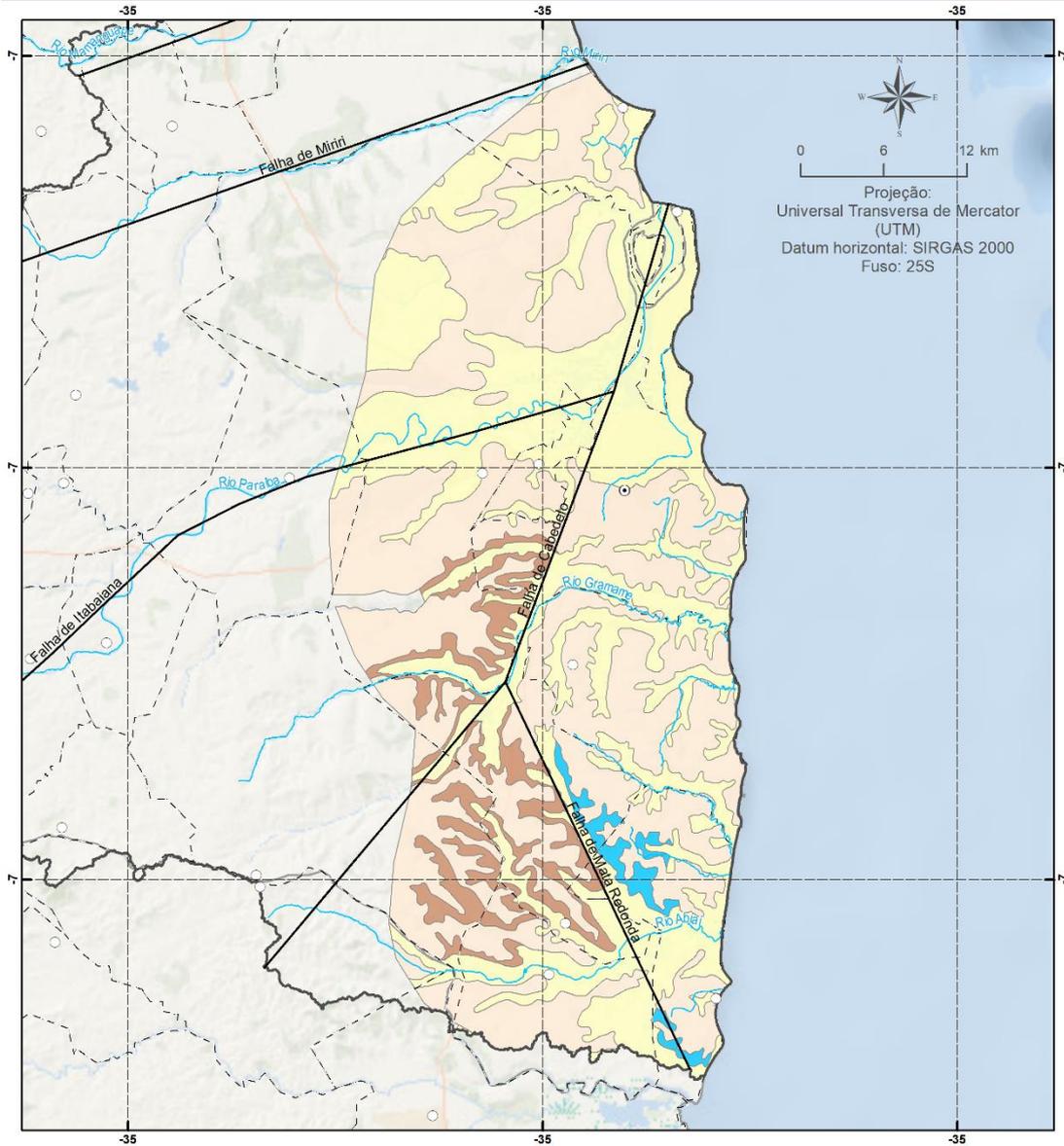


Figura 3.1 – Mapa geológico da porção sul do SAPP (CPRM,2004).

Mapa geológico (Barbosa et. al)



Legenda

- | | |
|------------------------|--|
| ⊙ Capital estadual | Limite confinado (Barbosa et al. 2007) |
| ○ Cidade | Unidades |
| — Falhas geológicas | Barreiras |
| ~ Hidrografia | Beberibe |
| ▭ Área de estudo | Coberturas sedimentares |
| - - - Limite Municipal | Gramame |
| ▭ Limite estadual | |



Figura 3.2 – Área de ocorrência da Formação Gramame, segundo Barbosa et al. (2007), delimitada sobre mapa geológico da CPRM (2004).

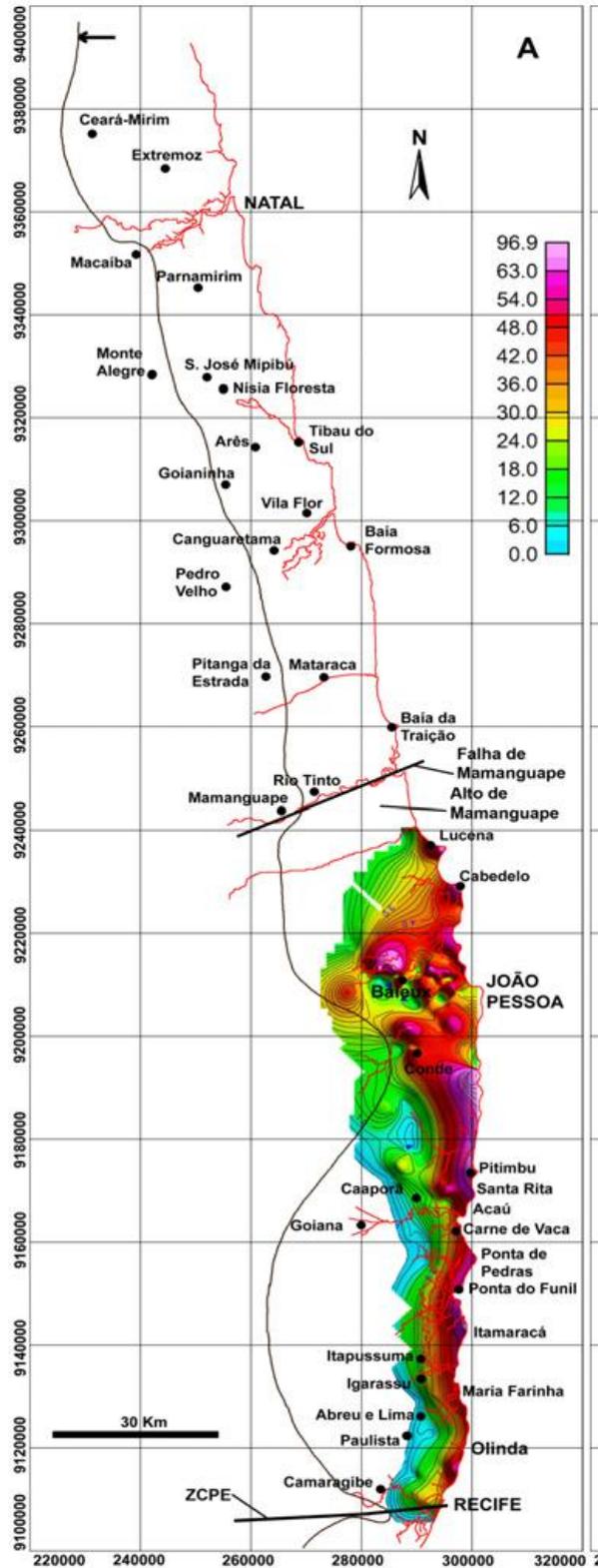


Figura 3.3 - Mapa de isópacas da Formação Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba. Fonte: Barbosa et al. (2007)

 <p>GOVERNO DA PARAÍBA</p> 	<p>Tipo de Documento: Documento de trabalho</p> <hr/> <p>Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03</p>	 <p>THE WORLD BANK IBRD • IDA</p>
--	---	--

Em sondagens elétricas, Costa et al. (2007) observaram que essa unidade Gramame ocorre descontinuamente na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba e de modo restrito no norte da área, e que sua espessura pode atingir até mais de 100 m. Os estudos geofísicos revelaram que esta formação não ocorre nem na parte norte da área de estudo, a partir do curso do Rio Mamanguape, nem na sua parte oeste, a partir da BR-101. Sua presença restringe-se a uma faixa mais próxima do litoral paraibano, particularmente no bloco estrutural denominado João Pessoa-Pitimbu, onde ocorrem as maiores espessuras. Esse bloco estrutural, segundo Costa et al. (2007), é conformado pela intersecção entre as falhas de Cabedelo e Mata Redonda e abrange os afloramentos da unidade Gramame localizados na porção sul da área de estudo.

Poços do cadastro SIAGAS, contendo descrição litológica de 129 poços profundos, foram analisados e plotados no mapa da Figura 3.4, sobre área da unidade Gramame definida por Barbosa et al. (2007). Os poços contendo camadas de calcário (litologia típica da unidade Gramame) em espessuras individuais variáveis, distribuídas em até 6 camadas, com totais variando de 3 m a 141 m, posicionadas em diversas profundidades, ocorrem no bloco estrutural João Pessoa-Pitimbu e Paraíba, ao longo da Falha de Cabedelo, todavia, não estão presentes no bloco estrutural Alhandra - Pedra de Fogo. Ressalva-se que o mapa geológico da CPRM (2004) registra um afloramento da unidade Gramame no citado bloco.

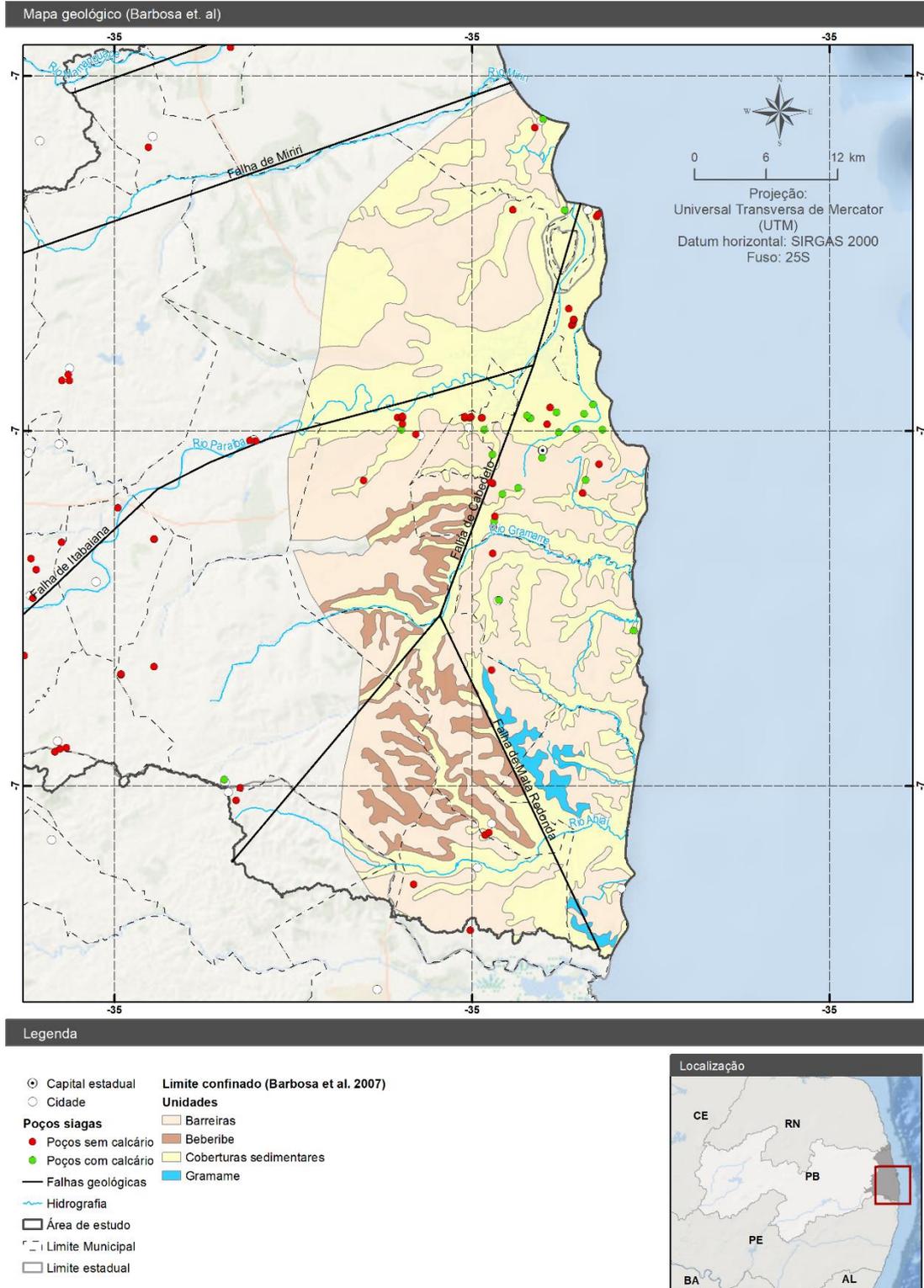


Figura 3.4 – Poços com descrição litológica extraídos do cadastro SIAGAS, plotados sobre a área da Formação Gramame, definida por Barbosa et al. (2007).

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Um fato importante que chama a atenção é o registro de poços do cadastro SIAGAS sem indicação de camadas de calcário, localizados na mesma área de poços que atingiram rochas carbonáticas. A Figura 3.6 mostra uma seção geológica entre poços com dados litológicos do cadastro SIAGAS, localizados na região de João Pessoa. A figura evidencia camadas de calcário associadas à unidade Gramame com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas, incluindo o poço 8454, no qual não foram descritas camadas de calcário. Outras seções geológicas apresentadas neste documento (Figura 3.7 à Figura 3.9) confirmam esse fato. A Figura 3.5 apresenta o mapa com a localização das quatro seções contempladas.

Conforme demonstrado acima, uma delimitação mais precisa da extensão da unidade Gramame nas bacias hidrográficas dos rios Paraíba, Gramame e Abiaí demandará uma quantidade mais significativa e detalhada de informações subsuperficiais.

Considerando a importância da delimitação do Aquitardo Gramame para a gestão dos recursos hídricos do SAPP, foi definido um perímetro preliminar para esse aquitardo (Figura 3.10), a partir da integração das diversas informações apresentadas neste capítulo.

Para estimar as espessuras da camada carbonática confinante do subsistema Beberibe, utilizaram-se dados litológicos provenientes de poços catalogados no SIAGAS/CPRM, localizados dentro da área preliminarmente delimitada da unidade Gramame. A análise e distribuição das espessuras do Aquitardo Gramame, obtidas por interpolação dos dados litológicos, são apresentadas na Figura 3.11, cujos valores variam entre 4 m e 92 m. Esses resultados são consistentes com dados previamente publicados por diversos autores, incluindo Costa et al. (2007) e Barbosa et al. (2007). É importante ressaltar que a estimativa da camada carbonática deve ser interpretada com cautela, pois as descrições dos perfis litológicos contidas nos relatórios de perfuração são imprecisas e pouco detalhadas.

Mapa dos poços e seções geológicas na área do SAPP

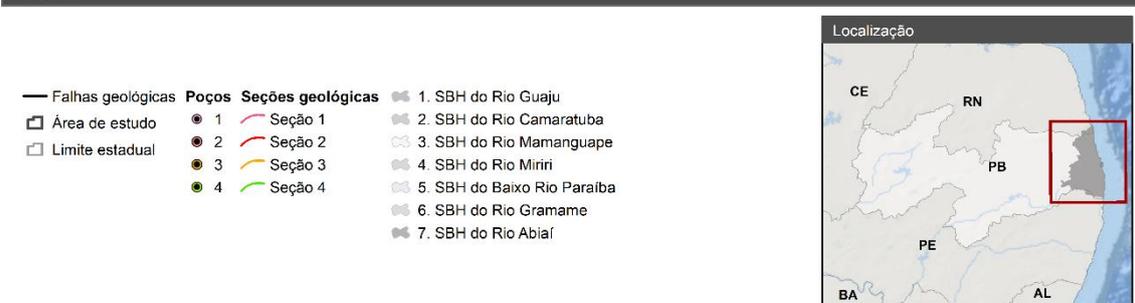
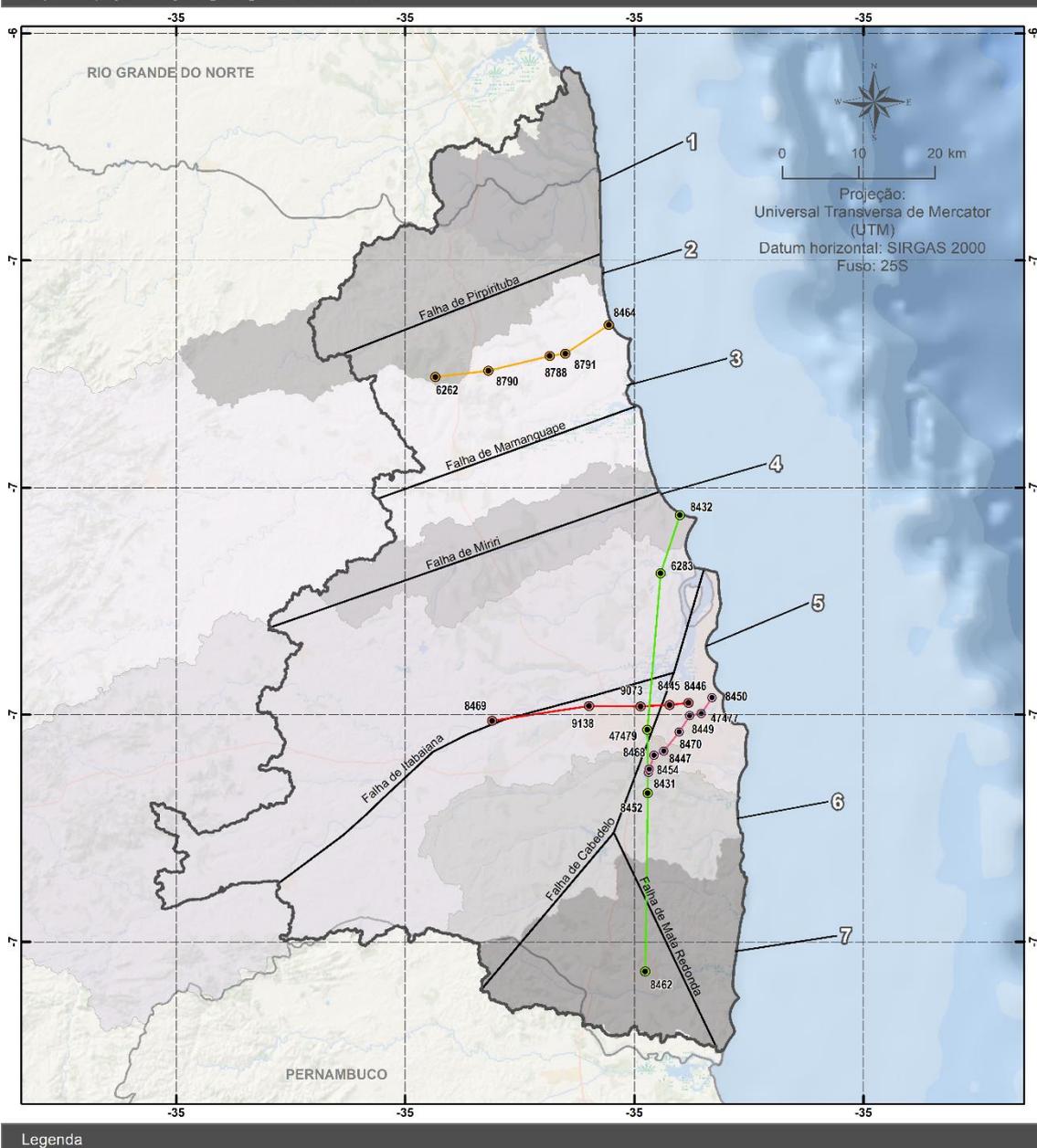


Figura 3.5 – Mapa de localização das seções geológicas apresentadas da Figura 3.6 à Figura 3.9.

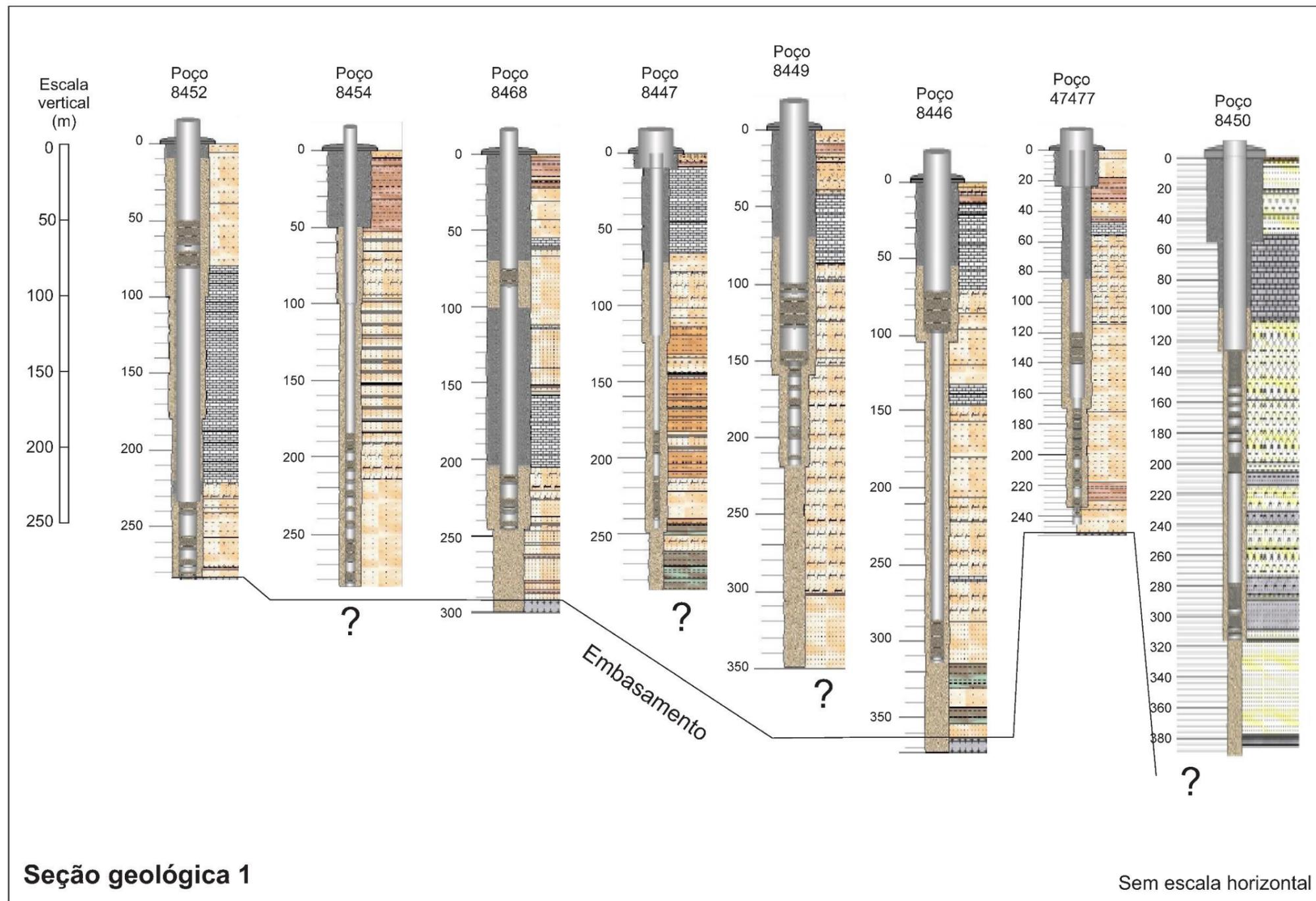


Figura 3.6 – Seção geológica 1 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.

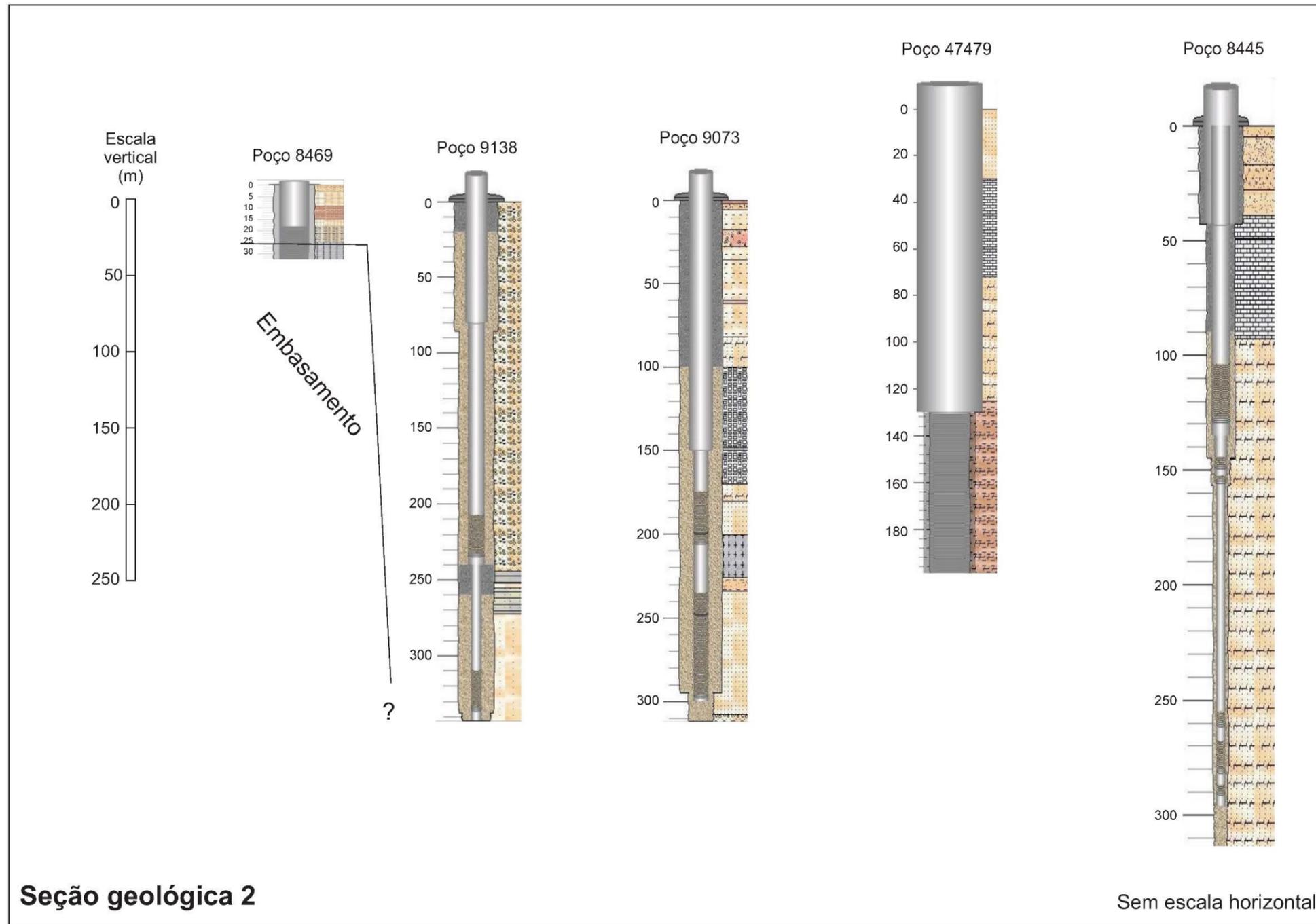


Figura 3.7 – Seção geológica 2 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.

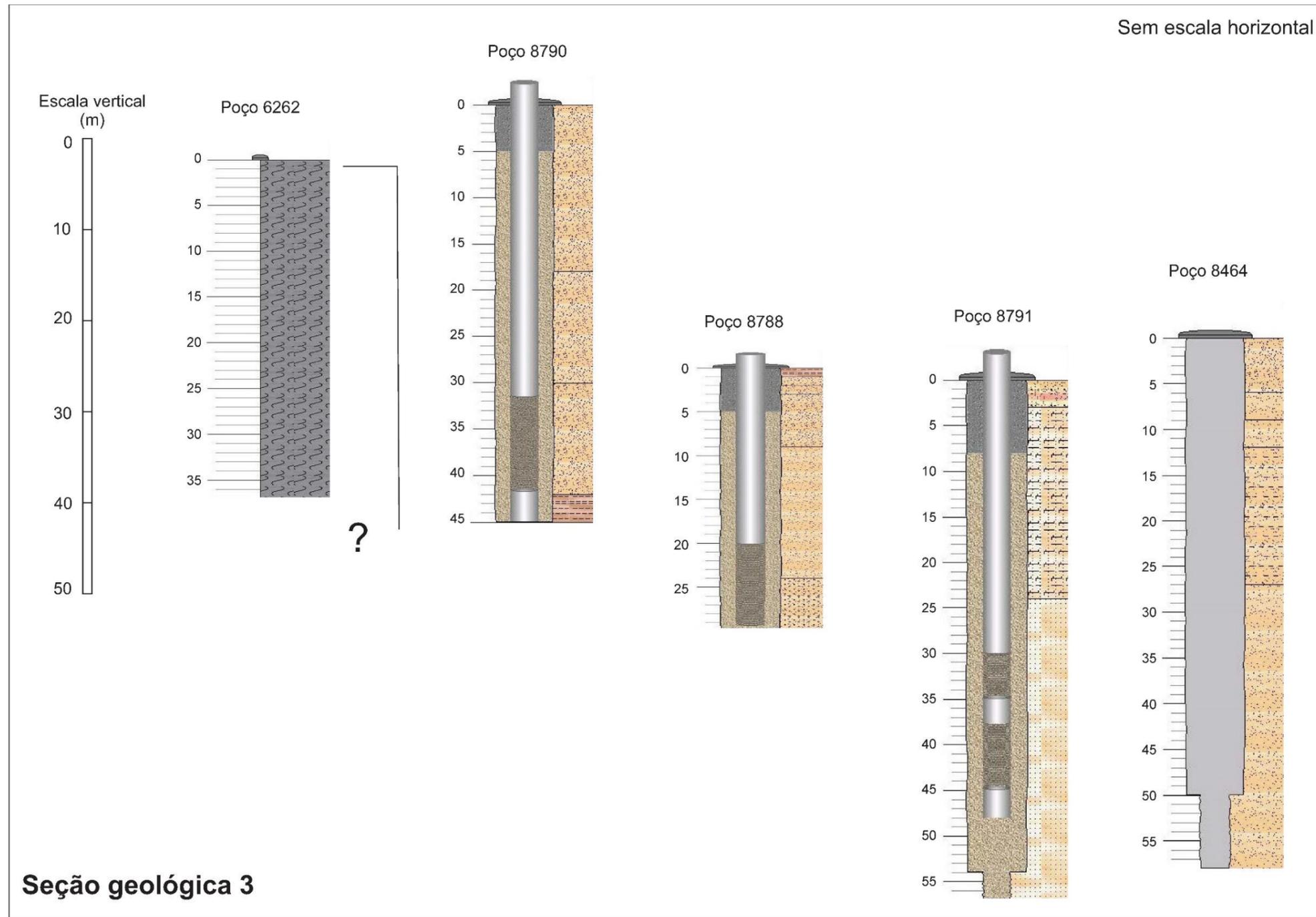


Figura 3.8 – Seção geológica 3 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.

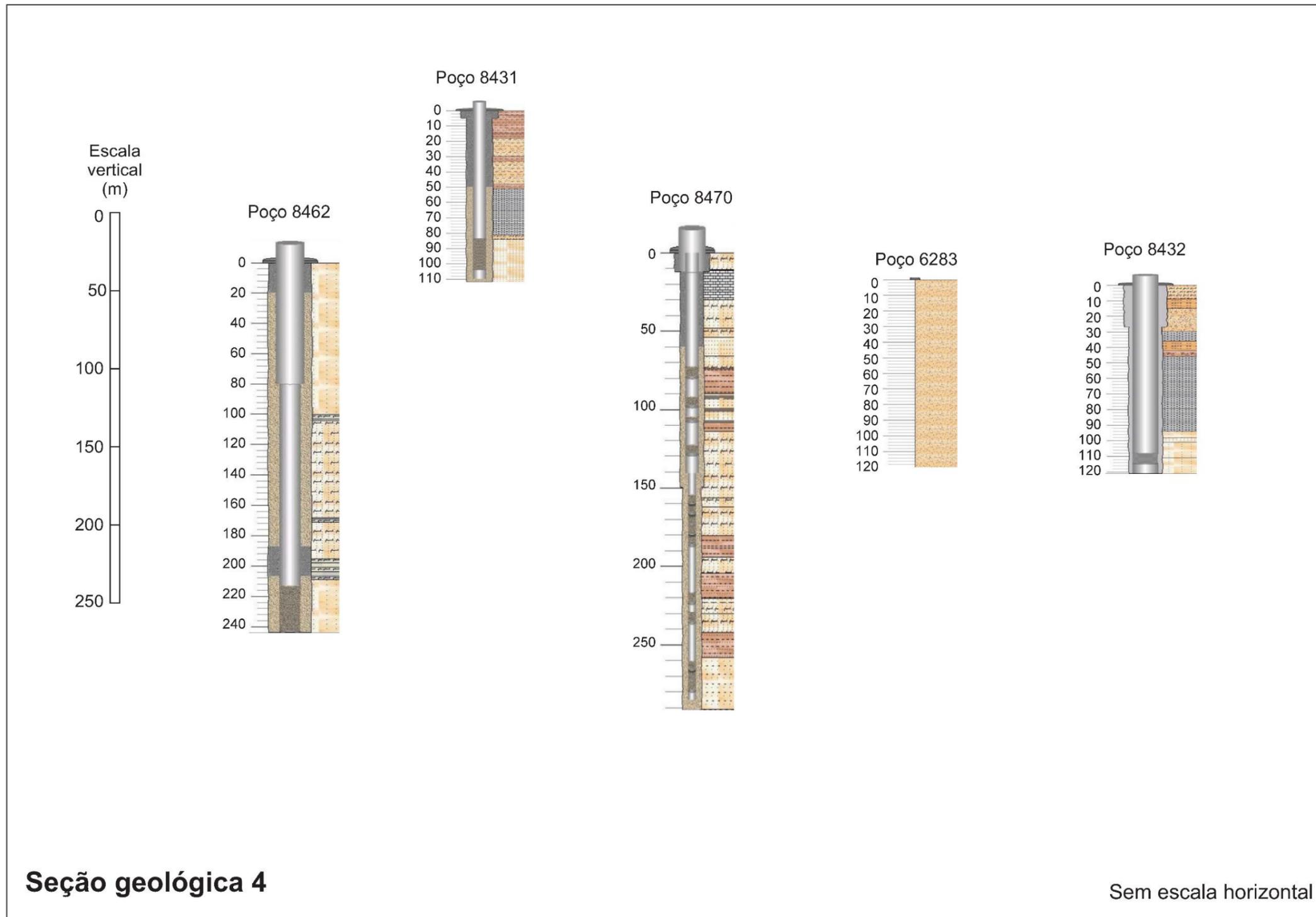
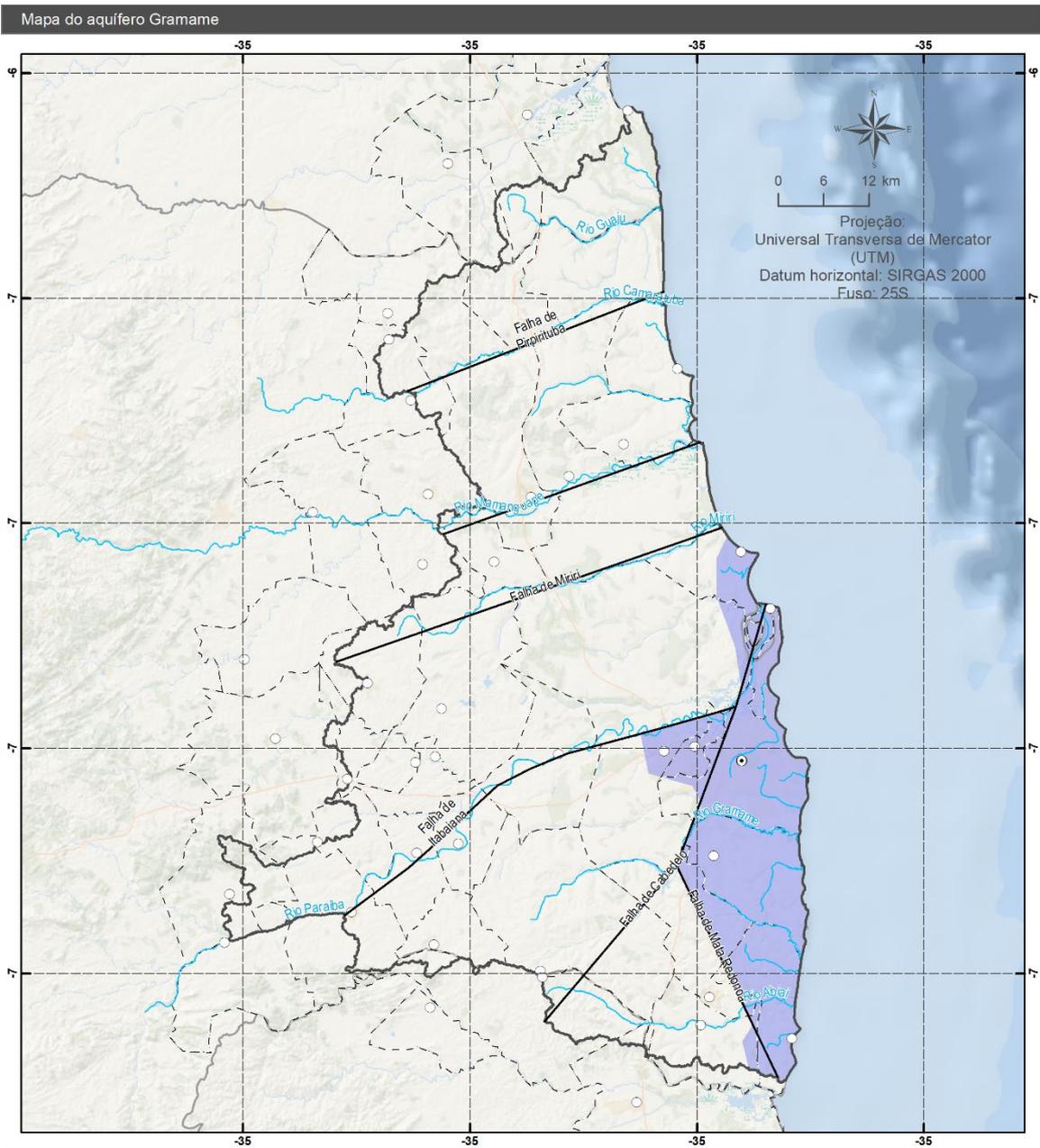


Figura 3.9 – Seção geológica 4 com perfis de poços do cadastro SIAGAS, mostrando camadas de calcário com espessuras variáveis e posicionadas em diferentes cotas.



Legenda



Figura 3.10 – Delimitação da área de ocorrência da unidade Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.

Mapa de espessura no Aquífero Gramame

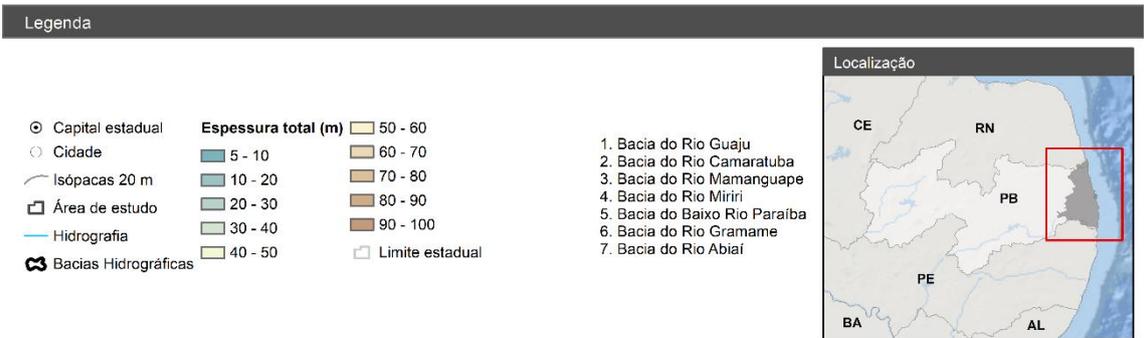
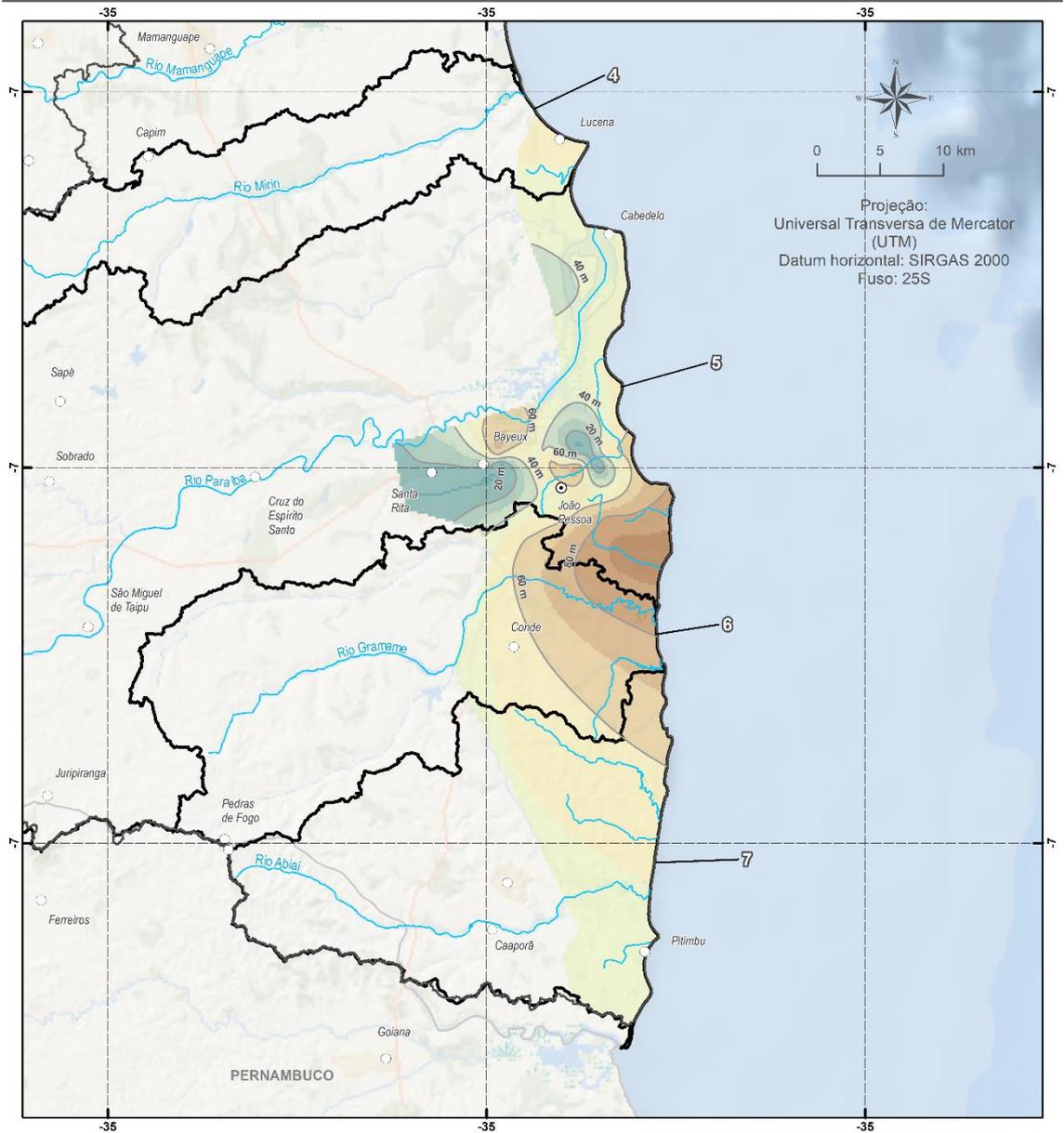


Figura 3.11 – Mapa de isópacas da Formação Gramame na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

4 CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DO SAPP

Os subcapítulos a seguir apresentam análises quantitativas preliminares referentes a reservas, disponibilidades e recargas, tais estudos serão novamente discutidos no produto 4.

4.1 Espessuras saturadas do SAPP

As espessuras totais saturadas do SAPP aumentam em direção à costa, a partir dos limites próximos ao embasamento aflorante, acompanhando o mergulho do embasamento no sentido leste, em direção ao oceano.

Essas espessuras distribuem-se desigualmente segundo um controle estrutural promovido por falhamentos normais, transversais à área do SAPP (Costa et al., 2007), configurando compartimentos deposicionais distintos (Figura 4.1).

Dois depocentros principais se destacam: um a norte da Falha de Mamanguape, concentrando as maiores espessuras saturadas, com máxima de 525 m e média de 278 m; e o outro entre as Falhas de Itabaiana e Miriri, com espessura máxima de 438 m e média de 206 m.

Entre as falhas de Miriri e Mamanguape, as espessuras máximas alcançam 397 m e a média é de 170 m, indicando que o substrato cristalino nessa área se encontra mais elevado.

Igualmente, a sul da Falha de Itabaiana o substrato encontra-se relativamente mais elevado, e as espessuras saturadas máxima e média são, respectivamente, 370 m e 130 m.

O volume rochoso saturado calculado por geoprocessamento foi de 782 km³ e a espessura média saturada do SAPP foi estimada em 187 m.

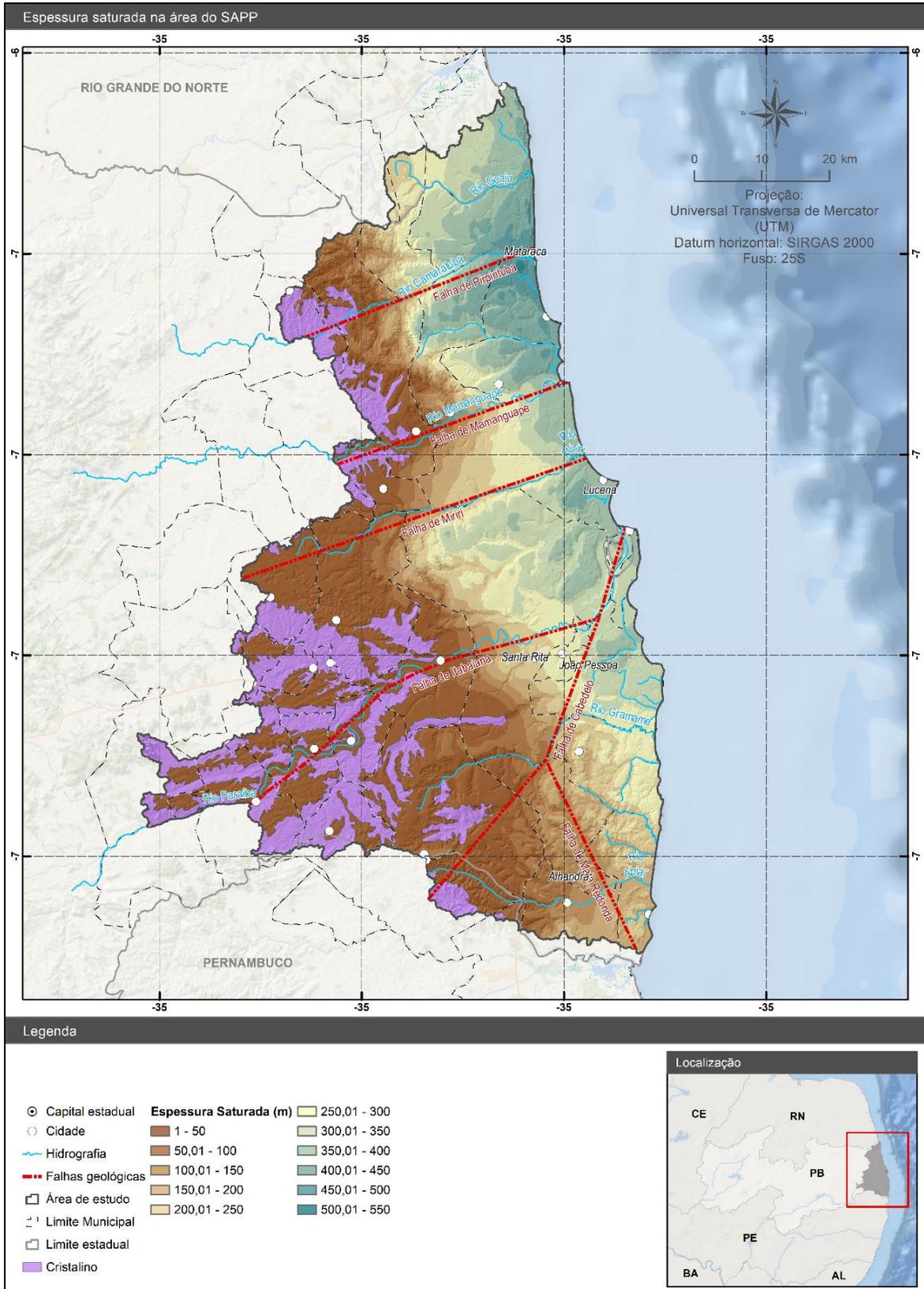


Figura 4.1 – Espessuras saturadas do SAPP na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.

 GOVERNO DA PARAIBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

4.2 Reservas hídricas do SAPP

As reservas renovável e permanente foram apresentadas de forma preliminar no relatório de Diagnóstico, incluindo o método utilizado para cálculo. Neste relatório é apresentado apenas uma síntese das reservas obtidas na etapa anterior. No próximo relatório, Produto 4, o cálculo das reservas será feito por subsistema aquífero.

As reservas hídricas subterrâneas totais do SAPP compreendem a soma das reservas renováveis e permanentes desse sistema.

As reservas renováveis foram estimadas preliminarmente em 0,78 km³/ano e as reservas permanentes em 78,18 km³, totalizando 78,96 km³. As reservas reguladoras representam apenas 0,1% das reservas permanentes.

4.3 Disponibilidades hídricas do SAPP

As disponibilidades representam uma parcela das reservas hídricas subterrâneas totais e equivalem às reservas exploráveis. O método de cálculo dos resultados preliminares das disponibilidades foi apresentado no relatório de Diagnóstico.

As disponibilidades hídricas da reserva renovável do SAPP consideraram a utilização máxima de 50% dessa vazão anual, correspondente a 0,39 km³/ano, de modo a garantir a sustentabilidade dos cursos de água superficiais.

As disponibilidades da reserva permanente consideraram a utilização de 0,2%/ano do volume armazenado abaixo da zona de descarga, correspondente a 0,16 km³/ano.

As disponibilidades hídricas subterrâneas totais anuais, referentes às reservas renováveis e permanentes desse sistema, somam 0,55 km³/ano e representam 70% da recarga estimada para o SAPP. A distribuição das disponibilidades hídricas estimadas de forma preliminar para o SAPP é mostrada na Figura 4.2.

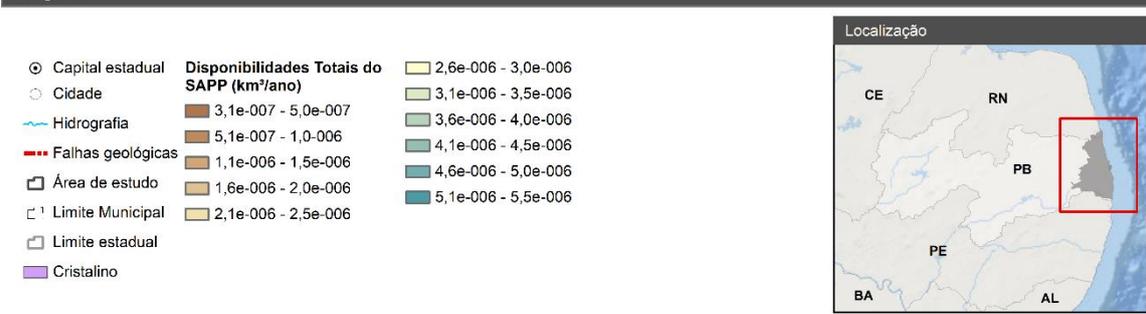
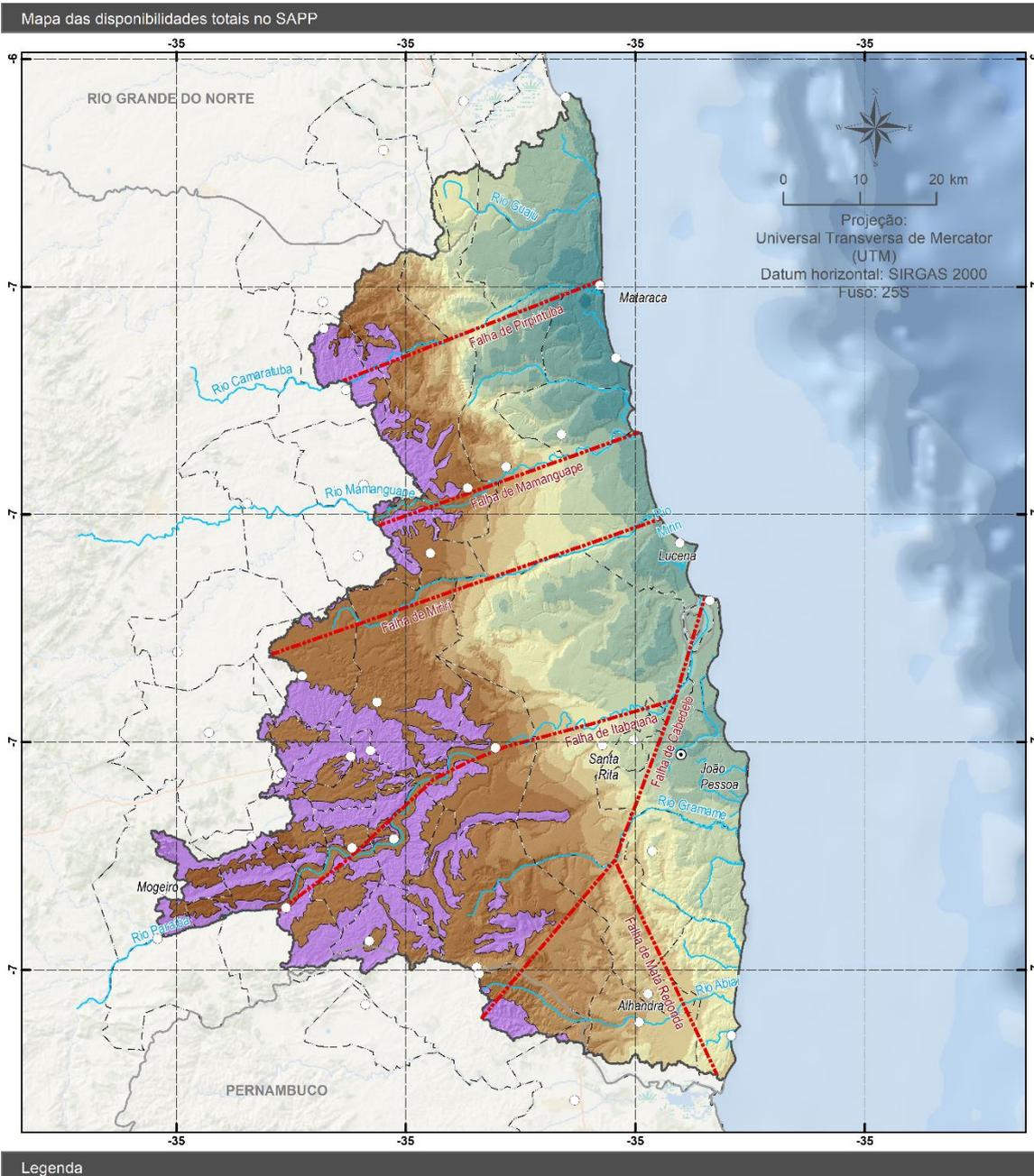


Figura 4.2 – Distribuição das disponibilidades anuais totais do SAPP.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

4.4 Parâmetros hidrodinâmicos do SAPP

Os parâmetros hidrodinâmicos que governam a circulação e o armazenamento das águas subterrâneas no subsolo, responsáveis pela quantidade de água acumulada e explotável desses reservatórios são:

- porosidade efetiva ($\emptyset e$);
- condutividade hidráulica (K);
- transmissividade (T); e
- coeficiente de armazenamento (S);
- vazão;
- vazão específica;
- níveis.

Esses parâmetros permitem caracterizar e prever o comportamento do fluxo subterrâneo em situações de interferência entre poços, infiltração de contaminantes, rebaixamentos de longo termo etc., fornecendo os elementos necessários ao conhecimento e à gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos valores dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados para a área de estudo obtidos de diferentes fontes. As informações estão organizadas por aquífero, entretanto, nem todos os dados encontrados possuíam essa distinção. Na sequência, são detalhados os dados encontrados a partir de cada fonte e suas especificidades.

Em termos regionais, CPRM (2019) elaborou uma caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Paraíba-Pernambuco, distinguindo seis unidades hidroestratigráficas e caracterizando-as em termos de classes de vazão (Figura 4.3) e de parâmetros hidrodinâmicos (Quadro 4.1). A descrição dos parâmetros em cada unidade está apresentada a seguir.

Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros hidrodinâmicos encontrados para os diferentes aquíferos do SAPP

Fonte	Vazões	Vazões específicas	Condutividade Hidráulica	Transmissividade	Coefficiente de Armazenamento
Eólicos e litorâneos					
CPRM	entre 1,0 m ³ /h e 10,0 m ³ /h	inferior a 0,4 m ³ /h/m	menor do que 1,0 x 10 ⁻⁷	menor do que 1,0 x 10 ⁻⁵ m ² /s	-
Aluvionares					
CPRM	entre 10,0 m ³ /h a 25,0 m ³ /h	0,4 m ³ /h/m a 1,0 m ³ /h/m	entre 1,0 x 10 ⁻⁷ m/s e 1,0 x 10 ⁻⁶ m/s	1,0 x 10 ⁻⁵ m ² /s e 1,0 x 10 ⁻⁴ m ² /s	-
Gramame					
	menor do que 1,0 m ³ /h	inferior a 0,04 m ³ /h/m	menor do que 1,0 x 10 ⁻⁸ m/s	menor que 1,0 x 10 ⁻⁶ m ² /s	-
Beberibe					
CPRM	superiores a 100 m ³ /h	4,0 m ³ /h/m	maior que 1,0 x 10 ⁻⁴ m/s	maior que 1,0 x 10 ⁻² m ² /s	
Lima et al. (2004)	100 m ³ /h (poços c prof > 250m)	-	-	-	-
Costa et al. (2007)	entre 9,1 e 54,5 m ³ /s	-	2,7x10 ⁻⁵ m/s	1,60x10 ⁻³ m ² /s	1,5x10 ⁻⁴
SIAGAS (média)	51,3 m ³ /h	1,9 m ³ /h/m	-	-	-
Barreiras					
CPRM	1,0 m ³ /h a 50 m ³ /h	entre 0,04 m ³ /h/m e 2,0 m ³ /h/m	1,0 x 10 ⁻⁸ m/s a 1,0 x 10 ⁻⁵ m/s	1,0 x 10 ⁻⁶ m ² /s a 1,0 x 10 ⁻³ m ² /s	-
Costa et al. (2007)	-	-	1,0x10 ⁻⁴ m/s	1,7x10 ⁻³ m ² /s	5,0x10 ⁻⁴
SIAGAS (média)	26,6 m ³ /h	1,5 m ³ /h/m	-	-	-
Informações mescladas					
SIAGAS (média)	20,6 m ³ /h	1,8 m ³ /h/m	-	-	-

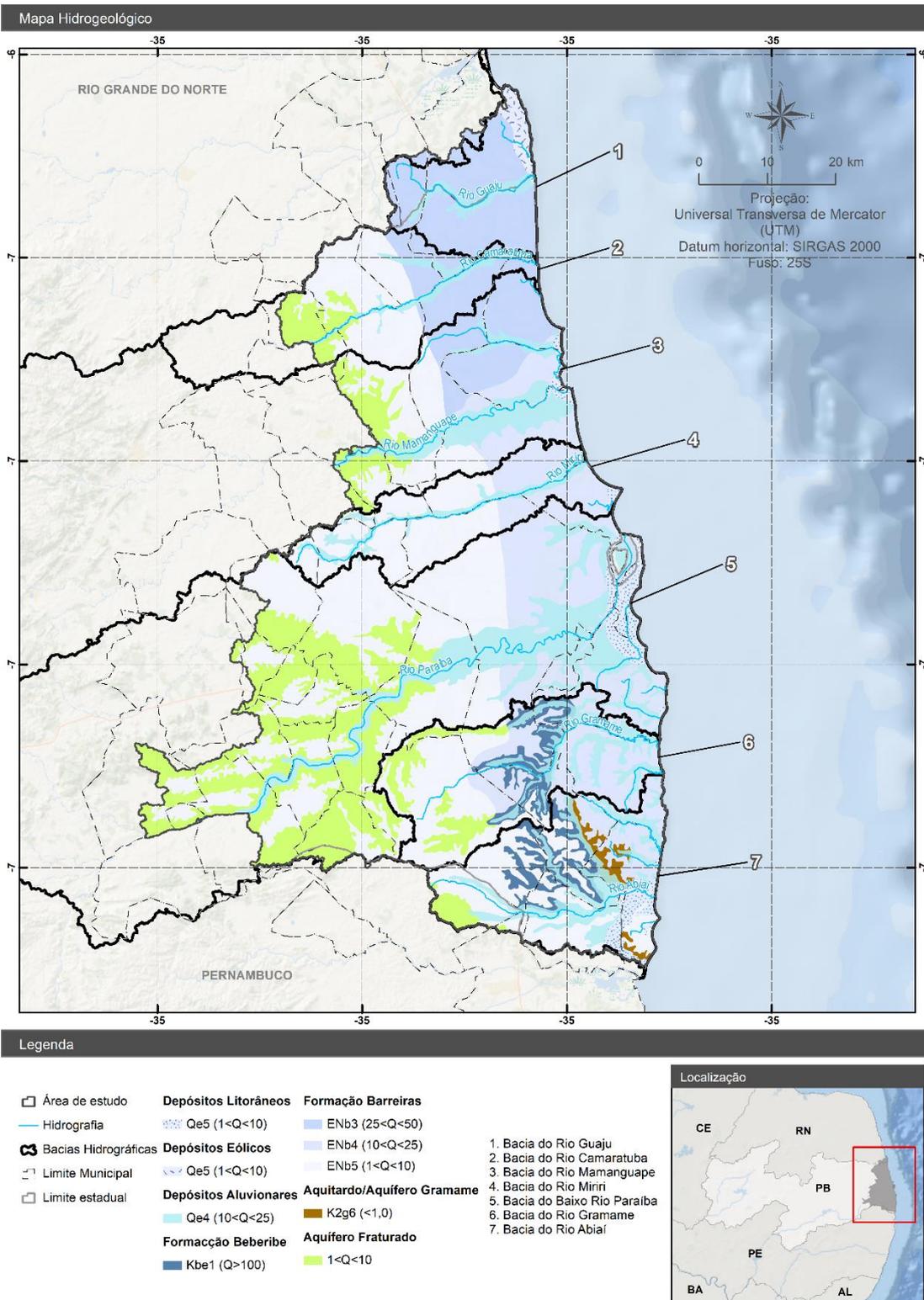
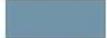
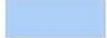
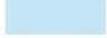
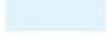


Figura 4.3 – Mapa hidrogeológico da área de estudo (CPRM, 2019)

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

Quadro 4.1 – Classes de vazão e parâmetros hidrodinâmicos das unidades hidroestratigráficas representadas no mapa hidrogeológico da Figura 4.3.

Classe	Granular	Q (m ³ /h) *	Q/s (m ³ /h/m)	T (m ² /s)	K (m/s)
(1)		$Q \geq 100$	$Q/s \geq 4,00$	$T \geq 10^{-2}$	$K \geq 10^{-4}$
(2)		$50 \leq Q < 100$	$2,00 \leq Q/s < 4,00$	$1,0 \times 10^{-3} \leq T < 1,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-5} \leq K < 1,0 \times 10^{-4}$
(3)		$25 \leq Q < 50$	$1,00 \leq Q/s < 2,00$	$1,0 \times 10^{-4} \leq T < 1,0 \times 10^{-3}$	$1,0 \times 10^{-6} \leq K < 1,0 \times 10^{-5}$
(4)		$10 \leq Q < 25$	$0,40 \leq Q/s < 1,00$	$1,0 \times 10^{-5} \leq T < 1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-7} \leq K < 1,0 \times 10^{-6}$
(5)		$1 \leq Q < 10$	$0,04 \leq Q/s < 0,40$	$1,0 \times 10^{-6} \leq T < 1,0 \times 10^{-5}$	$1,0 \times 10^{-8} \leq K < 1,0 \times 10^{-7}$
(6)		$Q < 1$	$Q/s < 0,04$	$T < 1,0 \times 10^{-6}$	$K < 1,0 \times 10^{-8}$

Os aquíferos formados por depósitos eólicos e litorâneos fornecem vazões baixas, entre 1,0 m³/h e 10,0 m³/h, e possuem condutividade hidráulica (K) menor do que $1,0 \times 10^{-7}$ m/s, transmissividade (T) menor do que $1,0 \times 10^{-5}$ m²/s e vazão específica (q/s) inferior a 0,4 m³/h/m (CPRM, 2019).

Os aquíferos aluvionares permitem a extração de vazões variando de baixa a moderada, entre 10,0 m³/h a 25,0 m³/h. As vazões específicas variam de 0,4 m³/h/m a 1,0 m³/h/m, as condutividades hidráulicas situam-se entre $1,0 \times 10^{-7}$ m/s e $1,0 \times 10^{-6}$ m/s e as transmissividades variam entre $1,0 \times 10^{-5}$ m²/s e $1,0 \times 10^{-4}$ m²/s (CPRM, 2019).

O Aquífero Barreiras apresenta grande variação de vazões, desde baixas (1,0 m³/h) até altas (50 m³/h). As vazões específicas situam-se entre 0,04 m³/h/m e 2,0 m³/h/m. As condutividades hidráulicas variam de $1,0 \times 10^{-8}$ m/s a $1,0 \times 10^{-5}$ m/s e as transmissividades variam de $1,0 \times 10^{-6}$ m²/s a $1,0 \times 10^{-3}$ m²/s (CPRM, 2019).

A CPRM (2019) classifica a unidade hidroestratigráfica Gramame como um aquífero de baixa produtividade, com vazão menor do que 1,0 m³/h e vazão específica inferior a 0,04 m³/h/m. A condutividade hidráulica é menor do que $1,0 \times 10^{-8}$ m/s e a transmissividade não alcança $1,0 \times 10^{-6}$ m²/s (CPRM, 2019).

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

O Aquífero Beberibe é a unidade que apresenta melhor produtividade na área. As vazões podem ser superiores a 100 m³/h e as vazões específicas podem ultrapassar 4,0 m³/h/m. As condutividades hidráulicas e as transmissividades são acima de, respectivamente, a 1,0 x 10⁻⁴ m/s e 1,0 x 10⁻² m²/s (CPRM, 2019).

Lima et al. (2004), no entanto, apresentam vazões menores para os poços no Aquífero Beberibe na Folha João Pessoa, destacando que apenas os poços com mais de 250 metros atingem as vazões de 100 m³/h.

Testes de bombeamento realizados por Costa et al. (2007) no Aquífero Beberibe apontaram condutividades hidráulicas calculadas variando de 2,66 x 10⁻⁶ m/s a 6,22 x 10⁻⁵ m/s e transmissividades de 2,45 x 10⁻⁴ m²/s e 4,79 x 10⁻³ m²/s. O coeficiente de armazenamento foi calculado em 1,5.10⁻⁵, por meio de um único ensaio com poço de observação (Quadro 4.2).

Quadro 4.2 – Resultados dos ensaios de bombeamento (Costa et al., 2007)

Local	Município	Aquífero	Prof. (m)	N.E. (m)	N.D. (m)	Vazão (m ³ /h)	T (m ² /d)	K (m/d)	S
Hosp. Universitário	J.Pessoa	Beberibe	140	43,9	54,7	16,16	209,50	5,24	
Cruz das Armas	J.Pessoa	Beberibe	202	46,1	72,1	54,60	136,15	1,18	
Alto do Mateus	J.Pessoa	Beberibe	300	44,5	61,8	39,60	66,67	0,24	
Loteam.Solimões	J.Pessoa	Bar./Beber	120	21,8	32,1	15,53	223,00	2,62	
Distrito Industrial	J.Pessoa	Beberibe	84	32,9	33,6	27,31	356,79	5,94	1,5.10 ⁻⁵
Marcação I	Marcação	Beberibe	126	71,6	87,9	18,86	92,78	1,03	
Marcação II	Marcação	Beberibe	121	68,8	100	9,43	21,25	0,23	
Mata Redonda	Alhandra	Bar/Beber.	100	7,1	31,2	49,50	48,54	1,21	
Uruba	Mataraca	Beberibe	122	74,8	77,2	9,10	414,26	5,37	
Cajarana	Rio Tinto	Beberibe	102	60,6	69,7	8,61	181	3,02	
Fagundes	Lucena	Barreiras	20	1,2	11,0	24,00	2646,0	207,4	1,2.10 ⁻⁴

Costa et al. (2007) consideram como parâmetros hidrodinâmicos de referência para o Aquífero Beberibe os valores: condutividade hidráulica 2,7x10⁻⁵ m/s, transmissividade 1,60x10⁻³ m²/s e coeficiente de armazenamento 1,5x10⁻⁴. Para o Aquífero Barreiras, os valores de referência são: condutividade hidráulica 1,0x10⁻⁴ m/s, transmissividade 1,7x10⁻³ m²/s e coeficiente de armazenamento 5,0x10⁻⁴.

A partir da base consolidada de dados cadastrais de poços (BD Poços), contendo 1.132 dados de captações tubulares, foram analisados os parâmetros hidráulicos vazão e vazão específica. Esses parâmetros foram analisados inicialmente por aquífero e depois

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

em termos gerais, considerando todas as unidades hidroestratigráficas reunidas no SAPP.

O Aquífero Dunas, agrupado neste estudo no Aquífero Coberturas Sedimentares, apresenta apenas 3 registros de poços, insuficientes para uma análise estatística.

O Aquífero Barreiras está relacionado no banco de dados a apenas 35 registros. Desse total, somente 31 registros listam vazões captadas e 30 listam vazões específicas. As vazões registradas variaram de 2,4 m³/h a 117,4 m³/h, com média de 26,6 m³/h e mediana de 14,9 m³/h. As vazões específicas registradas variaram de 0,12 m³/h/m a 6,7 m³/h/m, com média de 1,5 m³/h/m e mediana de 1,3 m³/h/m.

Quadro 4.3 – Parâmetros hidrodinâmicos estatísticos do Aquífero Barreiras

Parâmetro	Número	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Vazão (m ³ /h)	31,00	2,37	117,39	26,60	14,90
Vaz. Espec. (m ³ /h/m)	30,00	0,12	6,66	1,51	1,25

O mais importante aquífero da área de estudo, o Beberibe, está relacionado no BD Poços a apenas 9 registros, dos quais somente 7 listam os parâmetros hidrodinâmicos aqui analisados. As vazões registradas variaram de 4,0 m³/h a 210,0 m³/h, com média de 51,3 m³/h e mediana de 20,0 m³/h. As vazões específicas registradas variaram de 0,16 m³/h/m a 4,0 m³/h/m, com média de 1,9 m³/h/m e mediana de 2,2 m³/h/m.

Quadro 4.4 – Parâmetros hidrodinâmicos estatísticos do Aquífero Beberibe

Parâmetro	Número	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Vazão (m ³ /h)	7,00	3,99	210,00	51,34	20,00
Vaz. Espec. (m ³ /h/m)	7,00	0,16	3,99	1,94	2,20

A maioria dos dados cadastrais de poços tubulares listados no BD Poços – em número de 1075 – não faz referência ao aquífero captado. Destes, apenas 273 (25%) trazem informações sobre os parâmetros hidrodinâmicos vazão e vazão específica. As vazões registradas variaram de 0,07 m³/h a 210,0 m³/h, com média de 20,6 m³/h e mediana de 7,0 m³/h. As vazões específicas registradas variaram de 0,01 m³/h/m a 16,8 m³/h/m, com média de 1,8 m³/h/m e mediana de 1,1 m³/h/m.

Quadro 4.5 – Parâmetros hidrodinâmicos estatísticos dos aquíferos não identificados

Parâmetro	Número	Mínimo	Máximo	Media	Mediana
Vazão (m ³ /h)	272,00	0,07	210,00	20,59	6,99
Vaz. Espec. (m ³ /h/m)	162,00	0,01	16,18	1,77	1,13

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

Através do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, desenvolvido pelo Serviço Geológico do Brasil, é possível acessar uma base de dados de poços e de informações hidrogeológicas em forma de consulta. Foram obtidos 1.711 cadastros de poços localizados na área de interesse, com 2 poços amazonas, 28 poços escavados, 1 poço ponteira, 1.131 poços tubulares e 549 sem informação de tipo. Os instrumentos foram separados em 3 grupos:

- Grupo 1: captação profunda – classificados como poços tubulares e ponteira;
- Grupo 2: captação rasa – classificados como poço amazonas e escavado;
- Grupo 3: sem informação do tipo de captação.

No Grupo 1, 50% dos dados de NE se encontram entre 8,06 m e 69,00 m, e ND entre 27,17 m e 17,00 m. No que diz respeito à profundidade dos poços cadastrados do Grupo 1, a média é de 71,09 m, com cerca de 25% inferior a 33,00 m, 50% a 50 m e 75% inferior a 88,00 m (Figura 4.4).

O Grupo 2, composto pelos poços rasos – poço amazonas e escavado, com apenas 30 registros, se distribui pela bacia do rio Miriri, Paraíba, Gramame e Abiaí. A profundidade média dos instrumentos é de 15,98 m, com 25% dos dados inferior a 9,50 m, 50% inferior a 16,50 m e 75% inferior a 20,00 m. Em relação ao nível estático, um quarto tem cota de NE inferior a 44,75 m, metade inferior a 122,15 m e três quartos inferior a 143,75 m (Figura 4.5). Para os demais parâmetros para esse grupo – vazão de estabilização, específica e nível dinâmico, não foi feita estatística – contendo apenas um cadastro com os referidos parâmetros.

Os níveis estáticos e dinâmicos do Grupo 3 apresentam uma média de 25,36 m com 50% dos valores entre 4,00 m e 36,00 m, enquanto os níveis dinâmicos variam entre -14,00 m e 19,78 m. Já a profundidade média de é 83,97 m, com 50% dos valores entre 36,75 m e 114,00 m.

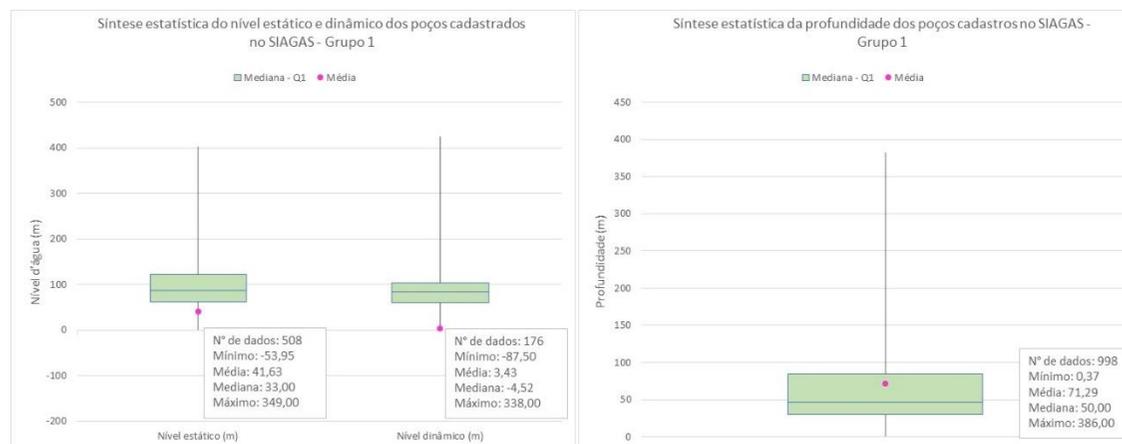


Figura 4.4 – Distribuição estatística do nível estático, nível dinâmico e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 1.

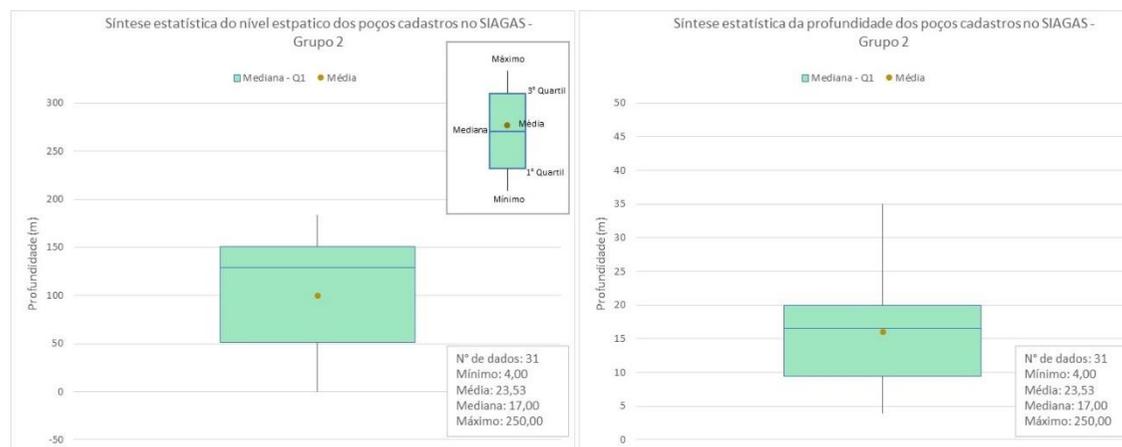


Figura 4.5 – Distribuição estatística do nível estático e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 2.

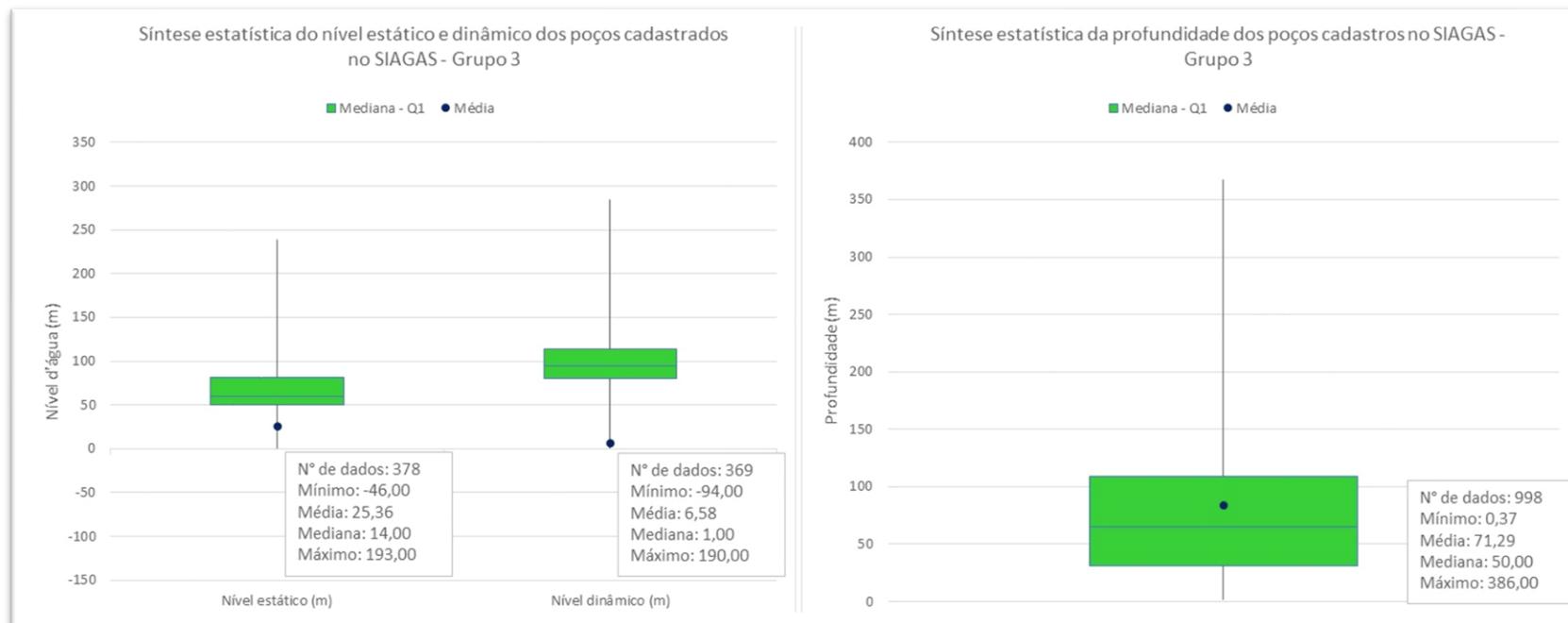


Figura 4.6 – Distribuição estatística de nível estático, nível dinâmico e profundidade dos poços cadastrados no SIAGAS – Grupo 3.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

A caracterização hidrogeológica do Sistema Aquífero Paraíba-Pernambuco, com suas seis unidades hidroestratigráficas, oferece uma visão detalhada das características distintas de cada aquífero. Contudo, divergências nos resultados entre diferentes estudos, especialmente no Aquífero Beberibe, apontam para a necessidade de uma abordagem mais uniforme na coleta e interpretação de dados, garantindo consistência e confiabilidade nas análises.

A análise estatística dos parâmetros hidrodinâmicos dos aquíferos específicos, como Barreiras e Beberibe, destaca a importância de dados mais abrangentes e representativos para uma avaliação mais robusta. A variação nos resultados pode ser associada à falta de dados para algumas unidades, enfatizando a necessidade de esforços adicionais na coleta de informações abrangentes.

Em suma, a compreensão dos parâmetros hidrodinâmicos é essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na região. No entanto, a análise crítica aponta para desafios como a consistência dos dados e a representatividade amostral, ressaltando a importância de abordar essas questões para embasar decisões eficazes na utilização desses recursos.

4.5 Limites físicos do SAPP

As condições de contorno referem-se aos contornos físicos que influenciam o escoamento, como o substrato impermeável, limites dos aquíferos, topografia, espessuras dos aquíferos e conexões com cursos de água superficiais; e aos contornos hidráulicos, que se referem às condições de escoamento, como divisores de água e linhas de corrente (ou linhas de fluxo), potenciometria (carga hidráulica), transmissividade, porosidade efetiva e coeficiente de armazenamento.

As condições de contorno foram abordadas no texto apresentado, em seus diferentes capítulos, em razão de suas especificidades, listadas a seguir:

- potenciometria (carga hidráulica), topografia, conexões com cursos de água superficiais e aos contornos hidráulicos, que se referem às condições de escoamento, como divisores de água e linhas de corrente (ou linhas de fluxo) – Capítulo 6;
- espessuras dos aquíferos – Capítulos 3 e 4.1;
- transmissividade, porosidade efetiva e coeficiente de armazenamento – Capítulo 4.4.

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

Os contornos físicos do SAPP, por sua vez, são representados pelas seguintes condições:

- Leste: faixa costeira adjacente ao oceano, definida pelo nível do mar (cota 0 m);
- Oeste: limite irregular junto ao contato com rochas cristalinas aflorantes do embasamento da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba;
- Norte: zona de cumeada que constitui divisor de águas superficiais da margem esquerda da bacia do rio Guaju, trecho este incidente no estado do Rio Grande do Norte;
- Sul: zona de cumeada que constitui divisor de águas superficiais da margem direita da bacia do rio Abiaí, trecho este incidente no estado de Pernambuco;
- Superior: superfície potenciométrica que intercepta as exposições de rochas sedimentares do SAPP e define as direções de fluxo do aquífero livre;
- Inferior: superfície irregular e falhada do topo do embasamento cristalino, na qual estão acumulados os sedimentos do SAPP.;
- Camada confinante constituída pela formação Gramame, que separa os subsistemas livre e confinado, cujo perímetro estimado é apresentado na Figura 3.10. Ocorre na porção sul do SAPP, no bloco estrutural João Pessoa–Pitimbu, delimitado pela intersecção entre as falhas de Cabedelo e Mata Redonda.

O sistema está distribuído diferenciadamente nos diversos blocos estruturais que o compartimentam. O subsistema livre contido ora apenas no Grupo Barreiras, ora no pacote formado pela superposição das sequências Beberibe (superior ou inferior) e Barreiras, ocorre justamente nas áreas correspondentes aos Blocos onde falta a formação Gramame, ou somente nos sedimentos da Formação Beberibe. Eventualmente, o subsistema se insere nos sedimentos inconsolidados do Quaternário (sedimentos de praia, dunas e aluviões) que se lhe sobrepõem e, mais raramente, nos calcários da Formação Gramame (Costa et al., 2007).

Os blocos onde o subsistema livre ocorre, formado pelo conjunto das formações Beberibe e Barreiras, mais aluviões superpostos, são os seguintes: Camaratuba, Mamanguape, parte oeste do Bloco Miriri, Bloco Paraíba (exceto sua parte próximo ao município de Lucena) e bloco Alhandra-Pedras de Fogo, onde a formação Gramame parece terminar em forma de cunha (Costa et al., 2007).

O subsistema confinado a semiconfinado ocorre bem caracterizado no Bloco João Pessoa-Pitimbu e na parte leste do Bloco Alhandra-Pedras de Fogo, onde a Formação Gramame ainda foi preservada da erosão, sendo sobreposto pelo subsistema livre, contido nos sedimentos da Formação Barreiras e depósitos quaternários (Costa et al., 2007).

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

5 CONDIÇÕES DE RECARGA E DESCARGA DO SAPP

A fim de compreender de forma conceitual a dinâmica dos fluxos das águas subterrâneas nas regiões da área de estudo, duas abordagens distintas foram empregadas:

1. **Áreas Potenciais de Recarga e Descarga:** Nesta abordagem, as zonas de recarga e descarga são vistas como potenciais, refletindo uma condição regional que avalia o fluxo subterrâneo e onde a topografia desempenha um papel crucial na determinação dessas áreas;
2. **Áreas Favoráveis:** A segunda abordagem concentra-se nas camadas mais superficiais do terreno, ou seja, as características de geração de excedentes hídricos no solo. O resultado avalia qualitativamente a facilidade ou favorabilidade que a água precipitada possui para atingir as camadas mais profundas do solo e, por conseguinte, recarregar os aquíferos.

É importante destacar que essas avaliações são distintas e avaliam diferentes compartimentos, e, portanto, são complementares. As diferentes perspectivas adotadas por cada abordagem, oferecem uma visão mais abrangente e detalhada do comportamento hidrogeológico na área de estudo.

5.1 Áreas potenciais de recarga e descarga

A área de recarga do SAPP compreende toda a área de exposição das rochas constituintes desse sistema hidroestratigráfico, capaz de permitir a infiltração direta de águas pluviais.

As condições de infiltração requerem que a zona não saturada tenha permeabilidade suficiente para permitir o fluxo descendente das águas precipitadas, de modo a alcançar a zona saturada do aquífero. Fatores geológicos e topográficos, principalmente, controlam a taxa de infiltração. Por esse motivo, as áreas de recarga e descarga são tratadas como áreas potenciais e representam uma situação regional, como a mostrada no texto.

As áreas onde o fluxo subterrâneo deixa o aquífero e alcança a superfície do terreno são definidas como áreas de descarga. As áreas de descarga são representadas pelas áreas de topografia baixa, adjacentes às planícies dos cursos de água superficiais formadores das bacias hidrográficas. O movimento das águas subterrâneas das altitudes mais elevadas para as mais baixas é contínuo e ocorre mesmo abaixo dos cursos de superficiais. Dependendo das condições climáticas, topográficas e da posição do lençol freático no terreno, as

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

drenagens podem receber contribuição da água subterrânea (drenagens efluentes) ou contribuir com o lençol freático (drenagens influentes).

A sazonalidade climática da área do SAPP se reflete na intermitência de boa parte dos cursos de água superficiais existentes, todavia, a elevação dos níveis na estação chuvosa permite que a água infiltrada seja lentamente devolvida aos rios na forma de escoamento de base. Em situações geológicas específicas, as águas infiltradas no solo podem atingir uma camada impermeável em subsuperfície e aflorar, dando origem a fontes naturais que, por sua vez, também representam zonas de descarga de água subterrânea.

No caso de açudes, lagos e represas, o fluxo para dentro ou para fora dos reservatórios depende da relação entre as cargas hidráulicas do reservatório e do aquífero. Se a carga hidráulica do aquífero for maior do que a do reservatório, o fluxo subterrâneo se dá no sentido do reservatório; se a carga hidráulica do aquífero for menor do que a do reservatório, o fluxo se dirige do reservatório para o aquífero (Figura 5.1).

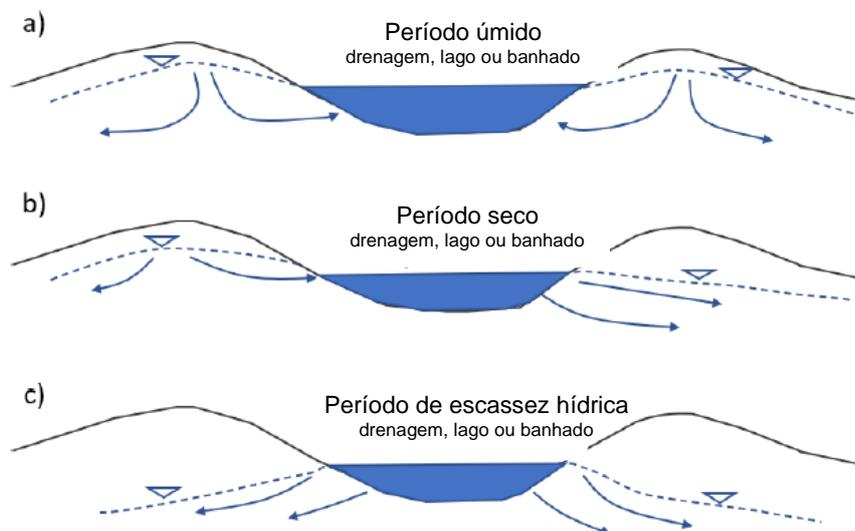


Figura 5.1 – Variações sazonais do nível de água subterrânea em cursos superficiais, lagos e áreas de planícies úmidas. Observa-se a descarga de água subterrânea nos corpos de água superficiais nos períodos mais úmidos [a e b] e a recarga do aquífero no período seco [c]. Fonte: Woessner, 2020.

Uma situação específica ocorre (condições de fluxo contínuo ou “Flow-through Conditions”) quando o lençol freático é mais alto do que o nível de água do reservatório, de um lado, e menor do que do que o nível de água do reservatório, de outro lado (Woessner, 2020). Neste cenário, as águas subterrâneas são descarregadas nas águas superficiais, a montante, e as águas superficiais se infiltram no aquífero, a jusante (Figura 5.2).

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

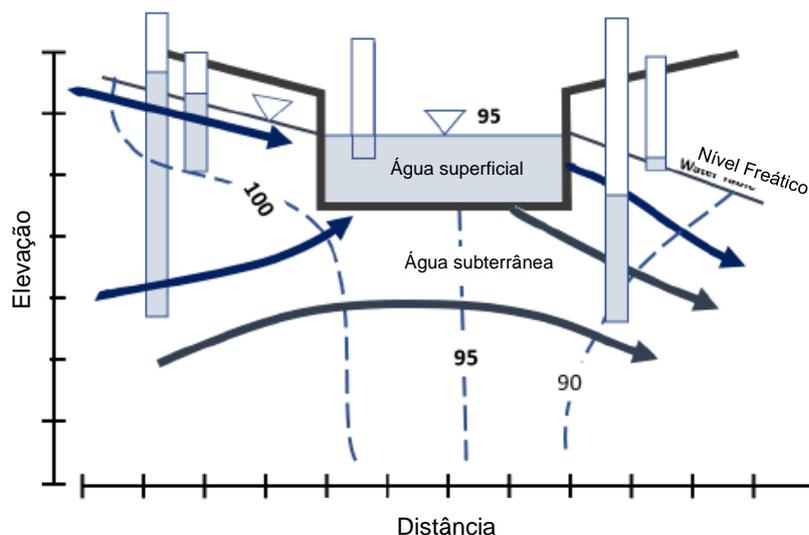


Figura 5.2 - Modelo conceitual de condições de fluxo contínuo ou “*flow-through conditions*” sob regime permanente e condições isotrópicas e homogêneas (Woessner, 2020).

A maioria dos reservatórios localizados na área do SAPP são formados por meio de barramento dos cursos de água superficiais, ou seja, estão em áreas de descarga dos aquíferos livres. Nesse sentido, os reservatórios tem comportamento efluente, ou seja, recebem contribuição de água subterrânea, como mostrado na Figura 5.4.

Outra questão importante se refere à eventual perda de água dos reservatórios por infiltração no aquífero. Os reservatórios superficiais, lagos e açudes têm a tendência de reter, no fundo, sedimentos finos, argilosos e frequentemente ricos em materiais orgânicos, que apresentam menor condutividade hidráulica em comparação com os materiais nos quais o lago se formou (Woessner, 2020). A presença de sedimentos com baixa condutividade hidráulica no fundo reduz as taxas de infiltração e garante uma eficiência maior no armazenamento hídrico.

O fluxo bidirecional contínuo e constante entre os recursos hídricos subterrâneos e superficiais atesta a estreita interconexão entre as águas subterrâneas e as águas dos rios, partes integrantes do mesmo ciclo hidrológico e, por isso mesmo, indissociáveis.

De modo geral, as zonas deprimidas dos talwegues funcionam primordialmente como áreas de recarga e as zonas circunvizinhas relativamente mais elevadas constituem as áreas de recarga. Nesse sentido, os critérios utilizados para delimitação das áreas de recarga e descarga do SAPP foram a declividade do terreno e a rede hidrográfica. De acordo com EMBRAPA (1979), terrenos com declividades de até 2% foram distinguidos como áreas de recarga.

Áreas de descarga foram distinguidas pelas declividades do terreno maiores do que 2% e também quando associadas a cursos de água superficiais e planícies aluvionares. A Figura 5.3 apresenta um exemplo com um padrão de drenagem que demonstra a característica da área como sendo de descarga. A mesma figura mostra que a carga hidráulica na vizinhança dessa área plana é maior do que a carga hidráulica dos rios. Logo, o movimento a água subterrânea é no sentido da maior carga para a menor. Ou seja, o aquífero descarrega para essa área plana.

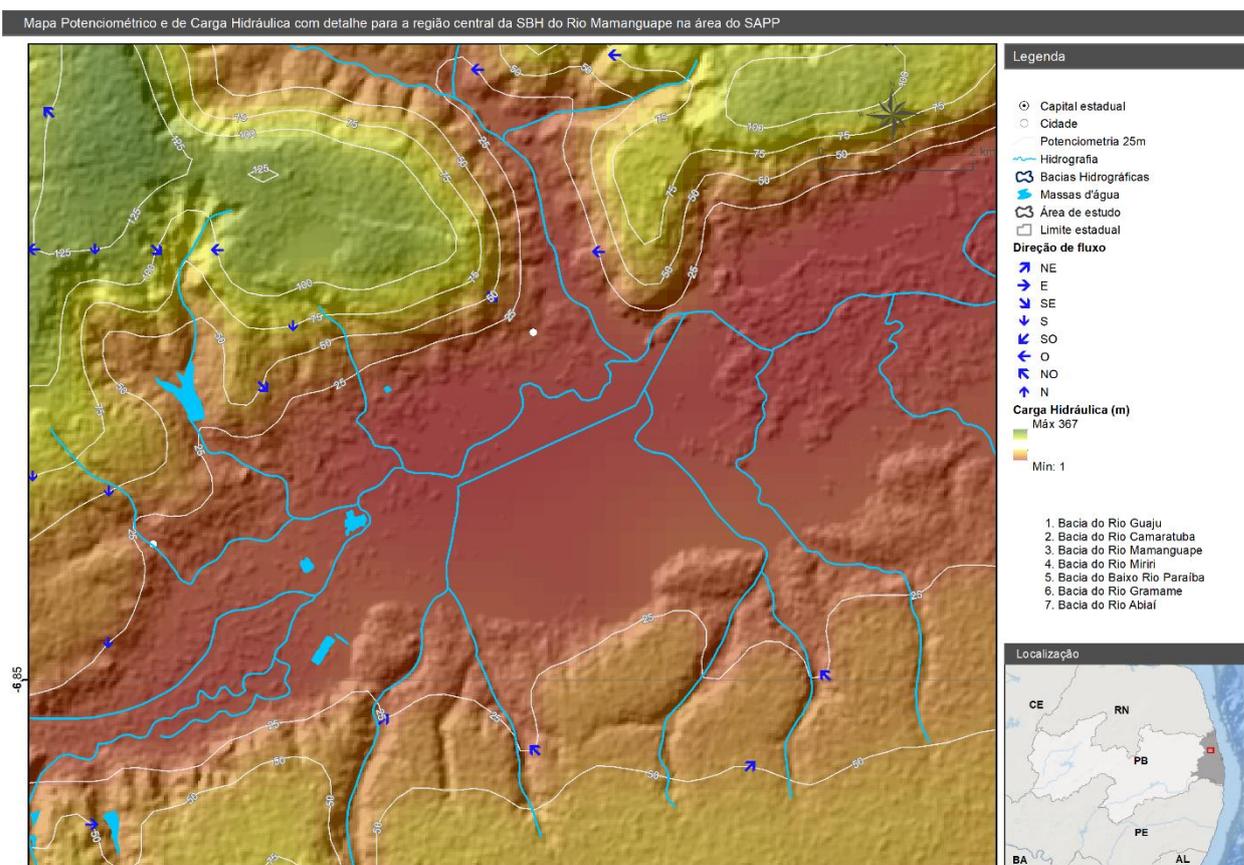


Figura 5.3 – Exemplo de região classificada como área de descarga e uma ilustração do porquê na região central da bacia hidrográfica do rio Mamanguape

As áreas potenciais de recarga e as áreas de descarga do SAPP são mostradas na Figura 5.4.

É importante destacar que uma das características das áreas de descarga é uma componente de fluxo subterrâneo ascendente, em direção à superfície do terreno. Esse fluxo ascendente pode não aflorar permanentemente por conta das condições climáticas, como pode ser observado nas grandes planícies de inundação. A proximidade dos níveis de água da superfície do terreno causa evaporação.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

O SAPP recebe em toda sua extensão águas provenientes de precipitações pluviométricas. Conforme identificado no relatório de diagnóstico, o período chuvoso ocorre entre os meses de março a agosto e o período seco entre os meses de setembro a fevereiro. Durante os meses de março a agosto, as precipitações são mais frequentes e intensas, sendo junho o mês em que ocorrem os maiores índices pluviométricos.

A precipitação, principalmente na estação chuvosa, aumenta de oeste para leste, sendo maior no litoral do que no interior da bacia. Na estação seca essa diferença diminui, apesar de ainda ser maior no litoral do que no interior. As precipitações médias anuais do período de 1994 a 2022 variaram entre a mínima de 674 mm até a máxima de 1.892 mm.

Uma parcela da precipitação pluviométrica infiltra-se pelas camadas sedimentares do SAPP e dá origem à recarga direta dos reservatórios subterrâneos por meio da percolação vertical na zona não saturada. Essa parcela representa a recarga total do sistema aquífero e corresponde a 13% da precipitação média anual na Bacia Paraíba – estimada em 1.372 mm, equivalente a 0,78 km³/ano (Figura 5.5), conforme estimativa preliminar apresentada no Relatório de Diagnóstico.

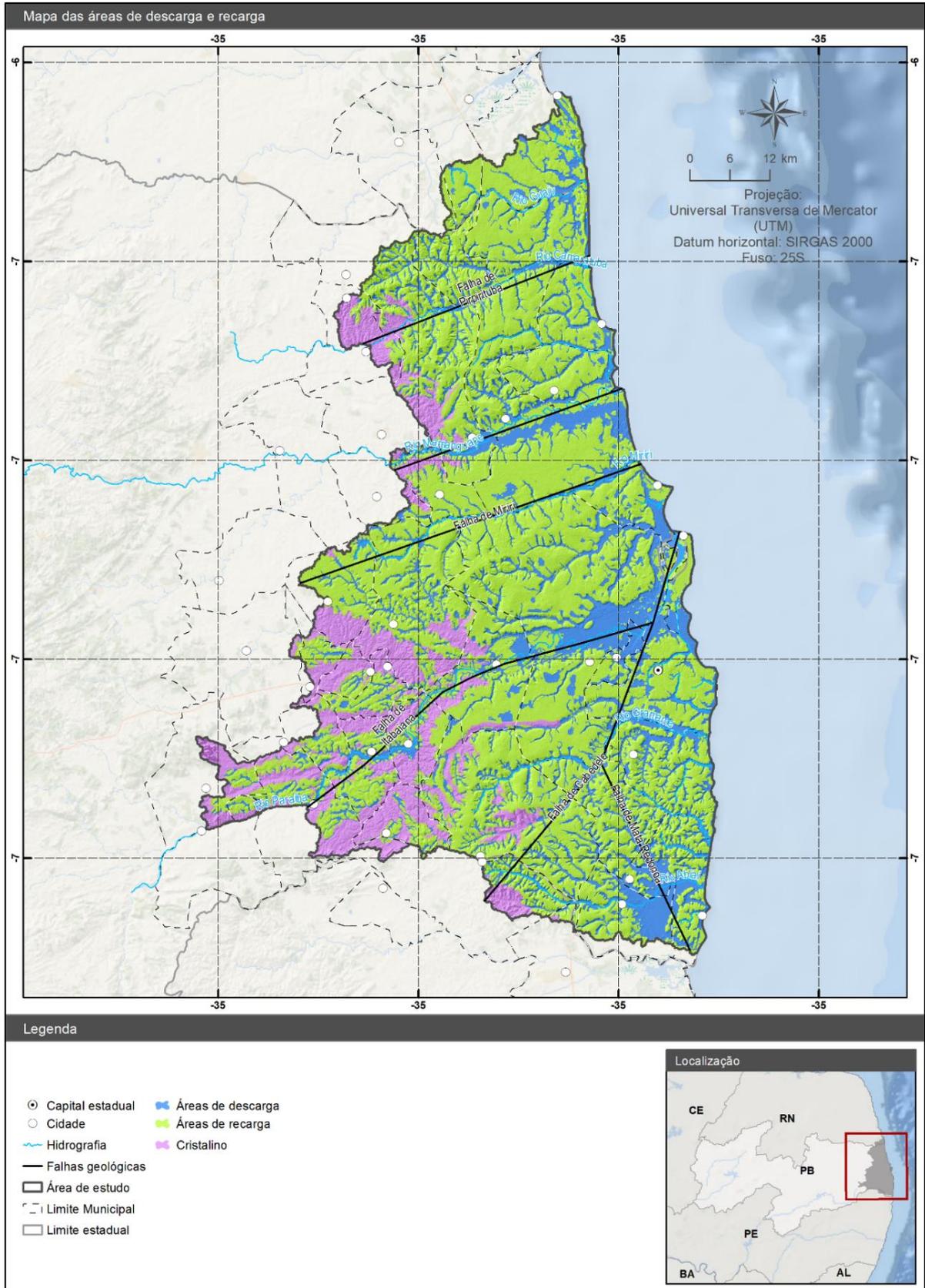


Figura 5.4 – Áreas potenciais de recarga e áreas de descarga do SAPP.

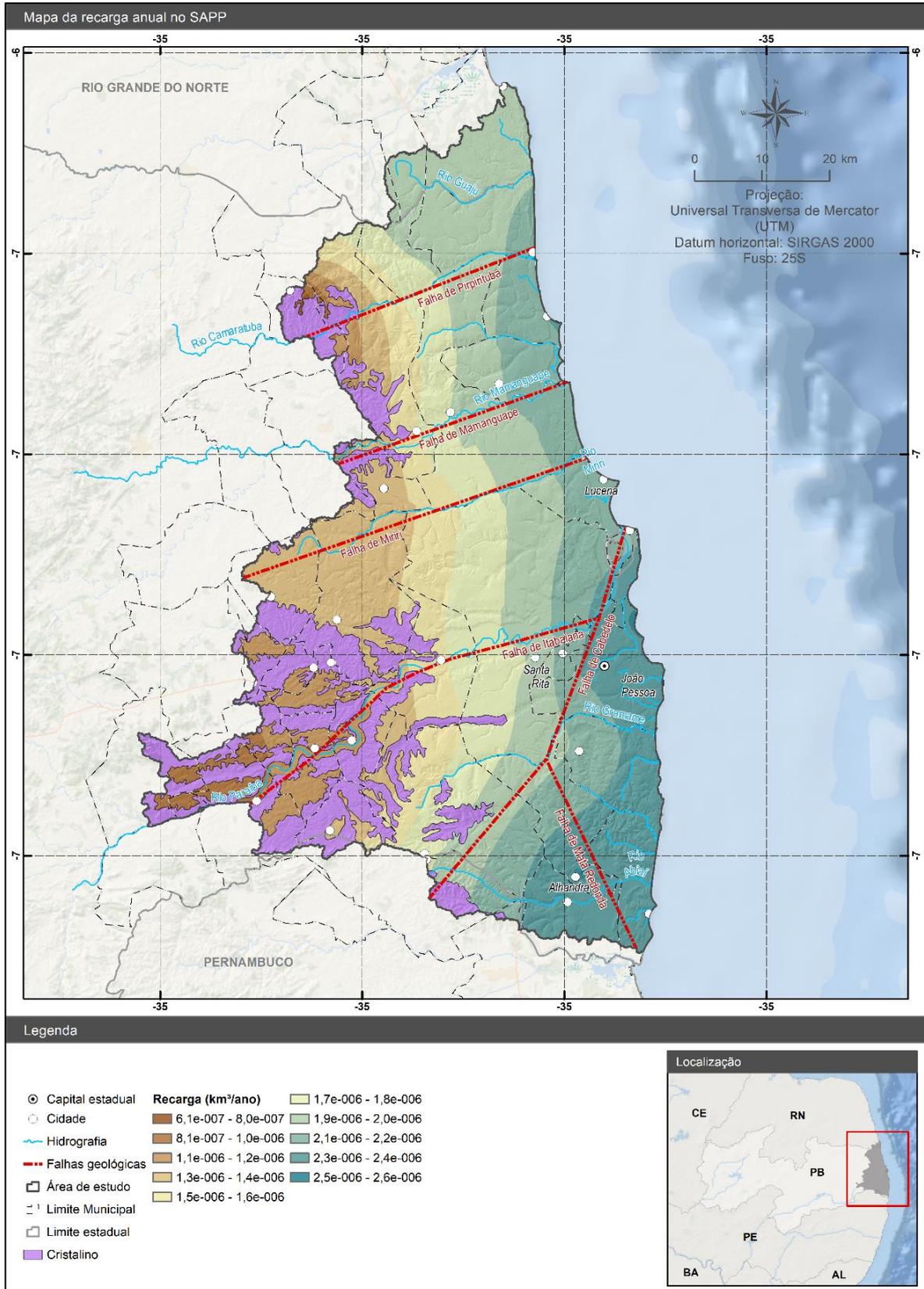


Figura 5.5 – Distribuição da recarga total do SAPP na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba.

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

A maior parte dessa vazão é descarregada para a rede de drenagem das bacias hidrográficas na forma de escoamento de base dos cursos de água superficiais, sejam perenes ou intermitentes e equivale à reserva renovável dos aquíferos. As chuvas do período de estiagem também produzem recarga, todavia, nem toda a água infiltrada é descarregada pelos rios, podendo permanecer em profundidade. Essa recarga varia anual e espacialmente em função da quantidade de chuva precipitada.

Um percentual menor da recarga total, definido como recarga profunda, abastece os sistemas mais profundos e contribui com o fluxo subterrâneo regional, conforme comentado anteriormente.

Em condições de semiconfinamento, a recarga direta por precipitação atmosférica por meio das camadas confinantes semipermeáveis é muito lenta, de modo que o reabastecimento do aquífero é vagaroso. Essa recarga é proporcional à condutância hidráulica (k'/b') da camada semiconfinante e à diferença carga hidráulica entre os aquíferos acima e abaixo dessa camada.

A recarga profunda não foi estimada nos estudos anteriores realizados no SAPP, na Bacia Paraíba, todavia, é de conhecimento geral que esses valores são bem pequenos. Segundo ANA (2013), a recarga profunda comumente situa-se entre 1% e 10% da recarga total ou efetiva. Gomes (2008) aponta valores de recarga profunda variando de 0,4 % a 2,4% da precipitação. Para Ponce (2007), as quantidades de percolação profunda correspondem a frações pequenas da precipitação, cuja média global é 2%.

Para um modelo com camadas perfeitamente confinantes, isolando totalmente o aquífero, a recarga direta (por precipitação pluviométrica) reduz-se a zero e a recarga indireta é promovida somente pela circulação lateral entre os reservatórios do sistema. O projeto BRAMAR (2018) considerou que a recarga do subsistema confinado ocorre através do subsistema livre, quando a carga hidráulica deste último é maior.

Neste modelo conceitual, admite-se a recarga profunda do SAPP em 5% da recarga total, com o fluxo subterrâneo profundo deslocando-se da zona livre para a zona confinada do sistema, esses dados foram estimados de forma preliminar o Relatório de Diagnóstico e serão retomados no Produto 4.

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

5.2 Favorabilidade dos terrenos à recarga

Para subsidiar o entendimento das áreas com maiores potenciais à recarga subterrânea no SAPP, foi aplicada uma metodologia de identificação de áreas mais favoráveis à recarga. Quatro fatores foram considerados nesse processo: litologia, uso do solo, densidade de drenagem e declividade da região. A metodologia foi implementada por meio de ferramentas em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), integrando todos os fatores espacialmente e apresentando os resultados por meio de mapas, conforme será explicado a seguir.

O método de mapeamento das áreas favoráveis à ocorrência de recarga subterrânea apresentado a seguir está baseado nas publicações de Yeh et al. (2016), Shaban et al. (2006) e Yeh et al. (2009). Esses autores empregaram o sensoriamento remoto como uma ferramenta para avaliar a área de recarga, uma metodologia que tem ganhado destaque e substituído as análises locais tradicionais devido à sua representatividade espacial.

É relevante destacar que o método empregado possui algumas limitações. No que diz respeito à escala espacial, a identificação de áreas com maior propensão à infiltração de água tem uma abrangência regional; quanto à escala temporal, o método não possibilita a representação de condições temporárias no terreno.

Neste trabalho, os quatro fatores usados na análise de favorabilidade foram representados em mapas temáticos (Figura 5.7), onde cada um deles foi examinado levando em consideração a sua influência sobre o processo de recarga subterrânea, usando uma atribuição de pesos com base no referencial teórico apresentado previamente. A seguir são detalhados os produtos referentes aos quatro fatores utilizados:

- Litologia: a litologia é fundamental para o entendimento da ocorrência de recarga subterrânea, já que ela afeta a forma como a recarga percola e se armazena no aquífero. A litologia utilizada no estudo teve como o base o mapa de Geodiversidades do estado da Paraíba (Torres & Silva, 2017). A classe de formações superficiais engloba os depósitos colúvio-eluviais, flúvio-marinhos e depósitos litorâneos. A classe de rochas sedimentares reúne as demais formações aflorantes.
- Uso e ocupação do solo: O shapefile de uso e cobertura do solo utilizado é o mesmo elaborado no relatório de diagnóstico. Os diferentes usos e ocupações do solo interferem diretamente no balanço hídrico, já que afetam os processos de

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

evapotranspiração, escoamento superficial direto e infiltração, afetando assim, a entrada de água no sistema subterrâneo;

- Densidade de drenagem: a densidade de drenagem é o somatório do comprimento dos trechos de rio dividido pela área total de drenagem da bacia hidrográfica de estudo, fornecendo informações sobre a taxa de percolação e auxiliando na identificação das zonas de recarga. O shape de drenagem utilizado nesta análise é parte da Base Hidrográfica Ottocodificada Multiescalas da ANA (BHO 2017). O fator parte do pressuposto, que em duas áreas similares, locais com maior densidade de drenagem apresentam maior descarga aquífera, que conseqüentemente indica maior entrada de água no sistema oriunda da recarga.
- Declividade: As declividades de uma região influenciam diretamente na infiltração de água da chuva que irá se tornar recarga. Assim, relevos mais dissecados produzem menos recarga em função do escoamento superficial direto predominante, que reduz a taxa de infiltração de água no solo. A declividade utilizada no estudo foi produzida com ferramentas SIG a partir do Modelo Digital de Superfície “SRTM - Shuttle Radar Topography Mission”, com 30 metros de resolução espacial.

Durante a ocorrência da recarga subterrânea, os fatores apresentados acima não possuem a mesma influência de atuação sobre o processo. Para aplicar o método de identificação das áreas favoráveis à ocorrência de recarga, foram utilizados valores de influência e peso do fator a partir do referencial bibliográfico citado anteriormente.

O peso de cada fator representa a proporção dele no valor da escala de recarga potencial. Como em um estudo de larga escala os fatores não podem ser testados, os valores são subjetivamente atribuídos de acordo com a importância de cada fator no processo, quanto maior o valor, maior a influência. A cada um dos fatores ainda foi atribuído uma variação entre baixa e alta influência no processo, variando de 1 a 10. O efeito do fator foi determinado a partir da classificação entre os valores máximos e mínimos obtidos no geoprocessamento. O Quadro 5.1 apresenta os valores adotados para a análise, maiores detalhes dos pesos e como eles são obtidos podem ser encontradas no referencial citado anteriormente.

Quadro 5.1 - Caracterização dos fatores influenciando a ocorrência da recarga subterrânea e pesos atribuídos aos fatores.

Fator	Influência do fator	Peso do fator	Classificação	Peso Final atribuído
Densidade de Drenagem (Adimensional)	6,5	1,5	5 - 13	9,75
	5		3 - 5	7,5
	3,5		2 - 3	5,25
	2		1 - 2	3
	0		0 - 1	0
Litologia	10	3	Materiais Superficiais	30
	8		Rocha Sedimentar	24
	5		Calcário	6
Declividade (%)	10	1,5	0 - 2%	15
	8		2 - 4%	12
	6,5		4 - 7%	9,75
	5		7 - 11%	7,5
	2		> 11%	3
Uso e Ocupação do Solo	5	2,5	Agricultura	12,5
	3,5		Campos e Pastagens	8,75
	2		Florestas	5
	1		Prédios	2,5
	0		Área de descarga	0

Fonte: Profill Engenharia e Ambiente com base em Shaban et al., 2006; Yeh et al., 2016.

Com base nos pesos finais atribuídos a cada um dos fatores, a delimitação das zonas de recarga subterrânea foi obtida pela soma das camadas correspondentes aos quatro fatores. A soma foi realizada no software de geoprocessamento QGIS, com a ferramenta “calculadora raster”, como mostra a Figura 5.6.

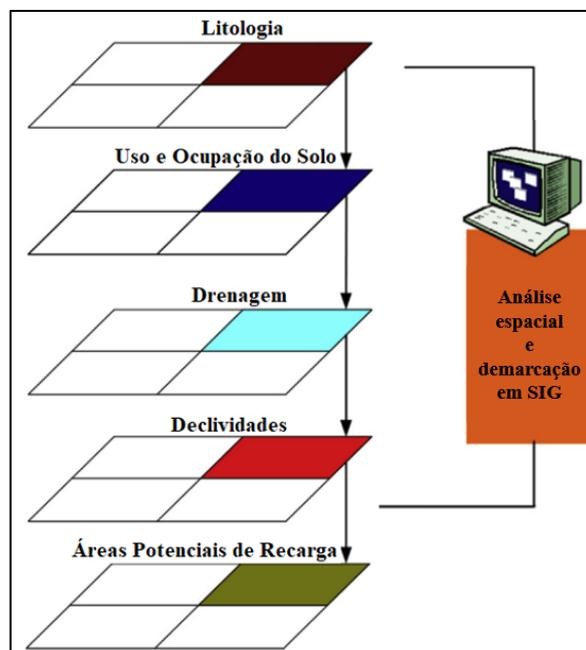


Figura 5.6 – Análise em SIG realizada com os quatro fatores. Fonte: Adaptado de Yeh et al. (2016).

Além disso, as áreas de descarga dos aquíferos, identificadas no tópico anterior (5.1 Áreas potenciais de recarga e descarga) foram contempladas junto aos resultados.

A representação espacial dos fatores considerados na análise de favorabilidade é mostrada na Figura 5.7. O produto com a espacialização das áreas favoráveis para a recarga subterrânea tem resolução espacial de 30 m e é mostrado na Figura 5.8. Os valores calculados por geoprocessamento foram classificados em cinco categorias de favorabilidade de recarga subterrânea: Ruim (20-40), Baixa (41-50), Moderada (51-60), Boa (61-70) e Excelente (71-81).

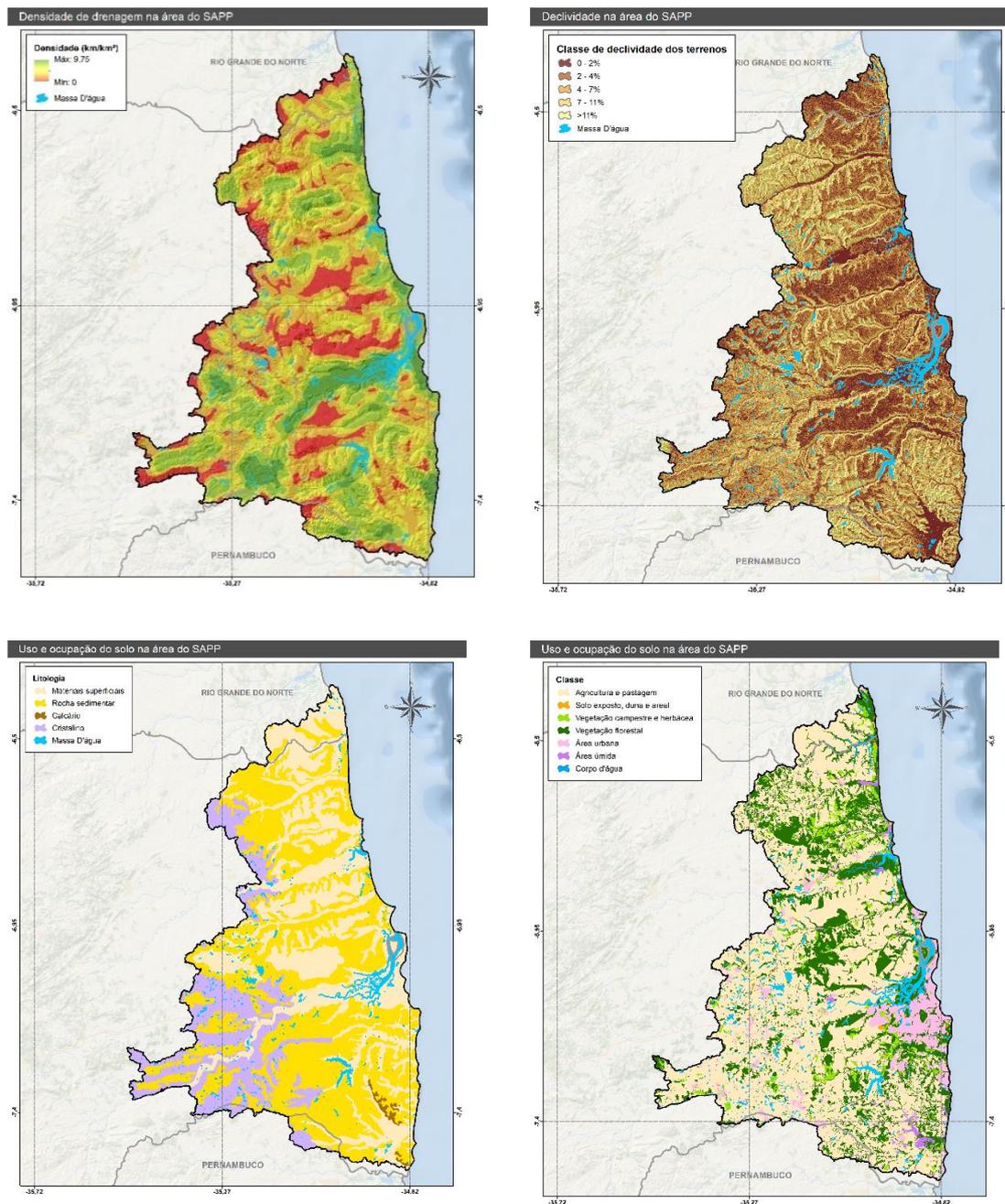


Figura 5.7 – Representação dos fatores considerados para a análise de favorabilidade de recarga subterrânea.

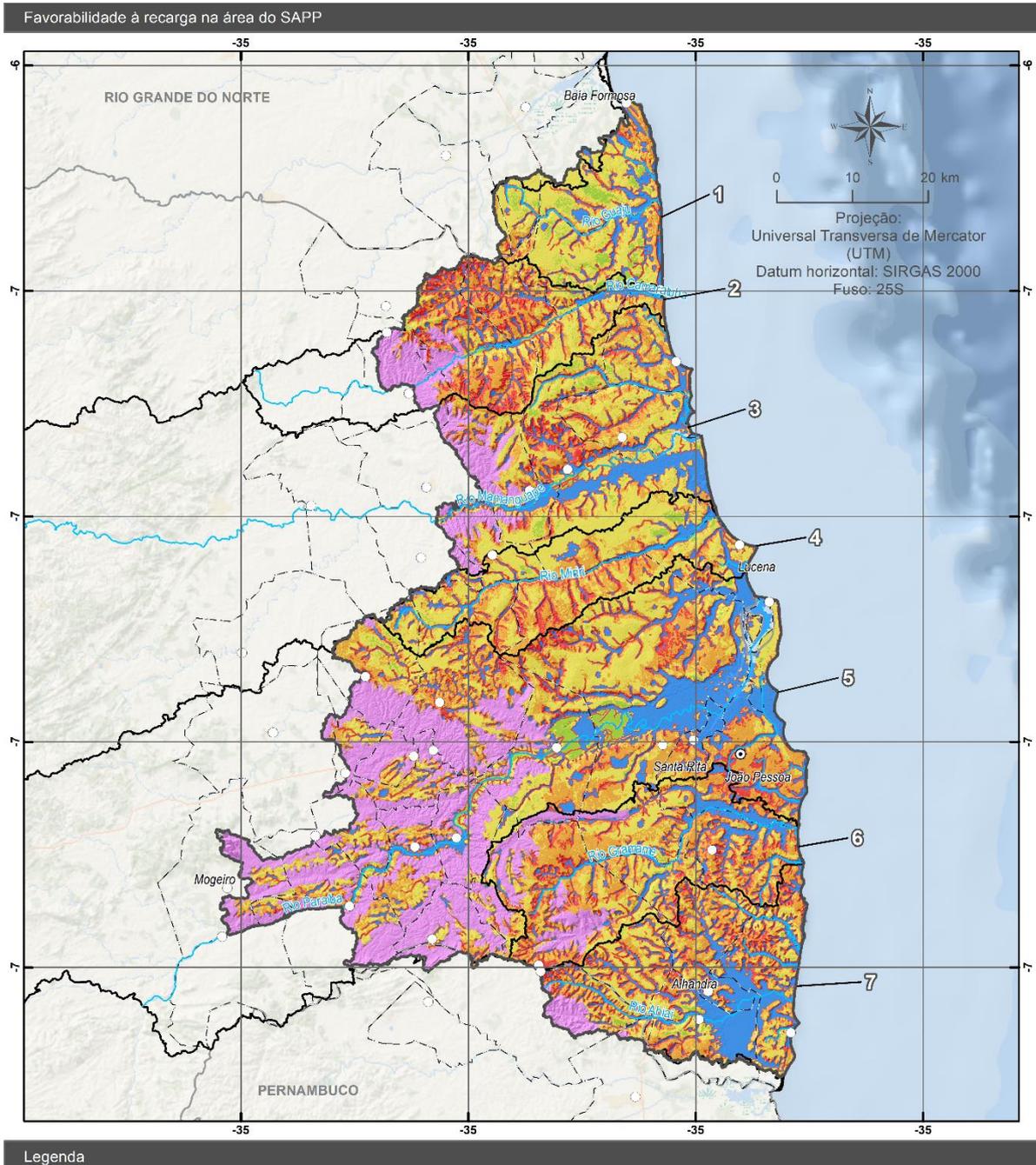


Figura 5.8 – Mapa de áreas favoráveis para a ocorrência de recarga subterrânea.

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

Os resultados obtidos indicam que as regiões de formações superficiais apresentam moderada favorabilidade de recarga subterrânea. As áreas compostas por rochas sedimentares apresentam regiões com favorabilidade variando de ruim a baixa. Observam-se algumas regiões com áreas de boa a excelente favorabilidade de recarga, especialmente para a região com uso do solo de agricultura e litologia de materiais superficiais localizada a oeste da cidade de João Pessoa. Na capital do estado da Paraíba existem grandes regiões de favorabilidade baixa a ruim de recarga de água subterrânea.

Observa-se a relação entre as áreas favoráveis a ocorrência de recarga subterrânea e os diferentes usos do solo da área de estudo. As regiões mais urbanizadas, como a cidade de João Pessoa apresentam potenciais que variam de ruim a moderado em grande parte das áreas. As regiões ocupadas por agricultura e pastagem mostraram-se mais favoráveis as recargas subterrâneas, variando de moderada a boa favorabilidade.

O Quadro 5.2 mostra o detalhamento das áreas favoráveis de recarga para cada uma das bacias hidrográficas da área de estudo, apresentando as porcentagens de área ocupadas por cada grau de favorabilidade. Foram incluídos os percentuais de área do aquífero fraturado (que não é alvo de estudo nesse trabalho), com o objetivo de representar percentuais reais da área de estudo ocupadas por cada uma das favorabilidades.

Quadro 5.2 - Áreas favoráveis a ocorrência da recarga subterrânea para cada bacia hidrográfica.

Bacia Hidrográfica	Embasamento Cristalino	Áreas de descarga	Favorabilidade				
			Ruim	Baixa	Moderada	Boa	Excelente
Bacia do Rio Abiaí	4,4%	36,9%	6,6%	26,2%	24,2%	1,6%	0,01%
Bacia do Rio Camaratuba	15,1%	19,3%	13,0%	29,7%	21,0%	1,8%	0,00%
Bacia do Rio Gramame	11,2%	23,7%	8,1%	31,3%	24,8%	0,9%	0,00%
Bacia do Rio Guaju	0,0%	23,7%	1,5%	14,8%	49,8%	10,2%	0,01%
Bacia do Rio Mamanguape	12,1%	25,1%	5,4%	20,9%	33,3%	3,2%	0,04%
Bacia do Rio Miriri	0,6%	18,7%	5,7%	27,8%	45,1%	2,0%	0,00%
Bacia do Rio Paraíba	27,1%	23,0%	3,5%	19,7%	23,9%	2,8%	0,02%

Fonte: Profill Engenharia e Ambiente, 2023.

Entre a Figura 5.9 e a Figura 5.15 são apresentados os resultados com detalhamento para cada uma das 7 bacias hidrográficas que compõem a área de estudo e são seguidas de um descritivo a respeito da favorabilidade para recarga em cada uma delas.

5.2.1 Rio Guaju

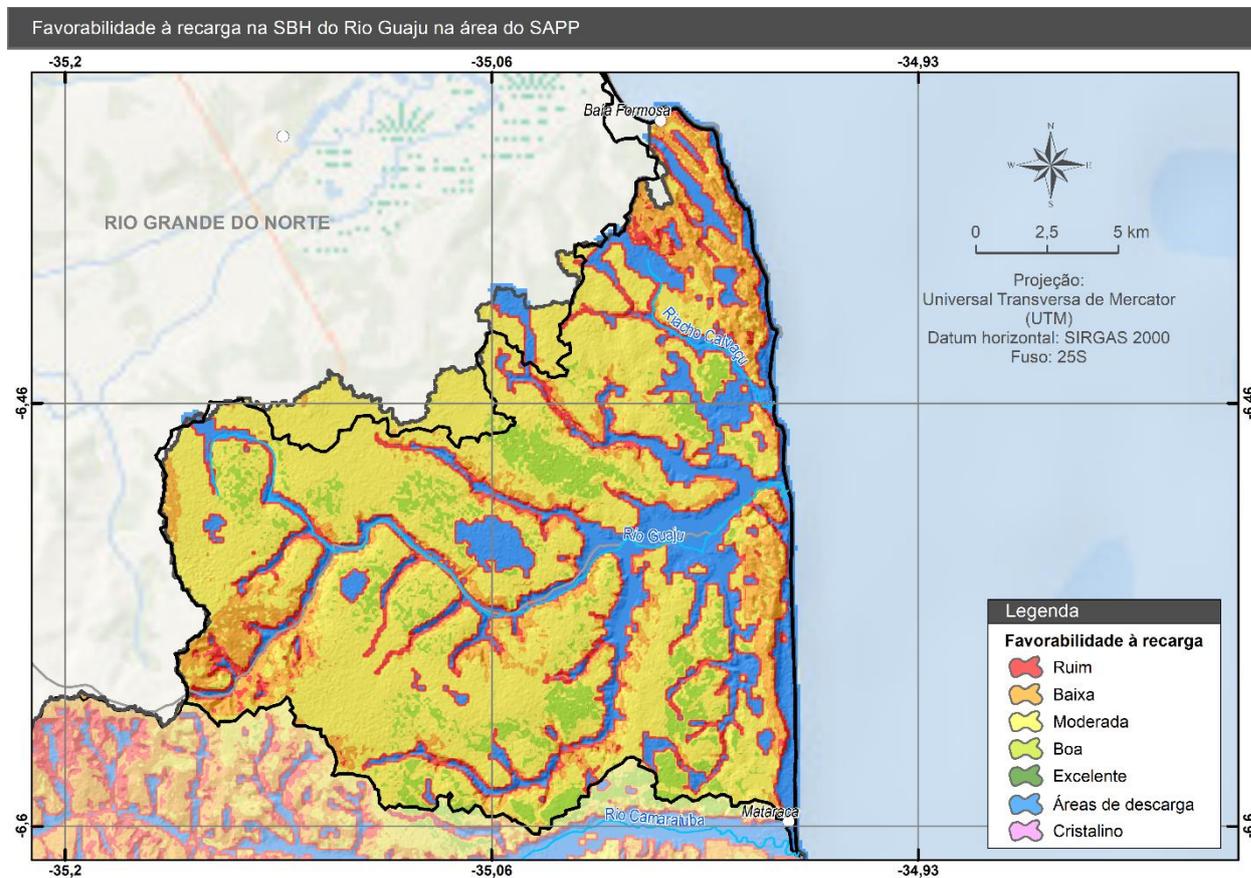


Figura 5.9 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Guaju.

A bacia hidrográfica do Rio Guaju apresenta grande parte da sua extensão classificada como agricultura quanto ao uso e ocupação do solo e litologia predominante de materiais superficiais, declividades planas e densidade de drenagem com valores altos nos limites de sua fronteira com a bacia Camaratuba. Essa combinação resulta que, praticamente 50% da área seja ocupada por média favorabilidade à recarga. As áreas classificadas como boas para recarga estão dispersas e representam 10% da área da bacia e as áreas ruins ficam em torno de 15%. O restante se distribui entre as demais classes de forma menos expressiva (<10%) e nas áreas de descarga dos aquíferos (23,7%).

5.2.2 Rio Camaratuba

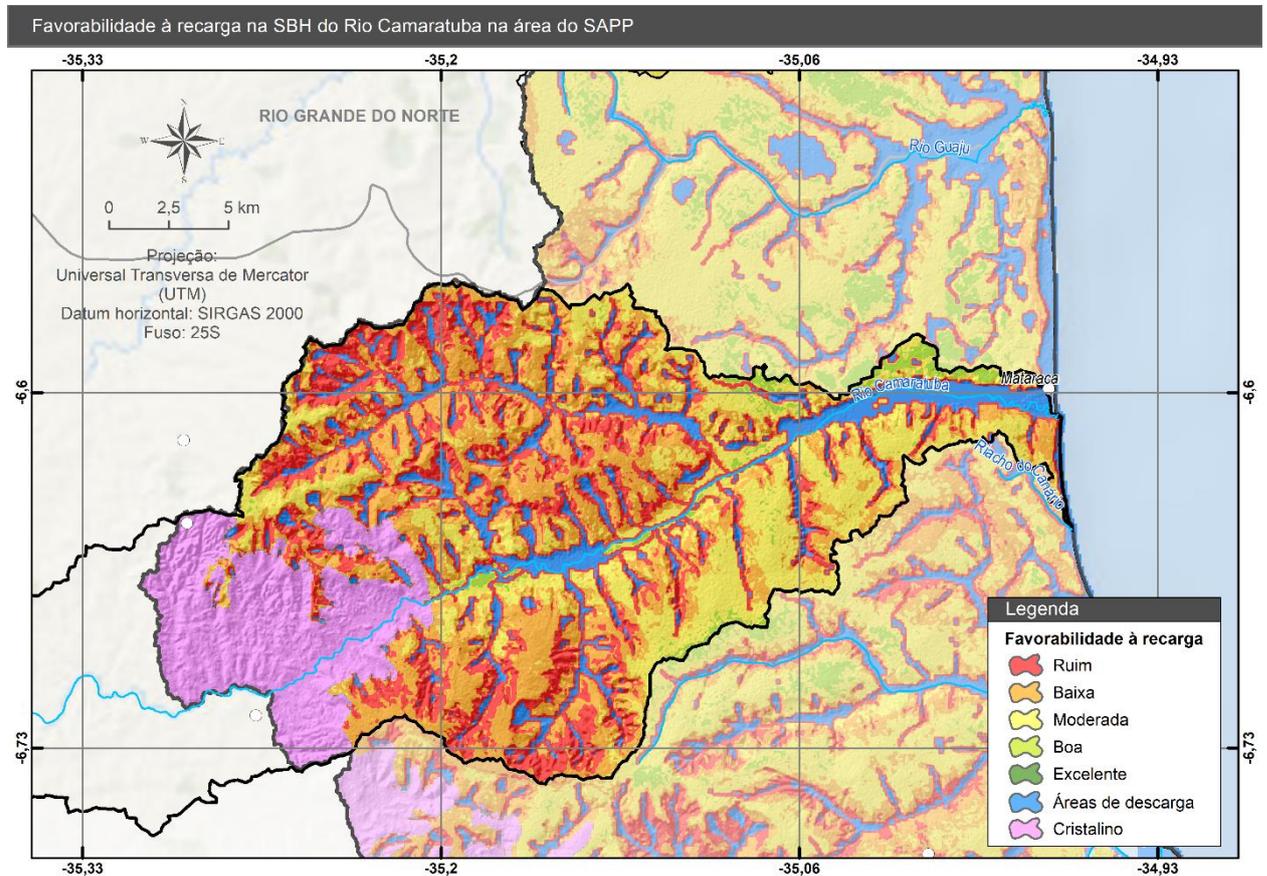


Figura 5.10 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Camaratuba.

Na bacia do rio Camaratuba ocorre baixa (29,7%) e moderada (21%) favorabilidade à recarga na maior parte da sua área. Uma parte significativa é abrangida por áreas de descarga (19,3%) e embasamento cristalino (15,1%). A região de maior ocorrência de boa favorabilidade está na região próxima ao litoral, na divisa com a bacia do rio Guaju, em que o solo é usado para agricultura e pastagem além de ocorrerem baixas declividades mas representa apenas 1,8% da área da bacia.

5.2.3 Rio Mamanguape

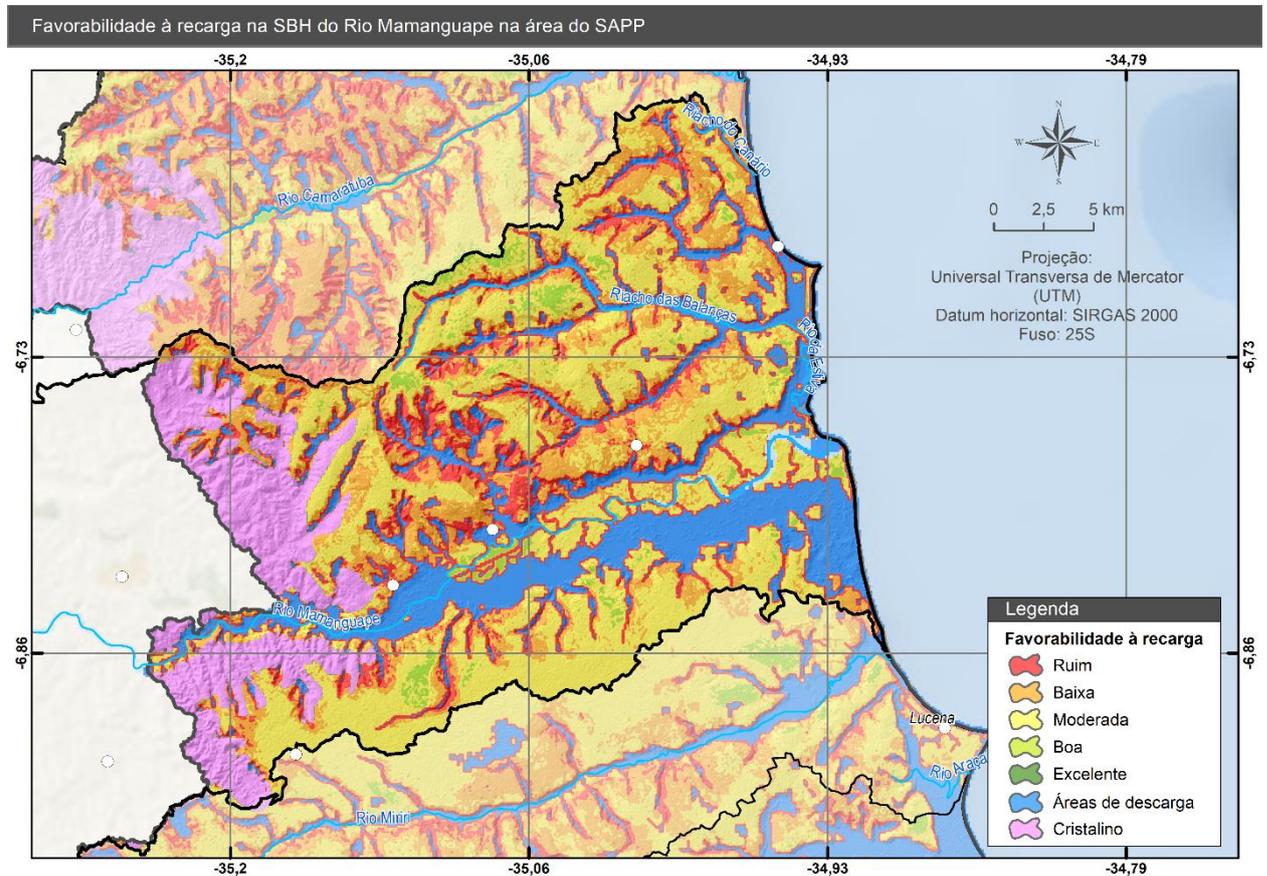


Figura 5.11 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Mamanguape.

Grande parte das áreas que compõem a bacia do Rio Mamanguape são classificadas como de baixa (20,9%) e moderada (33,3%) favorabilidade para a ocorrência de recarga subterrânea. Além disso, a região apresenta poucas regiões com boa favorabilidade (3,2%), em especial para uma região classificada pelo uso e ocupação do solo como agricultura e pastagem, abrangendo o município de Mamanguape e cidades vizinhas. Cerca de um quarto da área é considerado como área de descarga dos aquíferos (25,1%).

5.2.4 Rio Miriri

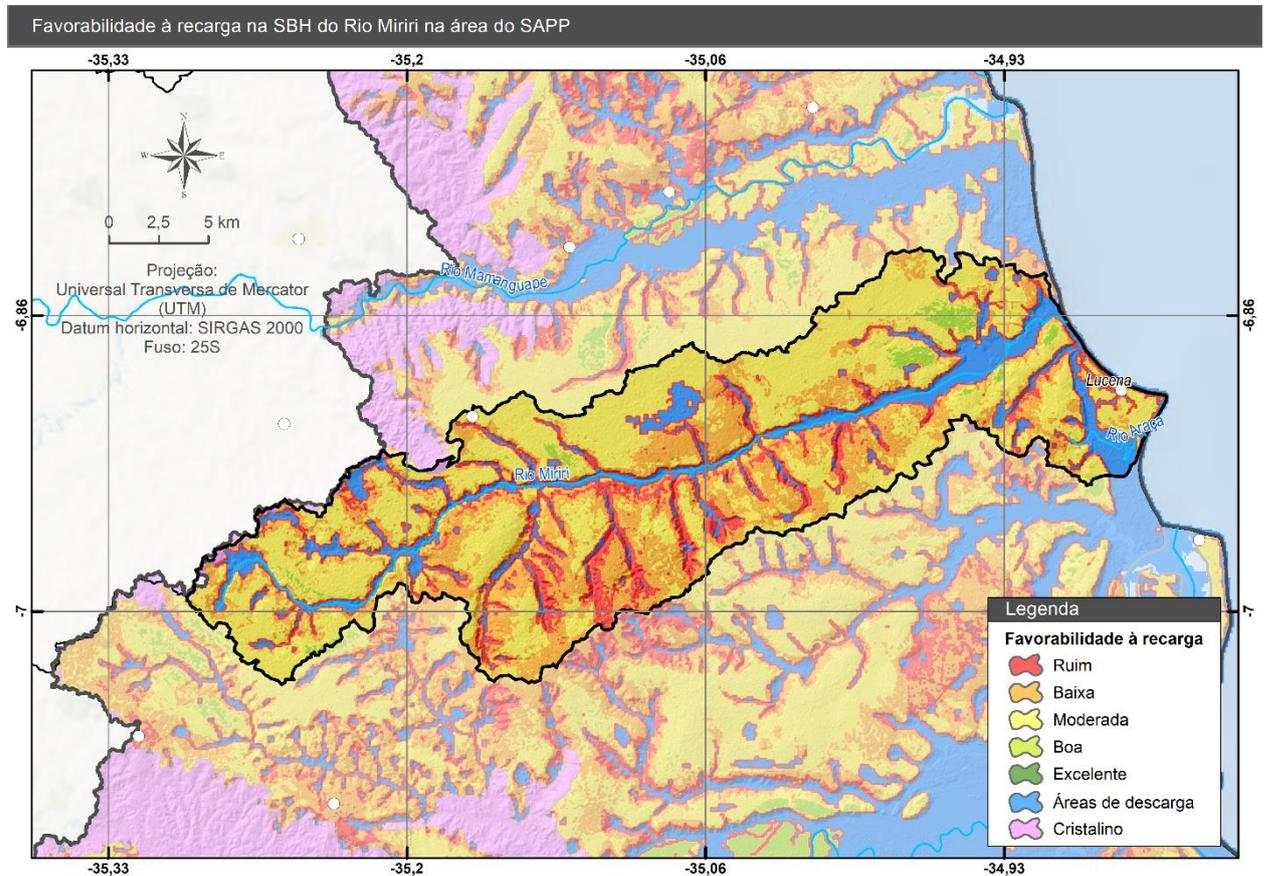


Figura 5.12 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Miriri.

A maior parte da área da bacia hidrográfica do rio Miriri foi classificada com moderada (45,1%) favorabilidade para ocorrência de recarga subterrânea, em função das extensas áreas de agricultura. Também são verificadas grandes porções da bacia com baixa favorabilidade (27,8%). As outras classes são pouco expressivas (<10%). Além disso, as regiões de descarga representam 18,7% da área.

5.2.5 Baixo Rio Paraíba

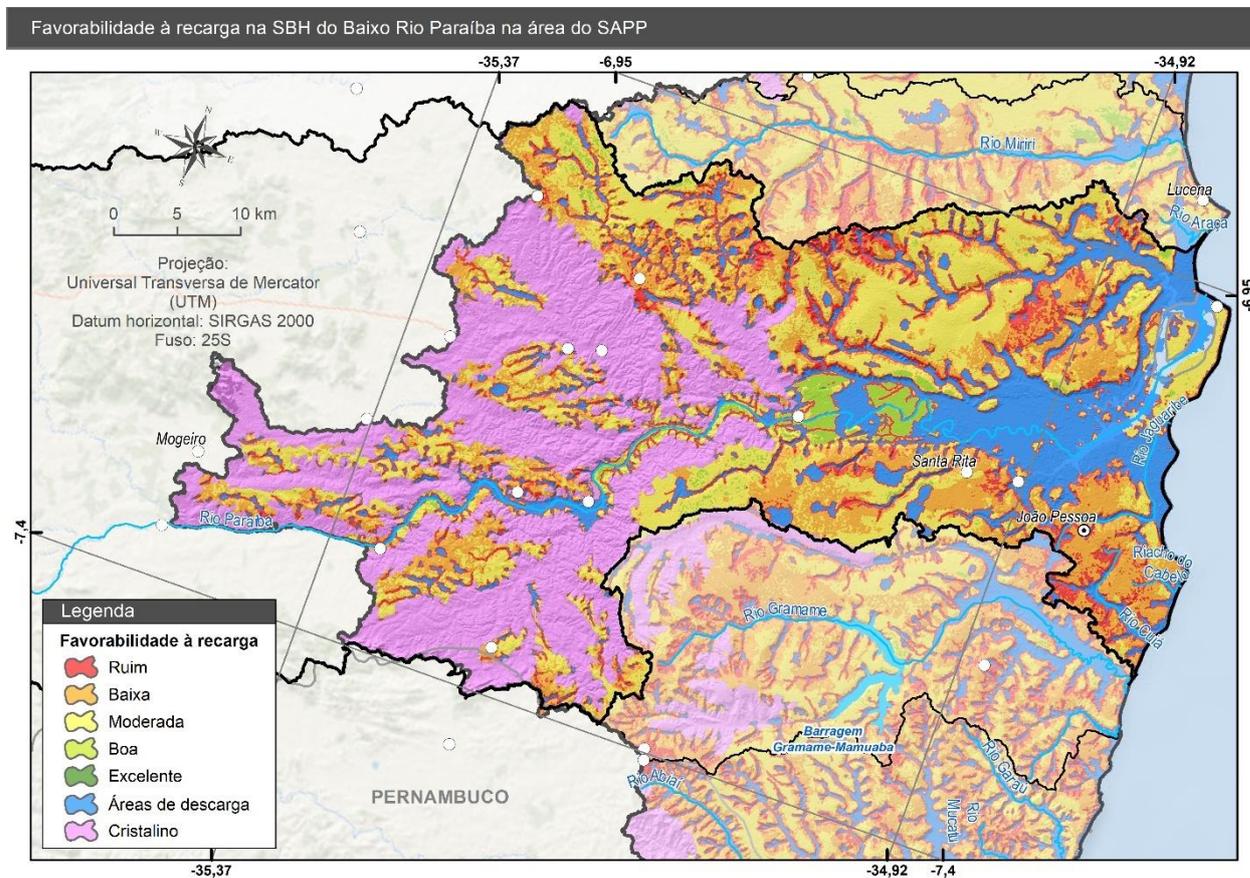


Figura 5.13 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do baixo Paraíba.

Embora a bacia hidrográfica do Baixo rio Paraíba seja a maior bacia presente na área de estudo, uma grande parte dela, quase um terço de sua área, é contemplada pelo embasamento cristalino (27,1%) que não é considerado na análise de favorabilidade e outros 23% são áreas de descarga.

Nesta bacia está a capital do estado da Paraíba, a cidade de João Pessoa, onde ocorre uma extensa área urbanizada, e conseqüentemente um solo mais impermeabilizado, resultando na classificação de favorabilidades variando entre moderada (23,9%) a baixa (19,7%), com alguns pontos de favorabilidade ruim (3,5%). Entretanto, quando avaliada somente a região urbanizada da bacia, a favorabilidade baixa aumenta para 47,7% e a ruim para 9,8%, conforme apresentado no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 - Áreas favoráveis a ocorrência da recarga subterrânea para a região urbana de João Pessoa.

Áreas de descarga	Favorabilidade				
	Ruim	Baixa	Moderada	Boa	Excelente
28,3%	9,8%	47,7%	14,1%	0,1%	0,0%

5.2.6 Rio Gramame

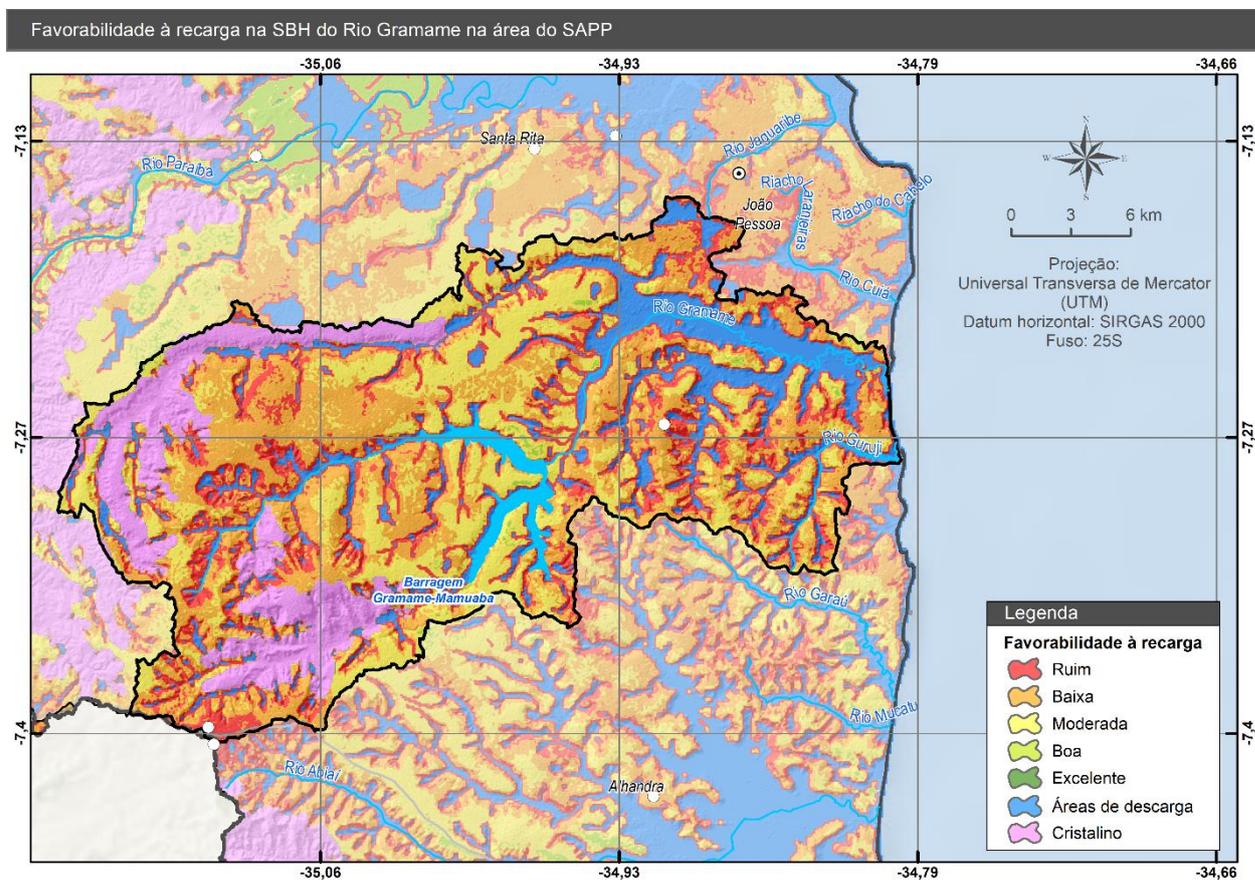


Figura 5.14 – Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Gramame.

O reservatório Mamuaba, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Gramame, constitui um extenso corpo hídrico com condições favoráveis à recarga subterrânea. Essa favorabilidade é influenciada pela interceptação da água da chuva pelo reservatório e pela presença de litologia predominantemente sedimentar. Além disso, a existência de áreas agrícolas nas proximidades contribui para esse cenário propício. Mesmo assim, é importante destacar que a dinâmica da influência que os reservatórios tem na recarga subterrânea depende de uma série de fatores conforme discutido no tópico anterior. No entanto, é importante destacar que aproximadamente 40% da extensão da bacia apresenta condições desfavoráveis à favorabilidade de recarga subterrânea sendo 31,3% classificada como baixa e 8,1% como ruim. Essa limitação é atribuída, em parte, à urbanização da bacia, que abrange uma pequena parcela das áreas urbanas de João Pessoa, o município de Conde e o distrito de Jacumã. Cerca dos 50% restantes estão distribuídos de forma similar entre áreas de descarga (23,7%) e áreas de moderada favorabilidade (24,8%).

5.2.7 Rio Abiaí

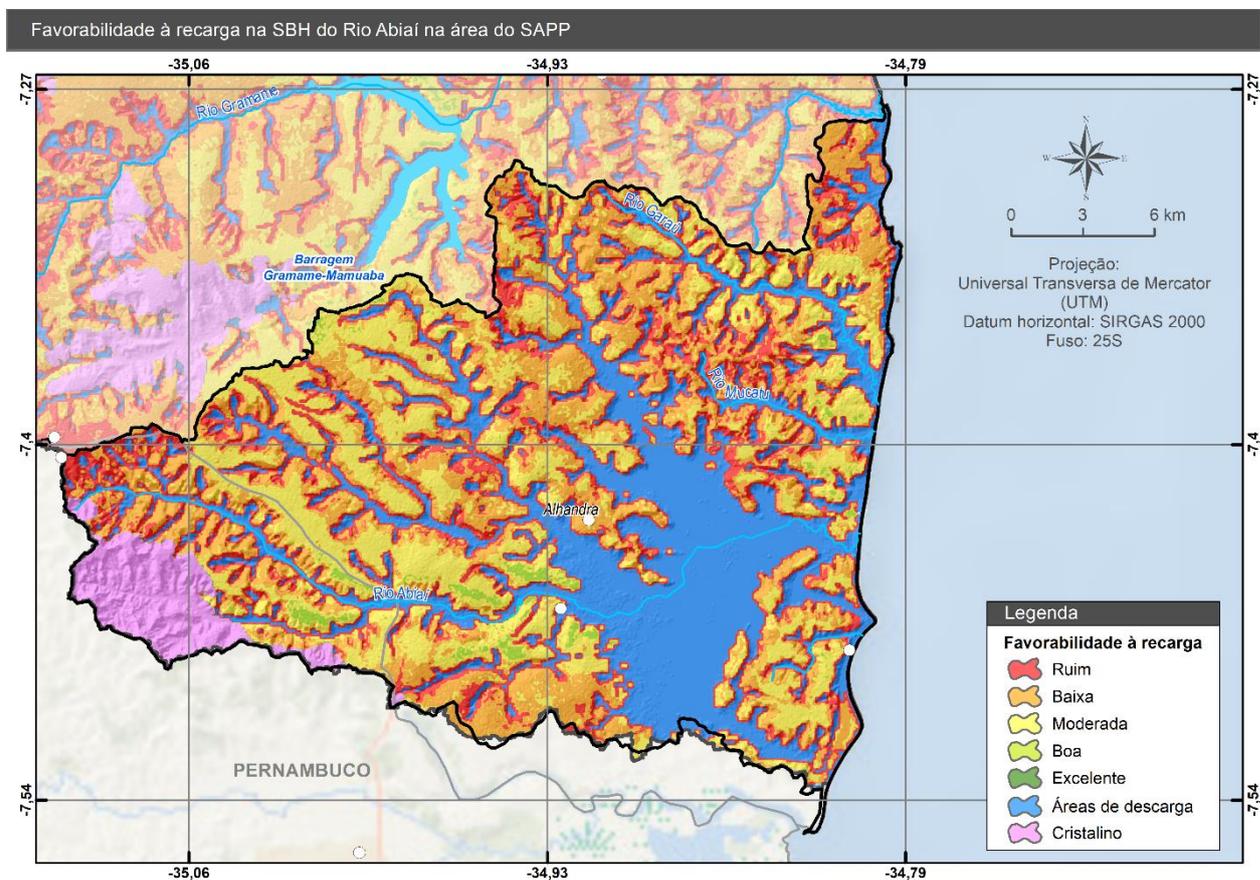


Figura 5.15 - Resultado das áreas de potencial recarga subterrânea para a bacia do Rio Abiaí.

Cerca de 50% da área é classificada como baixa (26,2%) e moderada (24,2%) favorabilidade. As demais classes são menos representativas (<10%). Além disso, 36,9% da área é classificada como área de descarga.

Em suma, constata-se que, de maneira abrangente, as bacias hidrográficas Guaju, Mamanguape, Miriri destacam-se pela maior proporção de território caracterizado por uma moderada favorabilidade à recarga subterrânea. Em contrapartida, as bacias Gramame e Camaratuba predominam em áreas com baixa favorabilidade. É relevante ressaltar os resultados de boa favorabilidade encontrados nas bacias Guaju e Mamanguape. A bacia do Abiaí é a que tem a maior área de descarga. Importante notar que todas as bacias apresentaram menos de 1% de sua área total ocupada por condições de excelente favorabilidade para a ocorrência de água subterrânea.

É importante destacar que a análise apresentada neste capítulo utilizou as condições físicas (fatores utilizados) para apontar os locais favoráveis à ocorrência da recarga subterrânea. Isso

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

não significa que essas áreas representam os maiores índices de recarga em termos quantitativos pois essa resposta depende de uma série de outras variáveis climáticas e temporais que não foram contempladas aqui, mas que serão detalhadas nos estudos de recarga no Produto 4.

6 POTENCIOMETRIA DO SAPP

6.1 Generalidades

A potenciometria do subsistema livre, incluindo a metodologia de elaboração, foi apresentada no Relatório de Diagnóstico e será aqui apresentada novamente, porém com um aprofundamento na discussão.

A potenciometria, conforme definida por Fetter (2001), é uma técnica de representação gráfica bidimensional que descreve a distribuição das cargas hidráulicas em aquíferos, abrangendo tanto os confinados quanto os não confinados. No contexto dos aquíferos não confinados, a potenciometria fornece uma representação da superfície freática, revelando as variações na altura da água em relação ao datum de referência, comumente associado ao nível do mar.

Essa abordagem gráfica permite uma compreensão visual das condições hidráulicas do terreno, destacando as variações altimétricas da água subterrânea em diferentes pontos. A carga hidráulica, expressa como a altura da água em relação ao datum, é fundamental para caracterizar o comportamento dos aquíferos e compreender as interações entre o sistema aquífero e o ambiente circundante.

Ao aplicar a potenciometria, é possível mapear e analisar as zonas de pressão e potencial hidráulico, o que é essencial para entender a dinâmica da água subterrânea. Além disso, essa representação gráfica contribui para a identificação de áreas críticas, onde a recarga ou a descarga de água pode ter implicações significativas para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

Os registros de nível de água em poços, essenciais para a análise potenciométrica, são influenciados por uma série de fatores complexos. Conforme destacado por Todd (1959), variações no armazenamento do aquífero são observadas em resposta à retirada de água, um fenômeno diretamente relacionado às demandas de bombeamento. Além disso, o efeito da interferência do bombeamento entre poços também desempenha um papel significativo na dinâmica dos níveis de água subterrânea.

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

A evapotranspiração em aquíferos rasos é outro fator importante, pois pode influenciar a elevação ou a diminuição dos níveis de água. A resposta do aquífero às variações na recarga está intrinsecamente ligada a fatores climáticos, como as precipitações pluviométricas, sazonalidade e até mesmo variações na pressão atmosférica.

Conforme destacado por Fetter (2001), é crucial considerar as variações de nível de água em diferentes escalas, incluindo as condições de fluxo local, intermediário e regional. Isso significa que a potenciometria não apenas proporciona uma visão estática das condições do aquífero, mas também permite compreender as complexas interações entre os diversos componentes do sistema hidrogeológico.

Os estudos de Carnier Neto (2006) proporcionam uma visão detalhada das dinâmicas do Aquífero Rio Claro, na Bacia do Paraná, revelando ciclos sazonais distintos de recarga e descarga. A Figura 3.144 A destaca a influência significativa das chuvas nesse sistema hidrogeológico, com ciclos de recarga claramente associados às precipitações sazonais. Esses eventos sazonais são cruciais para entender a resposta do aquífero às condições climáticas, evidenciando a importância das recargas provenientes das águas pluviais.

Além disso, a Figura 6.1 B destaca variações adicionais relacionadas ao efeito de maré terrestre, revelando dois ciclos diários distintos. Notavelmente, as variações apresentam amplitudes mais expressivas durante os períodos de lua cheia e lua nova, enquanto são menos pronunciadas nas fases lunares de crescente e minguante. Esse fenômeno sugere uma clara influência das fases lunares nas variações do nível de água do aquífero, indicando uma resposta sensível às forças de maré terrestre.

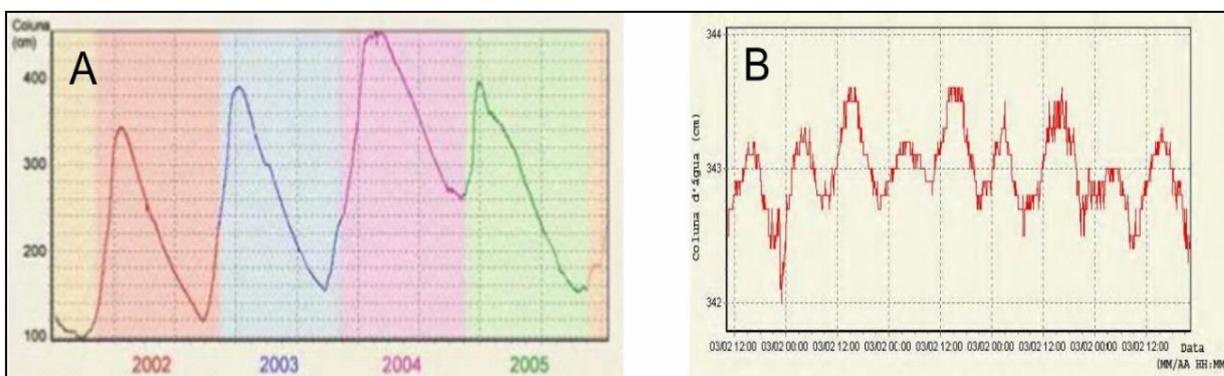


Figura 6.1- Monitoramento de níveis de água de um aquífero livre. (A) Ciclos sazonais de recarga por chuvas e descarga natural; (B) Variações por efeito de marés terrestres.

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

O monitoramento contínuo realizado por Carnier Neto revela não apenas a influência das variáveis climáticas, como as chuvas sazonais, mas também destaca a complexa interação entre o aquífero e as forças astronômicas. A observação de que a recarga aumentou no período de 2002 a 2004 e diminuiu em 2005 indica a variabilidade temporal do sistema, possivelmente relacionada a fatores climáticos e hidrodinâmicos específicos desses anos.

Os aquíferos livres desempenham um papel crucial, sustentando o fluxo subterrâneo que, por sua vez, mantém o escoamento dos cursos de água superficiais durante os períodos de estiagem, um fenômeno conhecido como fluxo de base. A configuração da superfície livre desses aquíferos, conforme observado por Fetter (2001), muitas vezes reflete a topografia da superfície terrestre, especialmente em regiões úmidas, como é o caso do SAPP.

Fetter (2001) destaca que áreas topográficas elevadas possuem maior potencial de energia, sugerindo que o fluxo subterrâneo superficial tende a seguir o sentido das drenagens, movendo-se das porções mais elevadas para as menos elevadas do terreno. Essa compreensão é essencial para a análise do comportamento hidrogeológico em ambientes diversos, onde as características topográficas desempenham um papel fundamental na dinâmica da água subterrânea.

Custodio e Llamas (1996) destacam a necessidade de levar em consideração as flutuações temporais nos níveis dos aquíferos ao definir a superfície potenciométrica. A representação da superfície potenciométrica deve ser limitada a um intervalo de tempo relativamente curto, a fim de evitar a inclusão de variações significativas que possam distorcer as interpretações. Portanto, é crucial ter cautela para prevenir imprecisões na delimitação da superfície potenciométrica, especialmente ao empregar dados de diferentes períodos.

No contexto específico da área de estudo, a determinação da potencimetria do SAPP contou com a utilização de 80 registros de nível estático de poços, conforme apresentado por Costa et al. (2007). Esses dados foram selecionados para o estudo da potencimetria do SAPP por terem sido coletados no mesmo período, o que evita distorções que possam ser causadas por variações sazonais dos níveis dos aquíferos, conforme destacado por Fetter (2001) e apresentado na Figura 6.1. Além disso, os níveis estáticos medidos por Costa et al. (2007) abrangem poços com diferentes profundidades e em diferentes condições hidrogeológicas, variando de livres a semiconfinadas/confinadas. O Anexo I apresenta o quadro com as informações dos 80 poços mencionados. Essa abordagem integrada proporciona uma

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

compreensão mais abrangente da potenciometria na área de estudo, considerando a heterogeneidade das condições do aquífero.

6.2 Análise dos registros de níveis estáticos de poços cadastrados

Afim de selecionar os poços medidos por Costa et al. (2007) e separá-los entre os que captam água de aquíferos livres e aqueles que capturam água de aquífero confinado, lançou-se mão da relação que ocorre entre a superfície potenciométrica dos aquíferos superficiais (livres) e a altitude do terreno, que é frequentemente evidenciada pela existência de uma correlação aproximadamente linear nos dados de altitude versus cota do nível de água. Esta observação decorre do controle exercido pela topografia sobre a distribuição das cargas hidráulicas nesses aquíferos, refletindo a influência direta da elevação do terreno na superfície potenciométrica.

Entretanto, a dinâmica é diferente para os aquíferos confinados, nos quais a carga hidráulica não é controlada pela topografia, ou seja, não se verifica uma correlação linear com baixa dispersão de dados entre a altitude do terreno e a cota do nível estático (NE). O mesmo vale para aquíferos semiconfinados e multicamadas em razão da complexidade e arranjo entre camadas confinantes e camadas aquíferas desses sistemas, sob diferentes condições de pressão, que resultam em distribuições com alta dispersão de dados.

As correlações entre a altitude do terreno e a cota do NE para o conjunto de poços levantados por Costa et al. (2007) e apresentados no diagnóstico, revelaram uma tendência geral positiva, indicando que, em termos gerais, conforme a altitude do terreno aumenta, a cota do NE também tende a aumentar. No entanto, a grande dispersão dos pontos sugere que as cargas hidráulicas são de natureza diversa.

Essa diversidade pode ser atribuída a diferentes condições geológicas e hidrogeológicas dos poços amostrados, enfatizando a complexidade intrínseca na distribuição das cargas hidráulicas em áreas heterogêneas. Sendo assim, optou-se por empregar o mesmo tipo de análise, porém separando os 80 poços analisados em dois grupos distintos:

- um conjunto representado por níveis estáticos menores ou iguais a 15 m (níveis rasos);
- um conjunto representado por níveis estáticos maiores do que 15 m.

O gráfico da Figura 6.2 apresenta uma correlação entre a altitude do terreno e cota do NE, separadamente para cada um dos conjuntos de dados.

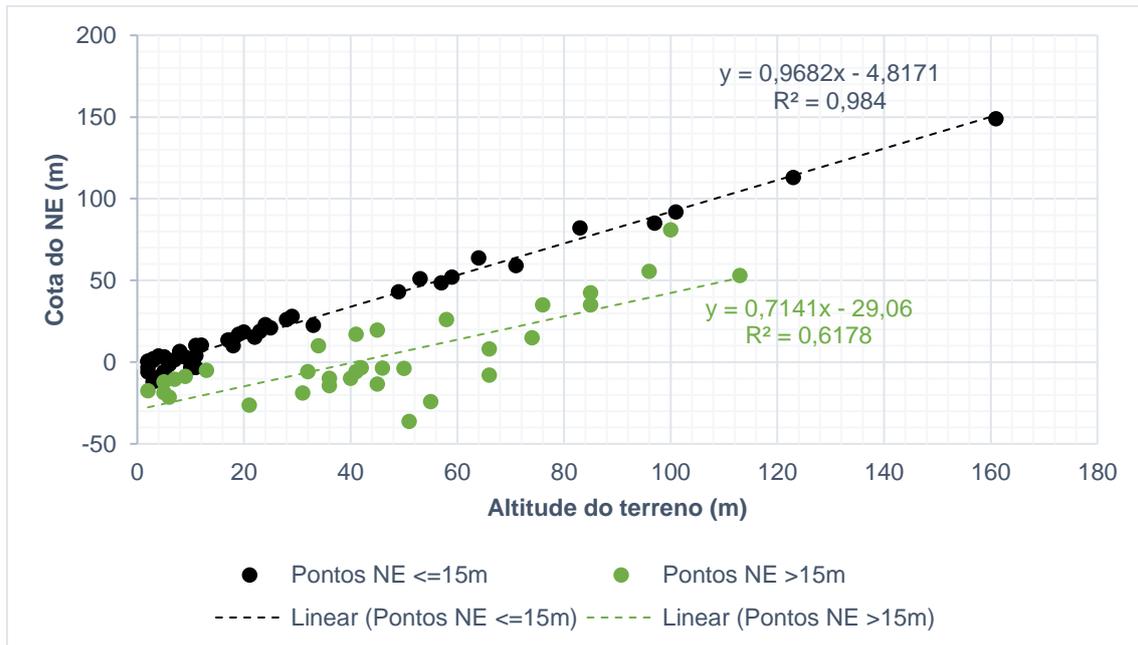


Figura 6.2 - Correlação altitude do terreno versus cota do NE com filtro para pontos com NE ≤ a 15 m e NE > 15 m

No primeiro conjunto, caracterizado por níveis estáticos menores ou iguais a 15 m, observa-se uma correlação linear positiva com um ajuste robusto de 98%. Essa correlação forte sugere um controle topográfico significativo sobre esses níveis estáticos, indicando que correspondem a aquíferos livres. Esses aquíferos são associados às unidades hidroestratigráficas Barreiras e Coberturas Sedimentares, evidenciando a relação direta entre a topografia do terreno e a superfície potenciométrica nas áreas onde a água subterrânea está mais próxima da superfície.

Por outro lado, o segundo conjunto, representando níveis estáticos maiores do que 15 m, exibe uma grande dispersão de pontos e um ajuste linear mais modesto, atingindo apenas 62%. Essa dispersão e o ajuste mais fraco sugerem um controle topográfico mais tênue sobre esses níveis estáticos. A análise desse conjunto indica que esses níveis não correspondem a aquíferos livres e, portanto, podem refletir condições hidrogeológicas mais complexas, como a presença de camadas confinadas ou semiconfinadas. Essa diferenciação entre os conjuntos destaca a importância de considerar a heterogeneidade hidrogeológica ao interpretar dados potenciométricos.

A análise foi estendida para incluir um conjunto de poços com profundidade de até 50 m, integrantes do cadastro do SIAGAS, proporcionando informações adicionais sobre a relação entre a altitude do terreno e a cota do nível estático (NE). No caso desses poços, a análise

revelou uma correlação linear positiva significativa, com um ajuste muito forte de 98,9%, conforme evidenciado na Figura 3.147. Essa forte correlação indica claramente a predominância de aquíferos livres, onde a altitude do terreno exerce um controle significativo sobre a superfície potenciométrica.

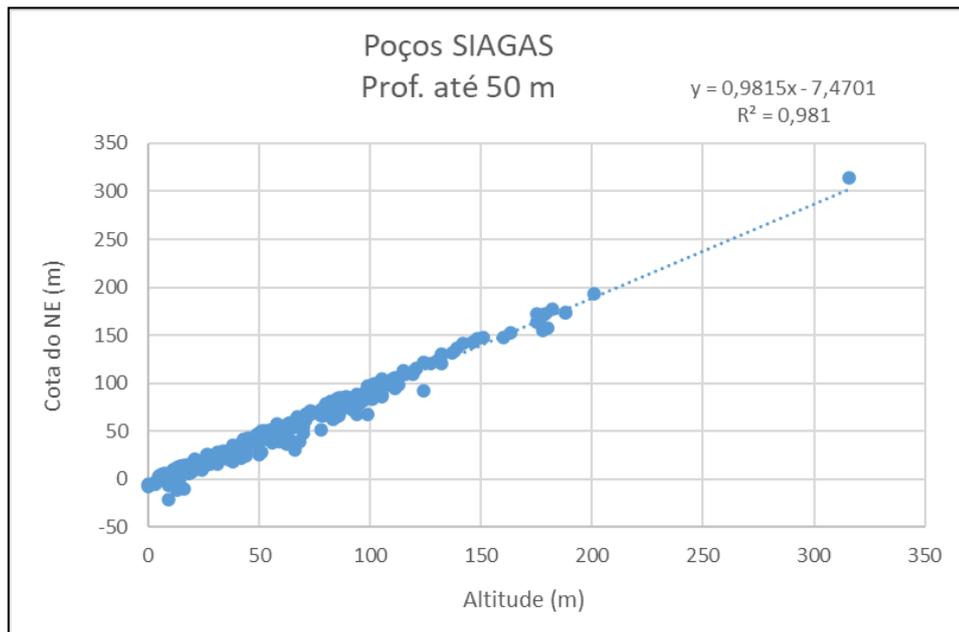


Figura 6.3 - Correlação entre a altitude do terreno e cota do NE para 256 poços com profundidades de até 50 m (cadastro SIAGAS).

Por outro lado, ao considerar o conjunto de poços com mais de 100 m de profundidade, a correlação entre a altitude do terreno e a cota do NE exibe uma grande dispersão de pontos e uma correlação com ajuste inferior a 50%, conforme ilustrado na Figura 3.148. Esses resultados indicam que esses poços não estão associados a aquíferos livres, sugerindo condições hidrogeológicas mais complexas ou confinadas. A fraca correlação destaca a influência limitada da topografia no controle dos níveis estáticos dos aquíferos mais profundos.

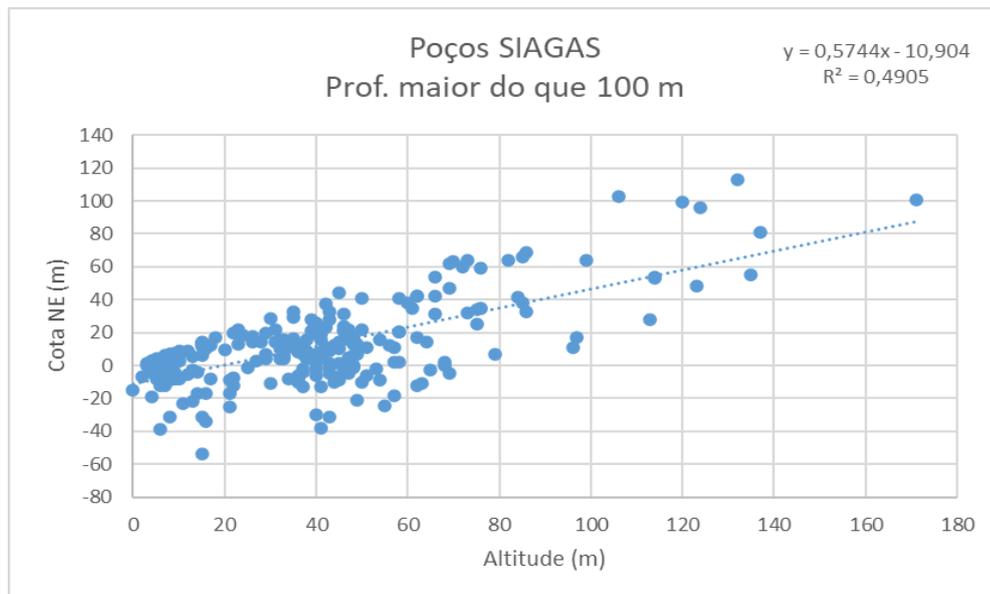


Figura 6.4 - Correlação entre a altitude do terreno e cota do NE para 399 poços com profundidades maiores do que 100 m (cadastro SIAGAS).

Este tipo de análise mostra-se importante para auxiliar na distinção entre poços perfurados nos subsistemas livre e confinado.

6.3 Mapa potenciométrico do subsistema livre

Com base nos resultados obtidos na fase anterior, foi possível elaborar o mapa potenciométrico para os aquíferos livres rasos. O método utilizado envolveu a aplicação da equação derivada da correlação dos dados apresentados na Figura 6.2 ($y = 0,968x - 4,8171$) a cada pixel do raster do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de estudo. Esse procedimento resultou na representação da distribuição das cargas hidráulicas do aquífero livre no terreno, conforme demonstrado na Figura 3.3.

O método empregado tem sido utilizado com frequência em vários estudos porque trata-se de método estatístico que exige uma amostragem pequena de dados e permite extrapolar informações para todo o grid da área de estudo, além de ser hidrogeologicamente correto, ou seja, ajustado com as drenagens (zonas de descarga) do terreno (ANA, 2017; ANA, 2018).

As equipotenciais traçadas no mapa da Figura 6.5 foram representadas por isolinhas equidistantes 50 m, extraídas do raster de cargas hidráulicas, com emprego de ferramentas de geoprocessamento. O mapa potenciométrico resultante mostra que o fluxo subterrâneo se dirige dos pontos mais elevados para os pontos mais deprimidos do terreno, coincidentes com

 GOVERNO DA PARAIBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

os talwegues dos cursos de água superficiais, ou seja, dos pontos de recarga para os pontos de descarga.

Nesse cenário, são produzidos numerosos subsistemas de fluxo locais, governados pela conformação topográfica do terreno, mostrando direções de fluxo no sentido dos cursos de água superficiais, para onde as águas subterrâneas são descarregadas. Os subsistemas de fluxo locais mostram forte conexão com as águas superficiais e são influenciados diretamente pelas precipitações atmosféricas, que são responsáveis pelas oscilações da carga hidráulica e mudanças no gradiente de fluxo. Considerando a escala da rede hidrográfica utilizada neste estudo (1:50.000), foram identificados por geoprocessamento 2.483 subsistemas de fluxo local, cada um composto por um trecho de drenagem específico. Esses subsistemas são representados por microbacias e estão presentes em todas as porções do terreno onde se encontram aquíferos rasos livres.

Na escala de bacias hidrográficas, os fluxos locais originados nos aquíferos livres são controlados pelos grandes divisores hidrogeológicos, aproximadamente concordantes com os divisores topográficos que marcam os limites dessas bacias. Esses divisores hidrogeológicos restringem o movimento da água subterrânea aos domínios específicos da bacia hidrográfica, impedindo a transferência de águas subterrâneas de uma bacia para outra sob tais condições.

Evidentemente, o movimento da água subterrânea difere sob condições de fluxo regional, como será discutido no capítulo seguinte.



Figura 6.5 – Potenciometria e direções de fluxo do subsistema livre do SAPP.

Nota: Este mapa está apresentando em sua forma reduzida no texto, mas foi elaborado em tamanho A0. Sua versão original está sendo entregue como anexo a este documento.

6.4 Análise da potenciometria do subsistema livre nas bacias hidrográficas da área de estudo

6.4.1 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Guaju

Na bacia do rio Guaju, a potenciometria varia em torno de 153m a 18m de carga hidráulica (Figura 6.6). O gradiente de fluxo é mais acentuado na metade oeste da bacia hidrográfica, sendo que a região leste, próxima ao litoral, apresenta uma grande área em que a carga hidráulica é menor do que 25m, essa mesma área abrange a área de ocorrência dos rios Guaju, Pau-Brasil e Riacho do Carreiro. Próximo ao litoral são observadas zonas de maior carga hidráulica, passando um pouco dos 50m, o que indica regiões com potencial de descarga da água em direção aos cursos d'água. Na porção sul da bacia do rio Guaju, está a bacia do rio Camaratuba. Na porção oeste da fronteira entre ambas, ocorrem valores mais altos de carga hidráulica que vão sendo reduzidos nos sentidos leste, em direção ao mar; norte em direção ao interior da bacia do rio Guaju e sul em direção ao interior da bacia do Camaratuba.

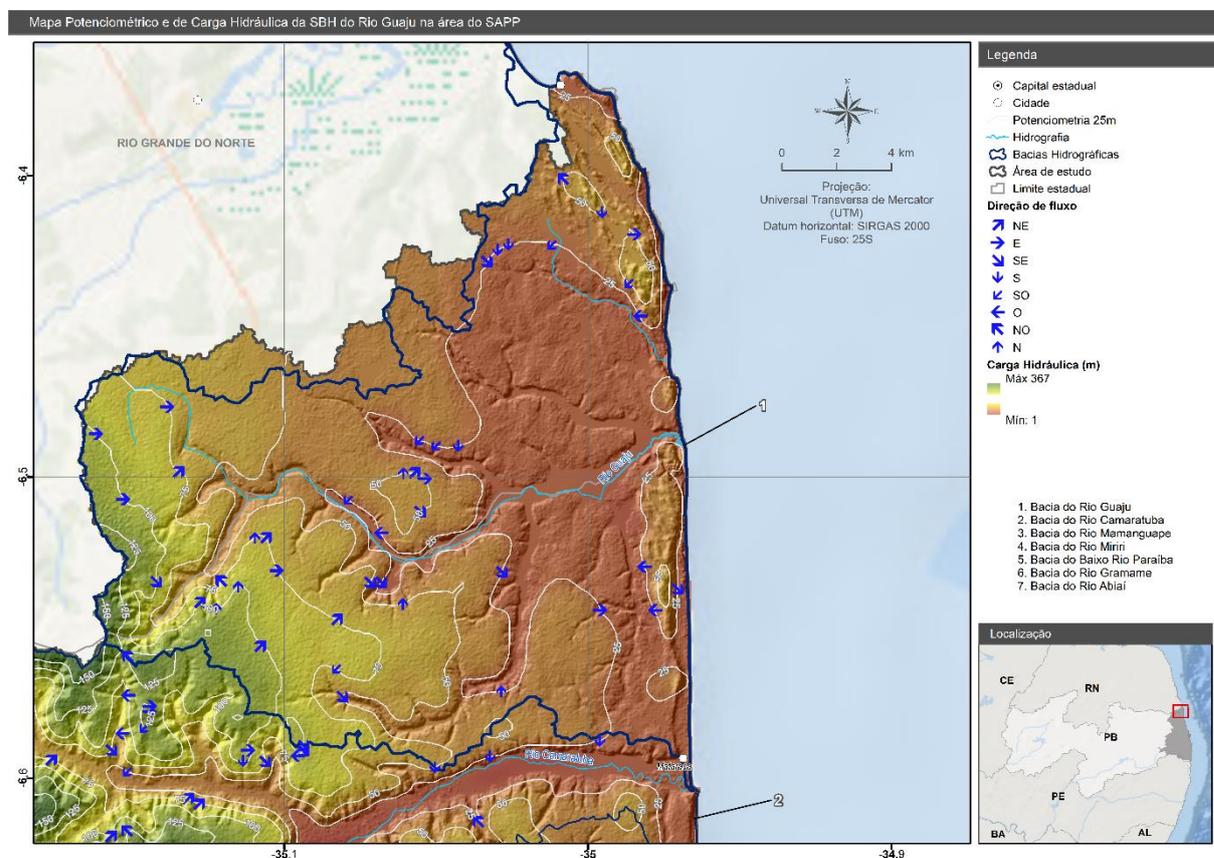


Figura 6.6 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Guaju

6.4.2 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Camaratuba

A bacia do rio Camaratuba, ao sul, faz fronteira com a bacia do rio Mamanguape. Na porção oeste da região de fronteira entre essas bacias, ocorre um potencial hidráulico superior a 175m (Figura 6.7). Sendo que na região de fronteira entre as bacias mencionadas, a direção predominante é de sul para norte em direção ao interior da bacia Camaratuba e de norte a sul em direção ao interior da bacia do rio Mamanguape. As linhas equipotenciais de fluxo seguem o contorno da drenagem principal, ou seja, dos rios Camaratuba e rio da Pitanga. Da região do município de Pedro Régis, ocorrem as maiores cargas hidráulicas, chegando a superar os 200m.

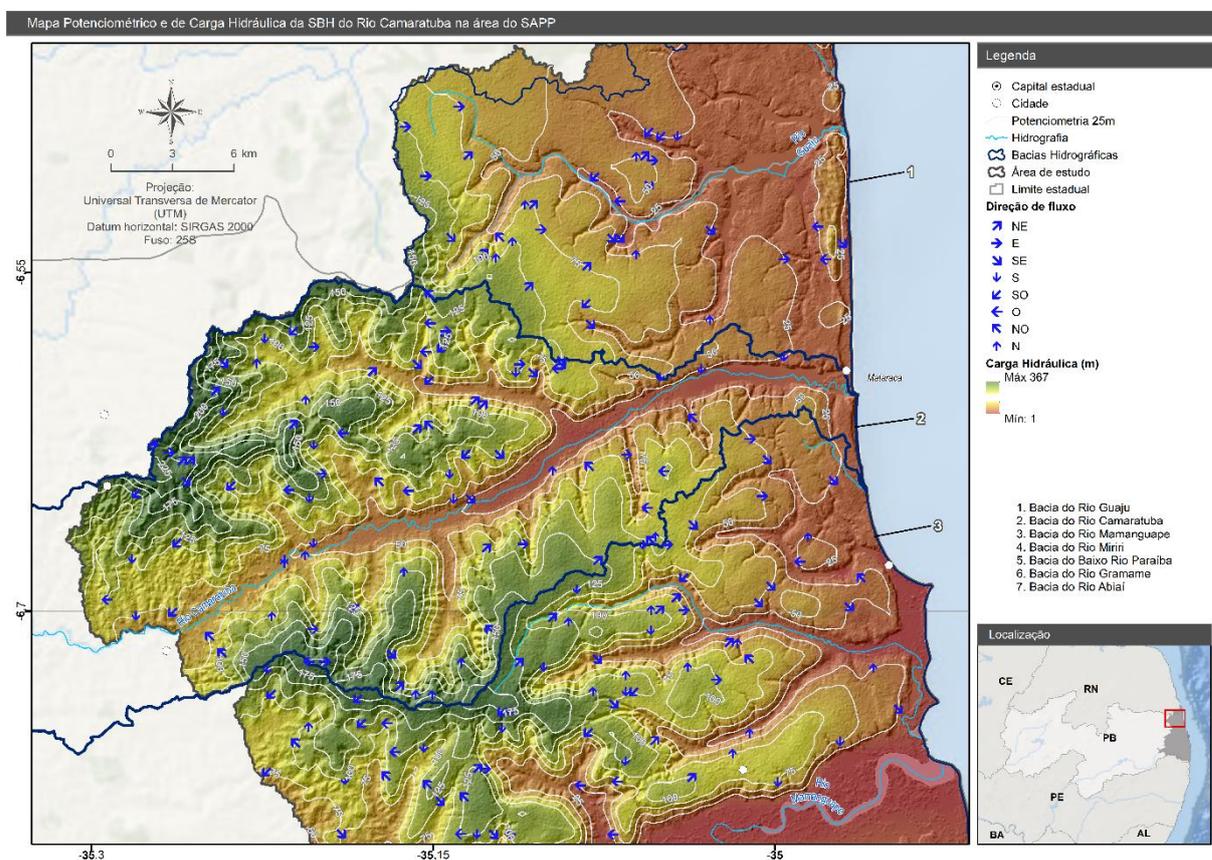


Figura 6.7 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Camaratuba

6.4.3 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Mamanguape

Na bacia hidrográfica do rio Mamanguape, as cargas hidráulicas são bastante elevadas na região de fronteira com a bacia do rio Camaratuba, girando em torno de 150 a 175m. Essa carga vem sendo reduzida na direção sul da bacia, atingindo os menores valores nos arredores do rio Mamanguape, que se estende até o mar, formando uma ampla e extensa

região de oeste a leste com baixo potencial hidráulico (menor que 25m), o que configura uma vasta região de descarga subterrânea conforme detalhes da Figura 6.8.

A porção sul da bacia, que faz fronteira com a bacia do rio Miriri, possui cargas hidráulicas menos elevadas em relação aquelas apresentadas na porção norte. As direções de fluxo na fronteira entre as bacias são principalmente para o norte, ou seja, para o interior da bacia do Mamanguape.

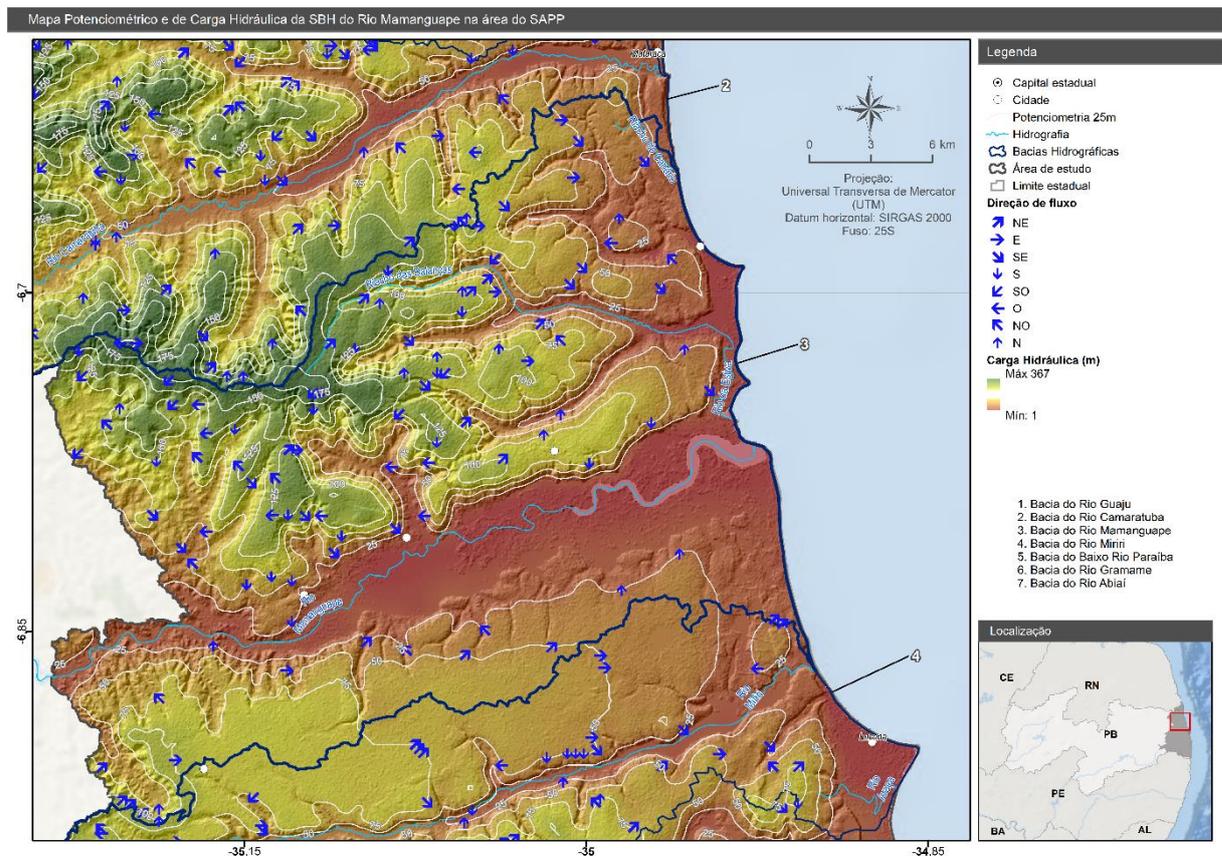


Figura 6.8 – Potencimetria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Mamanguape.

6.4.4 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Miriri

Na bacia do rio Miriri, há uma concentração maior de áreas com potencial hidráulico alto, em torno de 150 a 175m, principalmente na região sul que faz fronteira com a bacia do Baixo rio Paraíba (Figura 6.9). As regiões de baixo potencial hidráulico (<25m), que configuram áreas de descarga dos aquíferos, são encaixadas no estreito vale do rio Miriri.

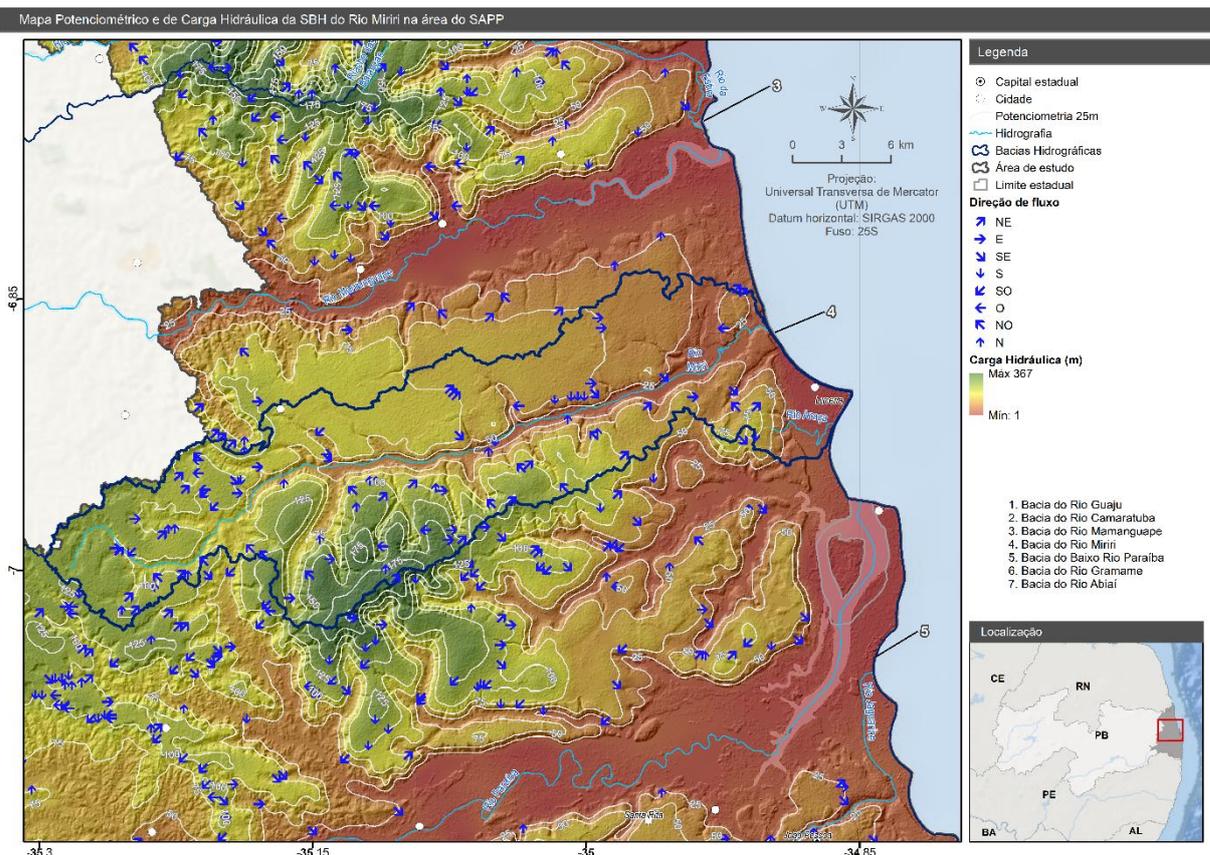


Figura 6.9 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Miriri

6.4.5 Análise da Potenciometria na Bacia do Baixo Paraíba

A bacia do rio Baixo Paraíba possui uma extensa área em que as cargas hidráulicas são baixas (Figura 6.10), a porção norte da bacia, que faz fronteira com a bacia do rio Miriri, apresenta áreas de alto potencial hidráulico, que vem se reduzindo na direção sul, para onde a direção de fluxo apresenta-se como prioritária, ou seja, na direção dessa vasta planície do rio Baixo Paraíba que se estende de oeste até o mar.

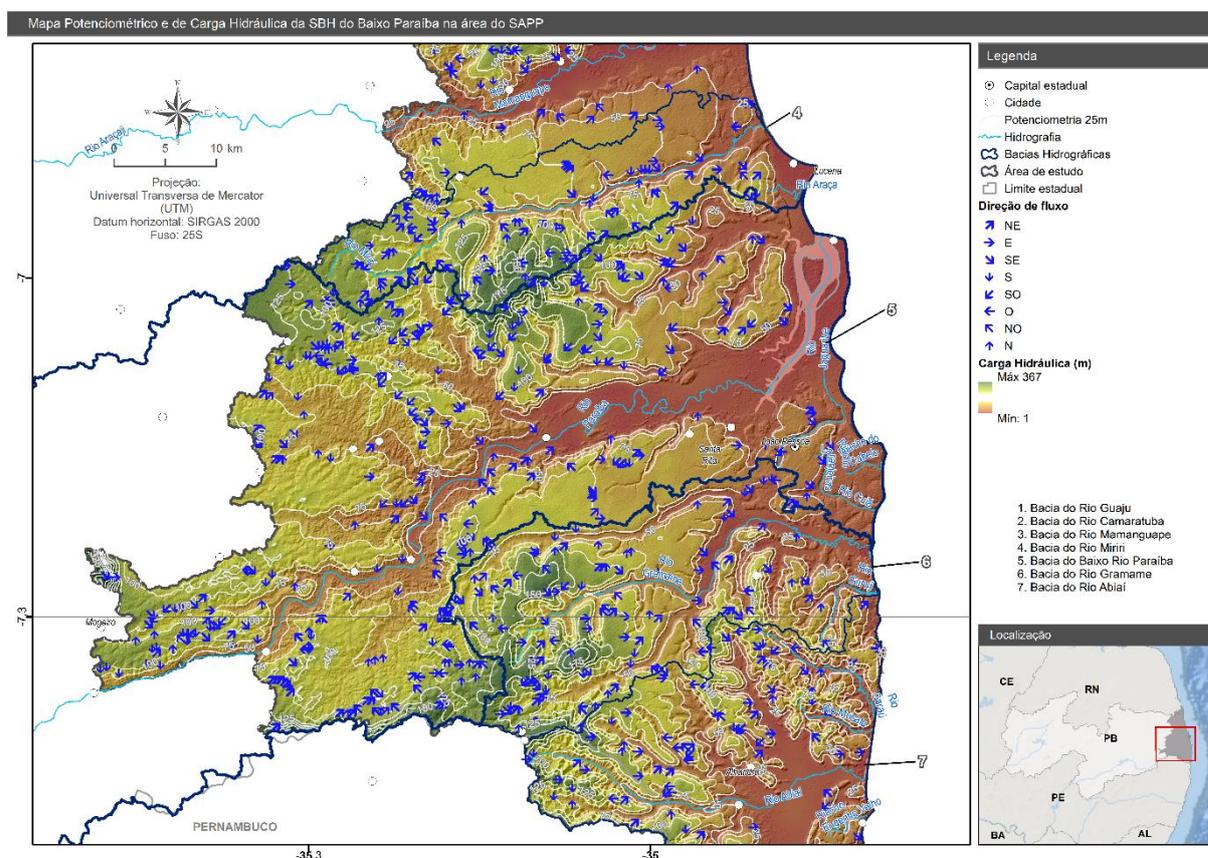


Figura 6.10 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Baixo Paraíba

Para que a região de João Pessoa possa ser mais bem analisada devido a sua importância, é apresentado também um mapa com zoom para a região da conurbação (Figura 6.11). Para este mapa em especial, foram aplicadas isolinhas de potenciometria de 10 em 10m. Observando o mapa, nota-se que a carga hidráulica varia de 70m na região mais distante do mar até 10m na região mais próxima. Sendo, portanto, a direção de fluxo preferencial da região mais central do adensamento urbano em direção ao mar, com algumas ocorrências de direção de fluxo no sentido oeste, em função de uma região de cargas mais baixas na área centro-oeste da conurbação.

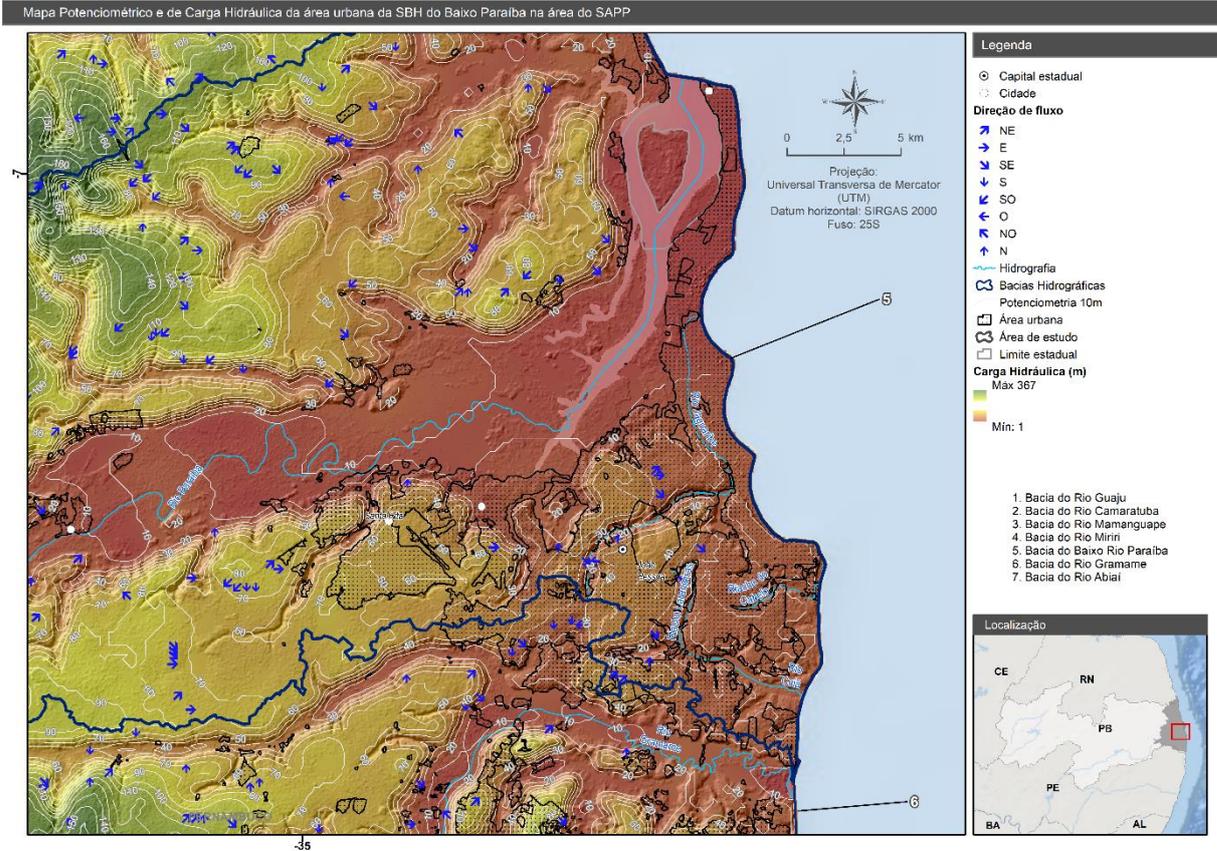


Figura 6.11 – Potenciomtria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Baixo Paraíba na região da conurbação de João Pessoa

6.4.6 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Gramame

A bacia do rio Gramame é bastante mesclada em termos de potenciometria. Na cabeceira da bacia, região oeste, os potenciais máximos variam na casa dos 150m de carga hidráulica (Figura 6.12). Os gradientes hidráulicos se direcionam no sentido das diversas drenagens que ocorrem na região e que somadas formam o rio Gramame que por sua vez desemboca no mar. Esse encontro ocorre numa região de planície onde a carga hidráulica é menor do que 25m.

Ao sul a bacia do rio Gramame faz fronteira com a bacia do rio Abiaí, nesta região fronteira as cargas hidráulicas giram em torno de 125m e vão reduzindo conforme adentram o interior das bacias hidrográficas, apresentando assim uma direção preferencial para o norte quando adentram os limites da bacia do rio Gramame e sentido sul quando adentram os limites da bacia do rio Abiaí.

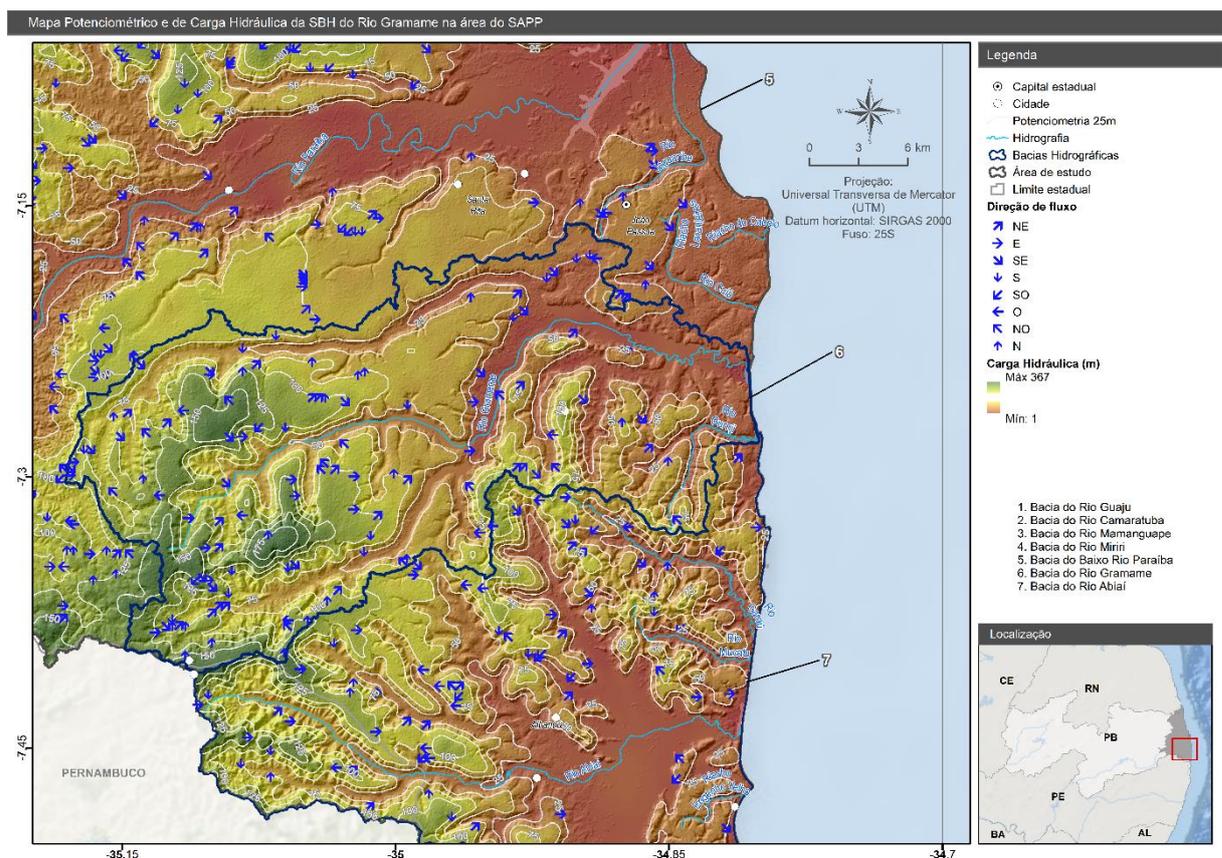


Figura 6.12 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Gramame.

6.4.7 Análise da Potenciometria na Bacia do rio Abiaí

A bacia do rio Abiaí caracteriza-se pela ocorrência de uma região extensa de baixas cargas hidráulicas. Mesmo as regiões de maior potencial hidráulico da região (Figura 6.13), comparadas com o restante do SAPP, são baixas, girando em torno de 125m.

A região sul da bacia faz fronteira com a área de estudo, seu contorno se caracteriza por potenciais em torno de 100 m que vão reduzindo de sul para norte à medida que adentram a bacia.

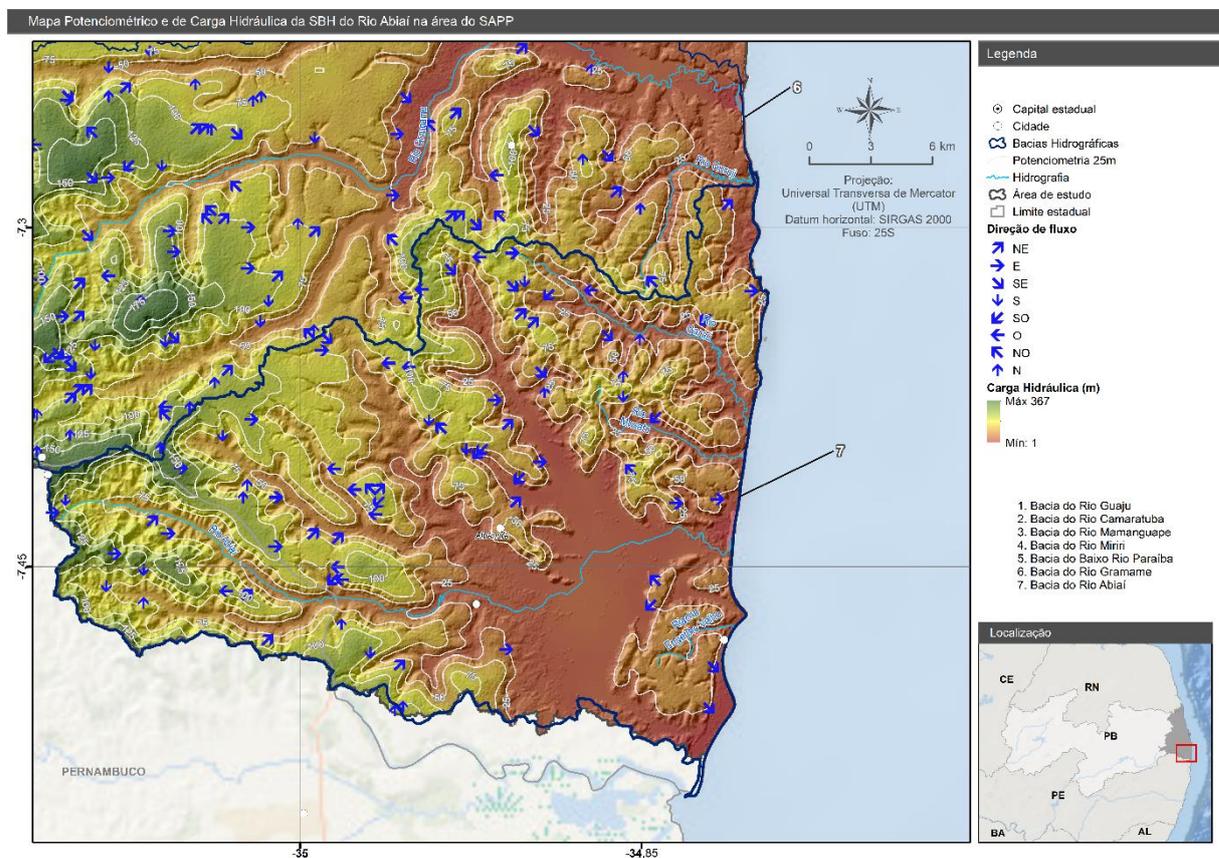


Figura 6.13 – Potenciometria e direções de fluxo na bacia hidrográfica do rio Abiaí

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

6.5 Mapa potenciométrico do subsistema confinado

A potenciométrica do subsistema confinado da Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba é bastante complexa e de difícil definição com base nos dados hidrogeológicos existentes. As cargas hidráulicas diferenciais comumente constatadas nesse sistema, em áreas contíguas, são indicativas da presença de camadas confinantes ou mesmo semiconfinantes, intercaladas aos aquíferos. Essa situação não permite estabelecer uma potenciométrica única para o subsistema confinado/semiconfinado, pois as cargas hidráulicas mensuradas não correspondem exatamente à mesma camada aquífera.

O lento movimento das águas subterrâneas desse subsistema, infiltradas em profundidade a partir de áreas de recarga mais distantes, é governado pelo fluxo regional. Os fluxos regionais são pouco afetados por variações sazonais de recarga, o que favorece a manutenção do escoamento subterrâneo e, conseqüentemente, a descarga dos rios em bacias hidrográficas distantes (Eberts & George, 2000). Em outras palavras, deve-se admitir que, potencialmente, nem toda recarga que se processa efetivamente no interior do contorno topográfico de uma dada bacia, pode ser mensurável na mesma bacia.

Essa situação pode ser exemplificada pela Figura 6.14, na qual o autor destaca não apenas os fluxos locais e regionais, mas também identifica um fluxo intermediário. Como é possível observar, tanto o fluxo intermediário quanto o regional direcionam suas águas para bacias distantes de seus pontos de recarga. Nas áreas de descarga dos fluxos regionais, a água subterrânea pode se apresentar mais mineralizada e relativamente mais aquecida em comparação com o padrão normal, devido ao maior tempo de trânsito e à maior profundidade das linhas de fluxo no aquífero.

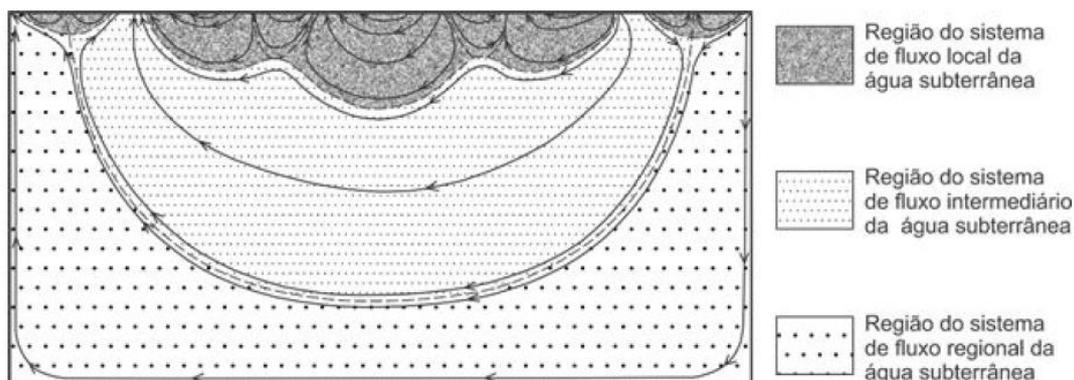


Figura 6.14- Sistemas locais, intermediários e regionais de fluxo de água subterrânea (Freeze & Cherry, 1979).

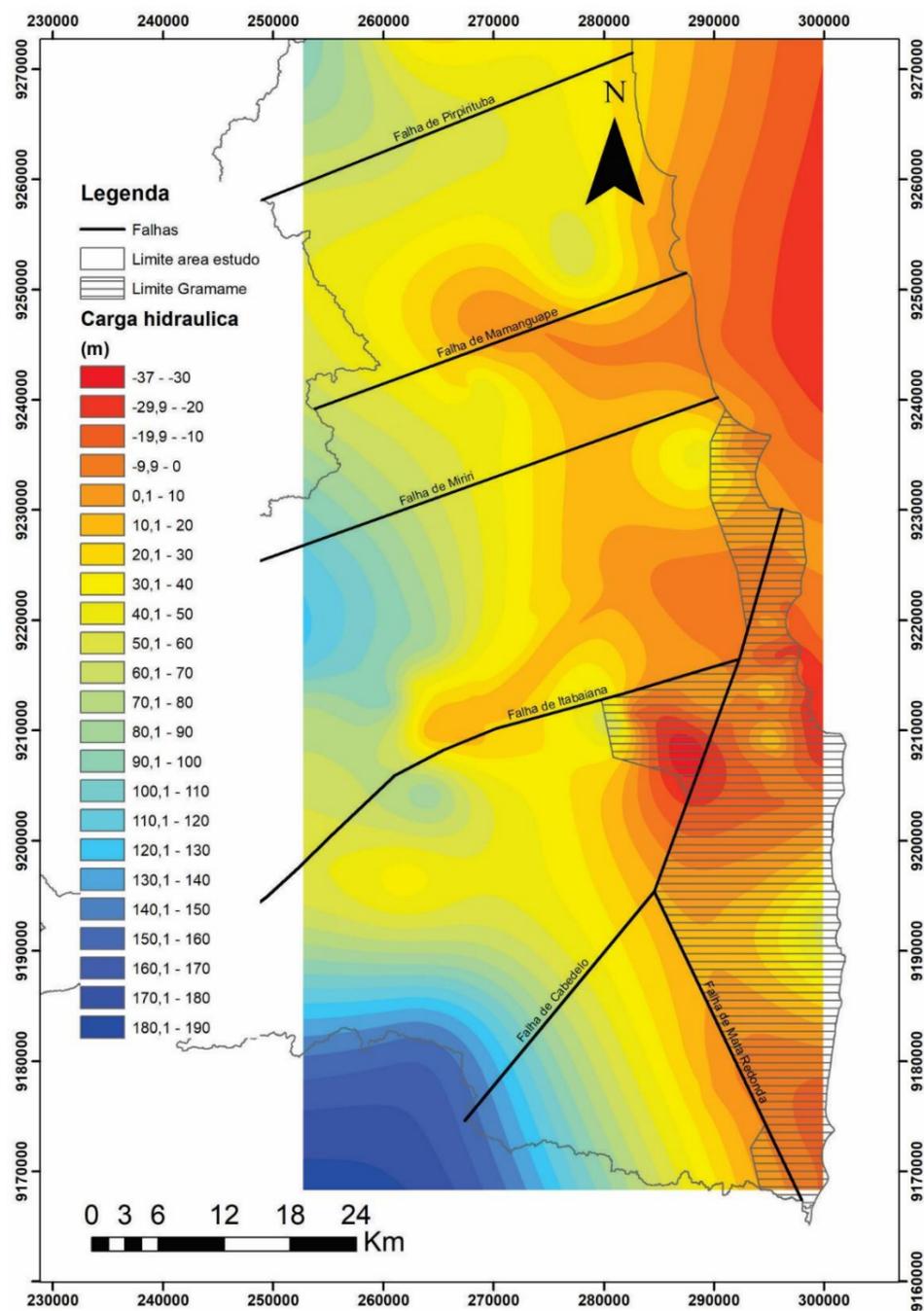
	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto 03_REV03	

A determinação da configuração da potenciometria da superfície natural ou original do subsistema confinado do SAPP é uma tarefa complexa, uma vez que o sistema se encontra atualmente no estágio de desenvolvimento – ou seja, no estágio em que a exploração da água subterrânea passa a afetar o equilíbrio natural do sistema hidrogeológico e causar descensos de níveis por conta das interferências provocadas pelo bombeamento de poços.

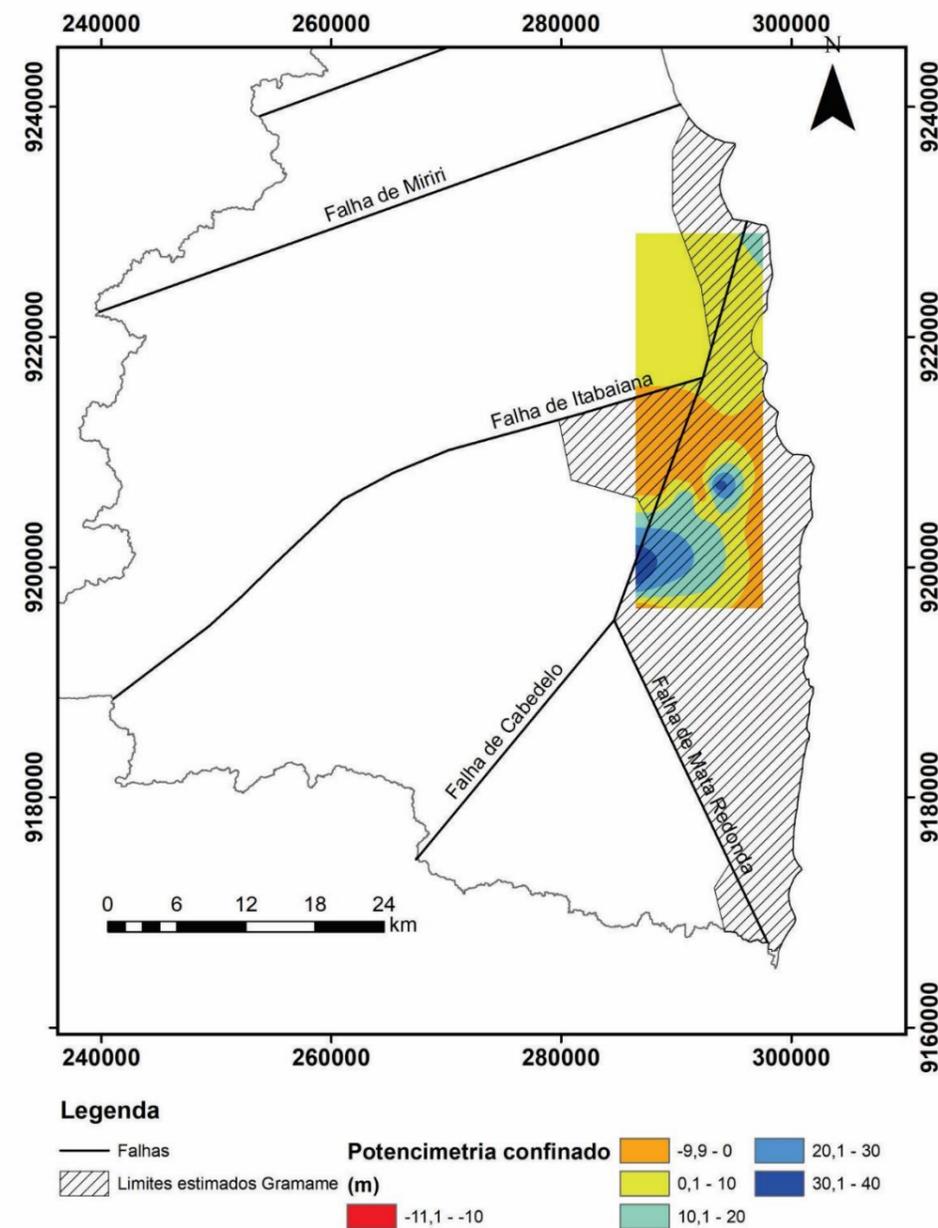
Como exemplo da complexidade no traçado das equipotenciais do subsistema confinado, podem ser mostrados os mapas potenciométricos elaborados com dados de Costa et al. (2007) e do Projeto BRAMAR (2018) (Figura 6.15). Esses mapas replicam as superfícies potenciométricas publicadas pelos citados autores, correspondentes a dois períodos diferentes, com emprego de pontos de medição diferentes, abrangendo diferentes áreas e sob interferência de poços em bombeamento. O mapa de Costa et al. (2007) representa o sistema Barreiras/Beberibe, sem distinção entre os subsistemas livre e confinado; o mapa do Projeto BRAMAR (2018) representa somente o subsistema confinado. Os resultados em termos espacialização e valores das cargas hidráulicas distribuídas nas duas figuras citadas são desiguais e retratam as particularidades envolvidas na elaboração de cada um dos mapas potenciométricos.

Com o propósito de atender aos Termos de Referência e fundamentado em estudos previamente publicados na região do Sistema Aquífero Paraíba Pernambuco (SAPP), foram cuidadosamente selecionados, a partir do banco de dados deste estudo, os poços localizados dentro do perímetro identificado como área de ocorrência do Aquitardo Gramame. Esses poços apresentam profundidades mínimas de 100 metros e foram escolhidos com base em análises que relacionam a altitude do terreno com a cota do nível estático, evidenciando a presença de aquíferos confinados a semiconfinados, os quais fazem parte do subsistema Beberibe.

Os dados de carga hidráulica registrados na documentação dos poços foram interpolados com auxílio da ferramenta Topo To Raster do software ArcGIS e o raster da superfície potenciométrica resultante do subsistema confinado é mostrado na Figura 6.16. Nessa representação visual, é possível identificar as regiões com cargas negativas e positivas, além de observar as múltiplas direções de fluxo da água subterrânea nas camadas subjacentes ao Aquitardo Gramame. Essas características são predominantemente influenciadas pelas interferências causadas pelo rebaixamento da superfície potenciométrica, resultante da extração de água subterrânea pelos poços. A retirada de água subterrânea pode resultar no deslocamento de água salgada para o interior do aquífero, dependendo da extensão do cone de rebaixamento e da magnitude dos descensos provocados.



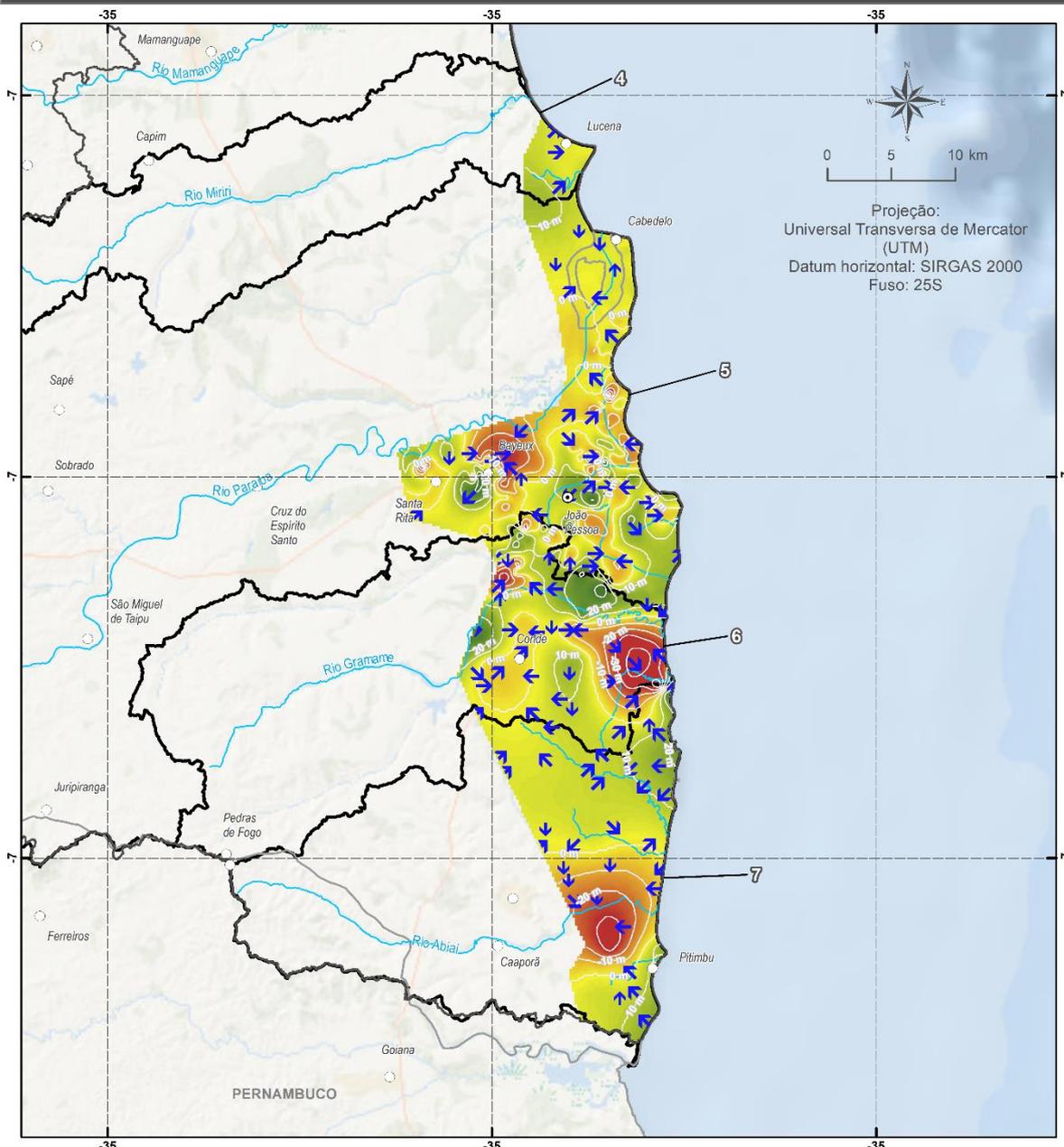
A



B

Figura 6.15 – A: Mapa potenciométrico do SAPP elaborados por Costa et al. (2007); B: Mapa potenciométrico do subsistema confinado elaborado pelo Projeto BRAMAR (2018).

Potenciometria do aquífero Beberibe



Legenda

- ⊙ Capital estadual
 - Cidade
 - ▭ Área de estudo
 - ~ Hidrografia
 - Potenciometria 10 m
 - ⊞ Bacias Hidrográficas
 - ▭ Limite estadual
- Carga hidráulica (m)**
Máx: 36
Mín: -52
- Direções de fluxo**
- ➔ NE
 - ➔ E
 - ➔ SE
 - ➔ S
 - ➔ SO
 - ➔ O
 - ➔ NO
 - ➔ N

Localização



1. Bacia do Rio Guaju
2. Bacia do Rio Camaratuba
3. Bacia do Rio Mamanguape
4. Bacia do Rio Miriri
5. Bacia do Baixo Rio Paraíba
6. Bacia do Rio Gramame
7. Bacia do Rio Abiaí

Figura 6.16 – Mapa potiométrico do subsistema confinado subjacente ao Aquitardo Gramame.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

6.6 Análise das oscilações de níveis nos subsistemas livre e confinado do SAPP

6.6.1 Oscilações de níveis do subsistema livre

O relatório R2 apresentou dados do monitoramento do aquífero livre no Município de João Pessoa, obtidos em 32 poços do Projeto Bramar, com profundidades variando de 4,0 a 39,0 metros. A maioria desses poços é utilizada para o abastecimento de moradores da zona rural e são do tipo amazonas, com diâmetros variando em 1 e 2 metros.

Treze desses poços se localizam na bacia hidrográfica do rio Paraíba e os 19 restantes na bacia hidrográfica do rio Gramame. Desse conjunto, 12 estão localizados na área de ocorrência do Aquitardo Gramame, cujos limites operacionais foram definidos neste relatório.

O monitoramento de níveis, com registros coletados mensalmente, ocorreu no período de novembro de 2009 a fevereiro de 2018, sendo que de agosto de 2011 a outubro de 2015 as medições foram descontinuadas. Não foi realizado monitoramento simultâneo da precipitação atmosférica na área onde se localizam os poços para uma efetiva correlação entre quantidade de chuva e variação do nível de água, todavia, os dados apresentados mostram uma inequívoca correlação entre os níveis crescentes de água no período de maiores precipitações (meses de março a agosto), e os níveis decrescentes no período de estiagem (setembro a fevereiro), conforme exemplificado na Figura 6.17.

A respeito dos resultados obtidos na análise dos dados de monitoramento do aquífero livre no âmbito do projeto Bramar, Coelho et al. (2012) calcularam uma recarga direta de 73,8 mm durante o período de novembro de 2009 a outubro de 2010. Esse valor equivale a 7,2% da precipitação média anual na área de estudo.

Fernandes (2017), por sua vez, demonstrou que os poços de monitoramento do aquífero livre, no âmbito do projeto Bramar, exibiram variações altimétricas entre 0,46 m e 3,92 m ao longo de 2016. A recarga média anual foi estimada em 184,88 mm, representando 11,7% da precipitação durante o período avaliado.

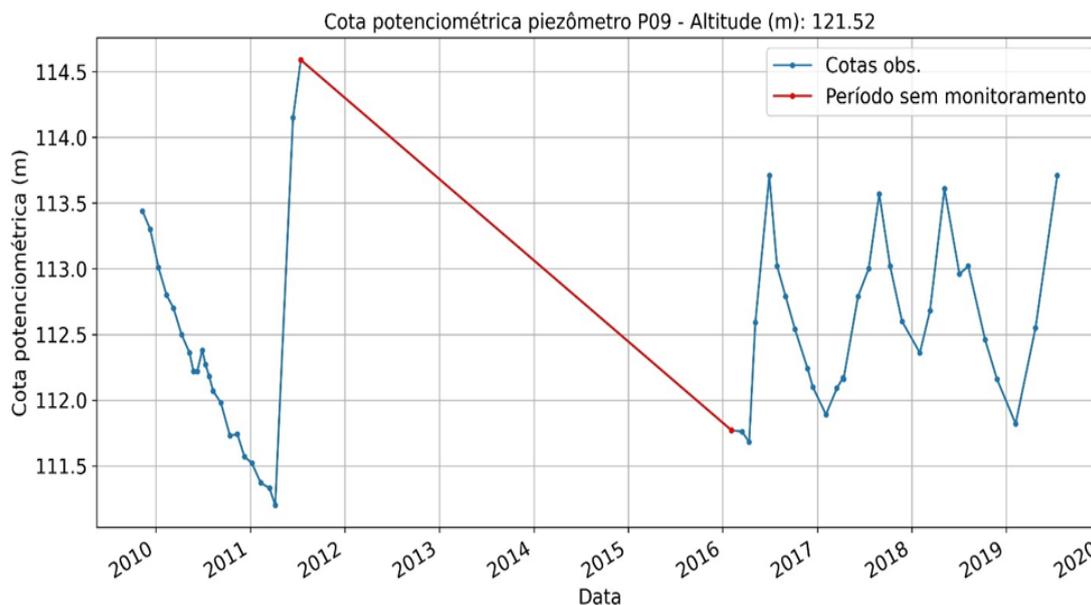


Figura 6.17 - Variação da carga hidráulica no poço de monitoramento P-09.

Em relação aos resultados derivados da análise dos dados de monitoramento, Coelho et al. (2012) sugeriram a perfuração estratégica de “piezômetros” em locais específicos da bacia, evitando qualquer interferência que possa comprometer a qualidade dos dados, como observado nos poços sujeitos a bombeamento. Além disso, propuseram a instalação de sondas para a medição automatizada do nível estático diariamente, visando detectar alterações em um intervalo de tempo mais curto.

É importante destacar que a amplitude da variação do nível de água nos aquíferos livres, entre outros fatores, está diretamente relacionada à porosidade efetiva do intervalo sedimentar e à posição do poço em relação à sua área de descarga. Em outras palavras, as amplitudes são menores nas proximidades das áreas de descarga e aumentam conforme nos afastamos.

6.6.2 Oscilações de níveis do subsistema confinado

O monitoramento permanente e contínuo de níveis de água do subsistema confinado é realizado desde 2009 pelo Serviço Geológico do Brasil-CPRM, por meio do projeto RIMAS - Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas, sendo mantido através de recursos institucionais.

O projeto RIMAS conta com quatro poços de monitoramento localizados na área de ocorrência do Aquitardo Gramame, cujos limites operacionais foram definidos neste relatório. São os poços de código RIMAS 2600008444 (Cabedelo), 2600047476 (João Pessoa), 26000047473

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

(João Pessoa) e 2600047480 (Bayeux). Esses poços estão sendo monitorados automaticamente desde 17/11/2011 e os dados disponibilizados estão atualizados até 16/09/2022, com exceção do poço de Bayeux que foi desativado em 2013. Algumas discontinuidades nos registros por conta de problemas técnicos nos sensores de nível podem ser observadas. Os dados de monitoramento conjunto da pluviometria não estão disponibilizados pela CPRM.

Para uma análise de monitoramento do subsistema confinado, na área do Aquitardo Gramame, foram selecionados os poços de códigos 2600008444 (Cabedelo) e 2600047476 (João Pessoa), dedicados exclusivamente para essa finalidade.

As características construtivas e níveis de água iniciais (nível estático obtido após a realização dos testes de bombeamento ao final da construção do poço) dos poços de monitoramento analisados são mostradas na Tabela 6.1. As características dos poços mostram que os intervalos monitorados estão localizados abaixo do Aquitardo Gramame, em situação de confinamento hidráulico.

Tabela 6.1- Características dos poços de monitoramento da CPRM.

Características dos poços de monitoramento - CPRM					
Código poços	Prof. (m)	NE inicial (m)	Intervalo de filtros	Cimentação do anular	Fm. Gramame
2600008444	310	5,91	136-284 m	0 a 105 m	42 a 93 m
2600047476	154	41,41	128,5 a 150 m	0 a 100 m	60 a 65 m

A Figura 6.18 ilustra a flutuação dos níveis de água do subsistema confinado nos dois poços analisados, distantes mais de 23 km entre si. As oscilações de longo termo dos níveis (fundamentais para estimativa da recarga), observadas nesses poços exibem um padrão consistente, manifestando-se através de períodos de elevação dos níveis (recarga) no intervalo temporal referente aos meses de maior pluviosidade (março a agosto) e descenso dos níveis (descarga) nos meses de estiagem (setembro a fevereiro). As amplitudes das flutuações registradas nos dois poços são diferentes, porém, a sincronia entre os eventos de recarga e descarga é notavelmente precisa e exibe um padrão cíclico.

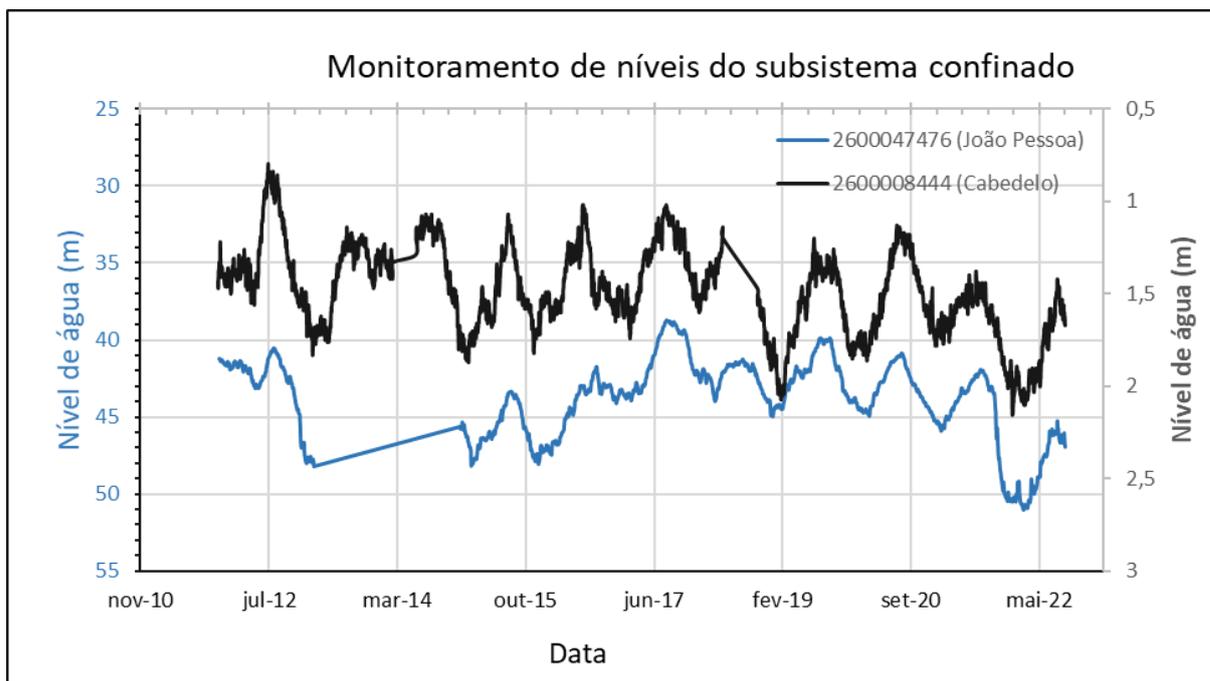


Figura 6.18 - Flutuações de níveis de água de monitoramento de longo termo do subsistema confinado em poços do RIMAS/CPRM.

O monitoramento sistemático com sensores de nível de água no subsistema confinado também foi realizado em 6 poços identificados pelos números P1004, P1005, P1006, P1007, P1009 e P1010, localizados na área de ocorrência do Aquitardo Gramame. Dentre esses, os dados mais significativos foram coletados nos poços P1004 e P1009, respectivamente com 199 m e 310 m de profundidade, e nos poços P1005 e P1010, cujas profundidades não foram determinadas (Figura 6.19).

Os registros de carga hidráulica apresentados no gráfico da Figura 6.19 ilustram as flutuações dos níveis de água dos poços P1004, P1005, P1009 e P1010, durante o período recessivo de dezembro de 2017 a março de 2018. As oscilações de carga hidráulica dos poços são sincrônicas e de pequena amplitude, e as ascensões de nível sugerem uma provável correspondência temporal com períodos curtos de chuva de baixa intensidade. A tendência observada nos registros é de descarga natural do aquífero, com descenso progressivo dos níveis até o final do período recessivo.

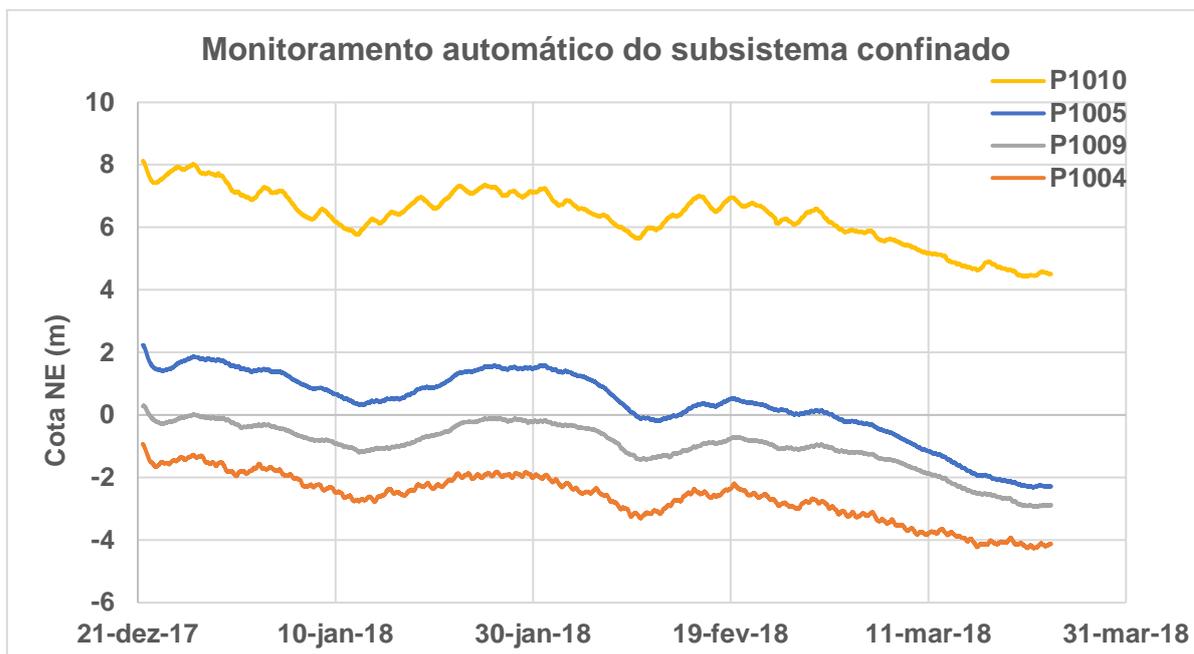


Figura 6.19- Variação dos níveis de água do subsistema confinado em poços monitorados no projeto Bramar.

Finalmente, dados de monitoramento manual não sistemáticos de níveis realizados no período de agosto de 2016 a março de 2018, com longo período entre uma medição e outra, foram realizados em 14 poços perfurados no subsistema confinado, incluindo os poços P1004, P1005, P1006, P1007, P1009 e P1010, analisados a pouco. Os dados apresentados mostram, a grosso modo, o mesmo comportamento geral observado nos poços monitorados contínua e sistematicamente, todavia, o número escasso de registros impede a observação de oscilações rápidas (com períodos de até pouco mais de um dia) e de oscilações médias (com períodos semanais).

Tanto as hidrógrafas do subsistema livre como do subsistema confinado mostram oscilações sazonais de recarga e descarga associadas, respectivamente, aos períodos de maior e menor pluviosidade, como visto a pouco. As oscilações sazonais são comuns nos aquíferos livres, porém não deveriam se manifestar de modo similar em aquíferos confinados, uma vez que a camada confinante possui baixa permeabilidade. Segundo Driscoll (1986) e Rose (2009), a explicação para esse fato está na descontinuidade lateral da camada confinante.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

7 MODELO CONCEITUAL DO FLUXO SUBTERRÂNEO DO SAPP

O fluxo subterrâneo na área do SAPP pode ser representado esquematicamente pela Figura 7.1 e Figura 7.2 que esboçam, de modo simplificado, as relações de contato entre as principais unidades hidroestratigráficas constituintes desse sistema e o movimento da água subterrânea no seu interior, desde as áreas de recarga até as áreas de descarga.

Os reservatórios subterrâneos do SAPP estão reunidos nos subsistemas livre e confinado. As unidades aquíferas principais do SAPP que constituem o subsistema livre são representadas pelos aquíferos Coberturas Sedimentares, Barreiras e parte do Aquífero Beberibe; e o subsistema confinado é representado pelo Aquífero Beberibe, quando subjacente ao Aquitardo Gramame. O SAPP no estado de Paraíba tem sua fronteira física na área leste, no limite com nível do mar; na fronteira oeste com as rochas do embasamento cristalino; ao norte no divisor de águas superficiais da margem esquerda da bacia do rio Guaju; e a sul no divisor de águas superficiais da margem direita da bacia do rio Abiaí.

As relações hidroestratigráficas e o fluxo subterrâneo entre as regiões *onshore* e *offshore* do SAPP ainda são pouco conhecidas e passíveis de diferentes interpretações. A presença de água mais densa com diferentes salinidades, na porção oceânica, acrescenta grande complexidade no estabelecimento de um limite para o escoamento da água doce. Um exemplo ilustrativo é o estudo de Batista (2010), que conduziu uma simulação matemática do estado natural do subsistema Beberibe. A interpretação desse autor sugere que a descarga natural do aquífero confinado ocorre a uma distância de 50 km da zona costeira, no final da plataforma continental. Entretanto, é essencial ressaltar que essa hipótese carece de confirmação por meio de dados geológicos de subsuperfície, uma vez que não existem poços perfurados na porção *offshore*. Nesse sentido, destaca-se a necessidade de investigação da continuidade e da espessura das unidades hidroestratigráficas para além da zona costeira. Essa abordagem é crucial para compreender de que maneira a extração de água subterrânea influencia a interface de transição entre água doce e água salgada.

Em toda a área de ocorrência do SAPP é possível observar a presença de componentes de fluxo local e regional, que desempenham um papel relevante no controle das direções do escoamento subterrâneo. É importante ressaltar que o sistema de fluxo local ocorre nas porções superficiais do terreno, formadas por aquíferos livres, onde as áreas de recarga e descarga estão próximas entre si; já o sistema de fluxo regional ocorre nas porções mais profundas dos aquíferos, cujas áreas de recarga se encontram distantes das áreas de descarga.

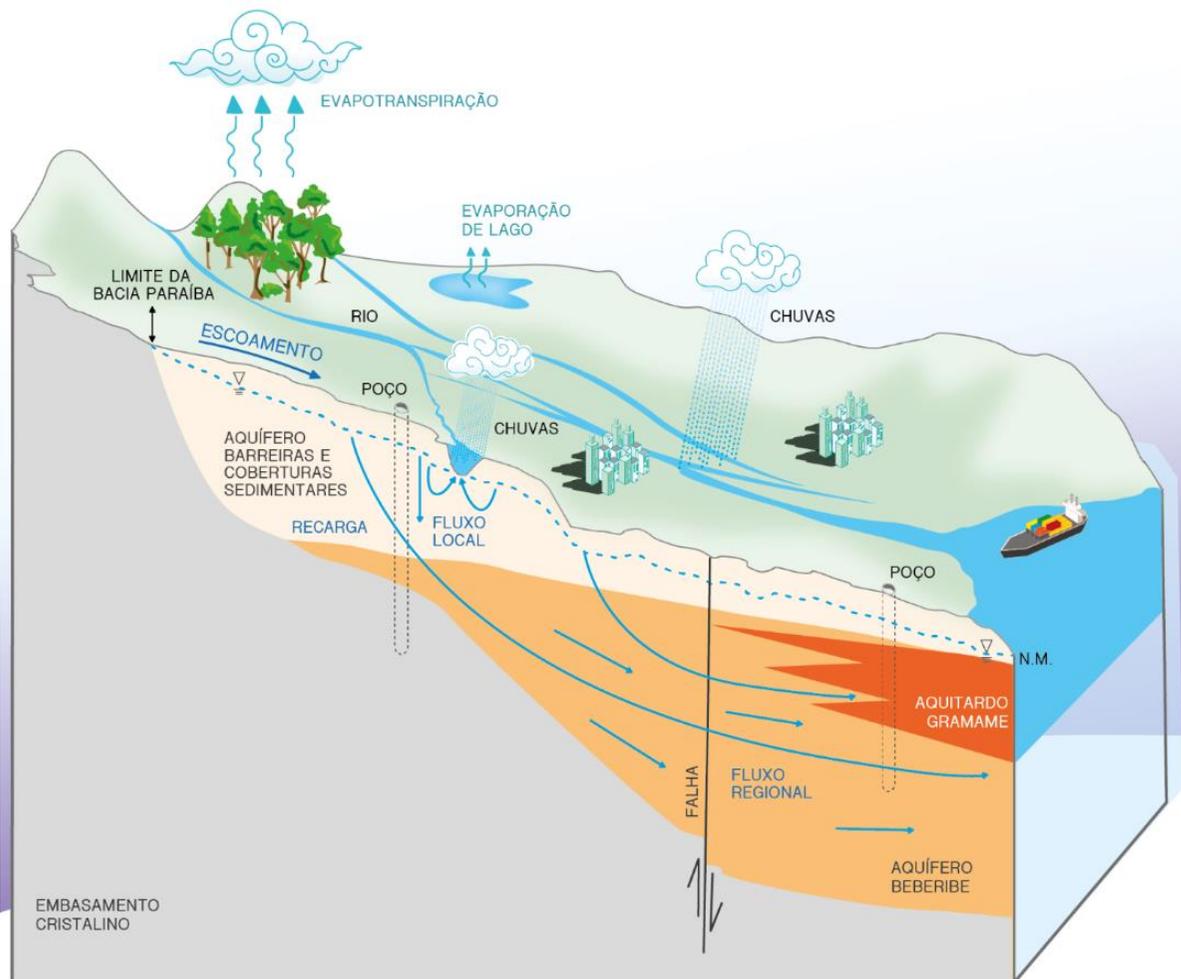


Figura 7.1 – Modelo conceitual de fluxo subterrâneo do SAPP em área do Aquitardo Gramame

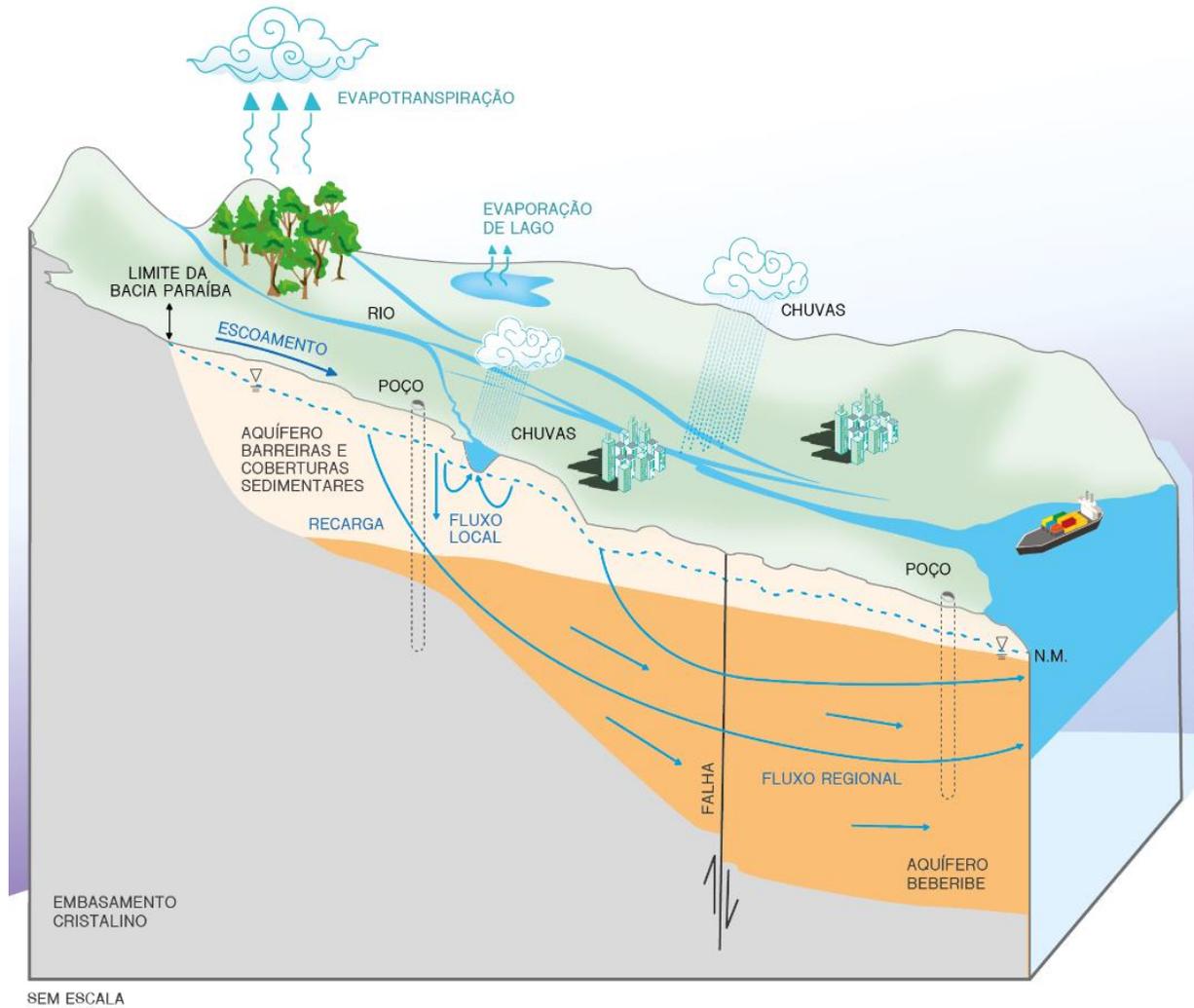


Figura 7.2 – Modelo conceitual de fluxo subterrâneo do SAPP em área de não ocorrência do Aquitardo Gramame.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

A recarga direta pelas precipitações atmosféricas, cujas médias anuais históricas variam entre a mínima de 674 mm até a máxima de 1.892 mm, é a principal entrada de água no SAPP, por meio da infiltração nas camadas superiores dos aquíferos Barreiras e Coberturas Sedimentares, que juntos cobrem mais de 95% de toda a área do SAPP. O Aquífero Beberibe aflora em área restrita na porção sul do SAPP, onde também recebe recarga direta pelas precipitações. O Aquitardo Gramame, por sua vez, forma uma barreira hidráulica que impede ou dificulta a percolação de água para o aquífero confinado.

A recarga potencial direta foi estimada preliminarmente em 13% da precipitação ou 0,78 km³/ano, com base em estudos realizados previamente. Essa recarga se processa sazonalmente, na dependência da quantidade e frequência das chuvas, que normalmente são mais efetivas nos períodos de março e agosto. A recarga direta é potencialmente maior nas regiões próximas à costa, onde a pluviosidade é mais elevada, contudo, sua distribuição é dependente de fatores intrínsecos como coeficiente de infiltração do solo, profundidade do nível de água, declividade dos terrenos, grau de umidade e uso do solo, dentre outros.

A maior parte das águas de recarga infiltradas nas porções superiores dos aquíferos livres alcançam o nível freático e são continuamente descarregadas para as porções topograficamente mais deprimidas dos terrenos, normalmente situadas junto aos talwegues dos rios. As vazões descarregadas pelos aquíferos correspondem às reservas ativas e representam a parcela maior da recarga direta, renovada anualmente. Nessa condição, a circulação hídrica no aquífero é realizada com tempos de trânsito subterrâneo pequenos, da ordem de horas a anos, e é representada pelos fluxos locais na Figura 7.1 e Figura 7.2.

Sob a influência da recarga, as elevações crescentes na superfície livre dos aquíferos geram gradientes hidráulicos cada vez mais pronunciados, intensificando a descarga subterrânea. À medida que as águas subterrâneas são liberadas, o gradiente hidráulico gradualmente se atenua, resultando em uma redução contínua do escoamento na direção dos rios. Essa diminuição do fluxo natural é especialmente evidente durante o período de estiagem, quando os gradientes hidráulicos atingem níveis mais baixos. Esse fenômeno reflete a interação dinâmica entre a recarga, a descarga subterrânea e as variações sazonais nos gradientes hidráulicos ao longo do tempo.

Uma parcela consideravelmente menor da recarga direta alcança as camadas mais profundas dos aquíferos e é descarregada em áreas mais afastadas das zonas de entrada. As linhas de fluxo que atingem as regiões mais profundas dos aquíferos são componentes do escoamento

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

subterrâneo denominado fluxo regional. O fluxo regional é responsável por orientar o movimento da água subterrânea em uma escala mais abrangente na Bacia Sedimentar Costeira Pernambuco-Paraíba. Essas linhas de fluxo se estendem desde a interface com o embasamento cristalino, a oeste, até a zona costeira, a leste, onde as águas são finalmente descarregadas no oceano (Figura 7.1 e Figura 7.2).

Na região costeira, onde o Aquitardo Gramame está presente (Figura 7.1), ocorre uma situação peculiar, na qual observa-se o fenômeno de compressão do fluxo subterrâneo regional abaixo dessa unidade carbonática, resultando na formação do subsistema confinado do Aquífero Beberibe.

A recarga do subsistema confinado Beberibe é realizada através da circulação lateral na zona de transição com a porção livre desse subsistema. As águas de recarga que alcançam esse subsistema são originadas pela infiltração profunda através dos aquíferos superficiais. As águas do subsistema confinado escoam naturalmente em direção ao Oceano Atlântico e as linhas de fluxo tendem mostrar comportamento ascendente na interface entre águas doces continentais e águas marinhas salgadas. Inversões locais de fluxo, provocadas pelo rebaixamento regional da superfície potenciométrica devido ao bombeamento de poços, são comuns e podem contribuir para o avanço da cunha salina continente adentro.

8 INTERFERÊNCIAS ANTRÓPICAS POR EXTRAÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

A avaliação da intensidade de exploração é o principal indicador de consumo das águas subterrâneas, uma vez que possibilita a identificação de áreas onde a extração de água é ou pode se tornar crítica. Esse método oferece um diagnóstico efetivo da quantidade de água retirada dos aquíferos, utilizando dados oficiais de vazões outorgadas fornecidos pelos gestores locais. Além disso, ele desempenha um papel fundamental na elaboração do balanço hídrico, seja por bacia hidrográfica, município ou aquífero.

De acordo com Paula e Silva et al. (2021), a aplicação desse método está condicionada ao conhecimento preciso da localização e da vazão extraída pelos poços em operação. Isso destaca a importância do comprometimento dos órgãos gestores de recursos hídricos, que devem empenhar-se no cadastramento das captações subterrâneas e na atualização contínua do banco de dados de captações.

Apesar de a densidade de poços ser um indicador relevante na avaliação do estresse hídrico, o impacto predominante nos aquíferos resulta da quantidade de água extraída (vazão) pelo

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

bombeamento desses poços. Portanto, áreas com uma elevada concentração de poços que extraem volumes consideráveis de água têm o potencial de causar impactos significativos nos aquíferos, tornando-se prioritárias para a instalação de sistemas de monitoramento. Esses sistemas visam controlar as retiradas de água e garantir a qualidade das águas subterrâneas.

Usualmente, a avaliação do estresse hídrico subterrâneo nos estudos hidrogeológicos e planos de bacias utiliza como unidade de gestão as bacias ou sub-bacias hidrográficas, cujas dimensões superficiais afetam diretamente o cálculo das disponibilidades. Nesse sentido, bacias com grandes dimensões normalmente resultam numa avaliação de estresse hídrico modesto, mesmo tendo uma extração significativa de água dos aquíferos; por outro lado, bacias de pequenas dimensões normalmente são classificadas como de elevado estresse hídrico, mesmo com pequena extração de água. Esse método de avaliação não distingue as porções ou regiões dos aquíferos efetivamente estressadas (Paula e Silva et al., 2021).

Ao contrário, a análise da intensidade aqui empregada utiliza ferramentas de geoprocessamento aplicadas a dados de poços, considerando tanto o número absoluto de captações como as vazões individuais extraídas. Esse método simples de geoprocessamento no tratamento de indicadores de consumo, como aqui mostrado, permite identificar e avaliar adequadamente o nível de estresse hídrico dos aquíferos ou porções deles, proporcionando melhores resultados quando comparado com os métodos usualmente aplicados, que não distinguem as áreas críticas.

A análise da intensidade de exploração do SAPP utilizou a ferramenta de geoprocessamento “*Kernel Density*”, do programa *ArcGIS* e considerou a vazão anual extraída de 2.688 captações outorgadas pela AESA. Essas informações foram fornecidas pela referida empresa e integram o relatório da etapa de diagnóstico deste projeto. A ferramenta “*Kernel Density*” calcula a magnitude por unidade de área para cada célula do raster usando a função Kernel e com base em uma vizinhança ao redor, exprimindo o resultado em termos de densidade de vazão anual por unidade de área.

Inicialmente, essa análise foi aplicada a todos os poços outorgados pela AESA e registrados no banco de dados de outorga. A escolha desse procedimento se justifica pelo fato de que os recursos hídricos presentes nos subsistemas do SAPP não estão dissociados; em outras palavras, constituem um reservatório subterrâneo único e extenso, abrangendo inclusive a porção correspondente ao subsistema confinado.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK <small>IBRD • IDA</small>
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

A análise realizada com todos os poços outorgados é mostrada no mapa de intensidade de uso da Figura 8.1, cujos valores resultantes do geoprocessamento foram distribuídos em 11 classes de vazão anual. Esse mapa identifica as áreas de maior concentração de retirada de água subterrânea do SAPP, notadamente na região de João Pessoa, onde é extraído mais de 50% da vazão outorgada. Por outro lado, mostra que os recursos hídricos subterrâneos não são ainda explorados em 31% da área, com destaque para a região norte do SAPP. Como maiores consumidores de água subterrânea podem ainda ser citados os municípios de Santa Rita, Lucena e Conde, com respectivamente 13,4%, 9,3% e 8,8% do total de recursos hídricos outorgados.

A planilha contendo dados de outorga, fornecida pela AESA, não identifica o aquífero explorado e não traz informações sobre a profundidade dos poços. A falta desses dados impede uma análise com objetivo de distinção entre os subsistemas livre e confinado, razão pela qual, não foram elaborados mapas de intensidade de exploração separadamente para cada subsistema.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

9 CONCLUSÕES

O relatório R3 abordou a dinâmica da circulação da água subterrânea no Sistema Aquífero Pernambuco-Paraíba (SAPP) e analisou os fatores que influenciam esse processo, os quais fundamentaram o modelo conceitual de fluxo.

O SAPP compreende um sistema aquífero distribuído em área total de 4.356 km² do Estado da Paraíba, sendo composto por um subsistema livre e um subsistema confinado. O subsistema livre engloba os aquíferos Coberturas Sedimentares, Barreiras e Beberibe. O subsistema confinado ocorre em área reduzida de 726 km², junto à zona costeira, aproximadamente delimitado pelas falhas de Cabedelo e Mata Redonda, onde o Aquífero Beberibe está subjacente ao Aquitardo Gramame. No entanto, uma delimitação precisa desse aquífero e, conseqüentemente, da área do subsistema confinado, ainda carece de investigações mais pormenorizadas.

Os contornos do SAPP são representados pelo contato irregular entre o embasamento cristalino, à oeste; a sul e a norte, respectivamente pelos divisores de água das bacias hidrográficas do rio Guaju, trecho incidente no estado do Rio Grande do Norte e do rio Abiaí, trecho este incidente no estado de Pernambuco; à leste, pela zona costeira junto ao Oceano Atlântico. A porção superior é definida pela superfície potenciométrica do subsistema livre. A base do aquífero é representada pela superfície irregular e falhada do embasamento cristalino.

O SAPP é recarregado em toda sua área de exposição por infiltração direta de águas pluviais, com exceção daquela onde aflora o Aquitardo Gramame. Os meses chuvosos, de março a agosto, são potencialmente melhores para a recarga direta do SAPP, contudo, fatores geológicos e topográficos e de uso do solo controlam a taxa de infiltração. Considerações a respeito da favorabilidade do solo à recarga são detalhadamente discutidos para cada uma das bacias hidrográficas da área de estudo. Os meses de estiagem representam o período de depleção natural do aquífero.

Estimativas preliminares apontam que a recarga total do SAPP corresponde a 13% da precipitação média interanual na área (1.372 mm), equivalente a 0,78 km³/ano. A maior parte dessa vazão é direcionada para a rede de drenagem das bacias hidrográficas, manifestando-se como escoamento de base nos cursos de água superficiais. Uma fração menor da recarga total, conhecida como recarga profunda, alimenta os reservatórios mais profundos, incluindo

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

o subsistema confinado, e contribui para o fluxo subterrâneo regional. Embora não tenha sido previamente quantificada em estudos anteriores, a recarga profunda é estimada aqui em apenas 5% da recarga total, indicando sua pouca expressividade em termos quantitativos.

A potenciometria do subsistema livre mostra que os fluxos subterrâneos locais se dirigem dos pontos mais elevados para os pontos mais deprimidos do terreno, coincidentes com os talwegues dos cursos de água superficiais. O movimento da água subterrânea no subsistema livre mostra forte conexão com as águas superficiais e é influenciado diretamente pelas precipitações atmosféricas, que são responsáveis pelas oscilações da carga hidráulica e mudanças no gradiente de fluxo. Na escala de bacias hidrográficas, os fluxos locais originados nos aquíferos livres são controlados pelos grandes divisores hidrogeológicos, que restringem o movimento da água subterrânea aos domínios específicos da bacia hidrográfica, impedindo a transferência de águas subterrâneas de uma bacia para outra. Uma breve discussão e análise da potenciometria é apresentada para cada uma das bacias hidrográficas.

A potenciometria do aquífero confinado é governada pelos sistemas de fluxo regionais. Os fluxos regionais são pouco afetados por variações sazonais de recarga e a descarga se processa em bacias hidrográficas distantes. Regiões com cargas negativas e positivas e múltiplas direções de fluxo subterrâneo foram identificadas no subsistema confinado, influenciadas pelas interferências causadas pela extração de água subterrânea por poços. Na zona costeira, a retirada descontrolada de água subterrânea pode resultar, ainda, no deslocamento de água salgada do mar para o interior do aquífero e contaminando do aquífero.

Uma análise das oscilações nos níveis de água subterrânea, registradas em poços de monitoramento, revelou que tanto as hidrógrafas do subsistema livre quanto as do subsistema confinado exibem flutuações sazonais de recarga e descarga associadas aos períodos de maior e menor pluviosidade. Embora as oscilações sazonais sejam comuns nos aquíferos livres, sua manifestação semelhante nos aquíferos confinados é menos provável, considerando a baixa permeabilidade esperada da camada confinante. Uma possível explicação para esse fenômeno reside na descontinuidade lateral da camada confinante, um aspecto que ainda necessita de investigação mais aprofundada.

O modelo conceitual de fluxo ilustra o comportamento do escoamento subterrâneo nas áreas livres e confinadas, a partir da integração das informações e análises desenvolvidas ao longo deste relatório. Em toda o SAPP é possível observar a presença de componentes de fluxo local e regional, que desempenham um papel relevante no controle das direções do

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK <small>IBRD • IDA</small>
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto03_REV03	

escoamento subterrâneo, conforme relatado nos parágrafos anteriores. O modelo destaca o fenômeno de compressão do fluxo subterrâneo regional abaixo do Aquitardo Gramame, na formação do subsistema confinado do Aquífero Beberibe, e a recarga por meio da circulação lateral na zona de transição com o subsistema livre. Além disso, ressalta que as inversões locais de fluxo provocadas pelo bombeamento de poços podem contribuir para o avanço da cunha salina continente adentro.

Finalmente, o mapa de avaliação da intensidade de exploração, resultante de interferências antrópicas, identifica as áreas do SAPP com maior concentração de retirada de água subterrânea, definidas como áreas críticas e recomendadas para monitoramento, como por exemplo a região de João Pessoa, onde mais de 50% da vazão outorgada de todo o Estado de Paraíba é extraída.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

10 REFERÊNCIAS

AESA - AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DAS ÁGUAS DO ESTADO DA PARAÍBA. 2022. Atualização do plano estadual de recursos hídricos da Paraíba. Disponível em <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/plano-estadual/atualizacao-perh/>.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. 2013. Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasil. ANA. 432 p.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2017. Estudos hidrogeológicos e de vulnerabilidade do Sistema Aquífero Urucua e proposição de modelo de gestão integrada compartilhada. Elaboração e Execução: Consórcio Engecorps - Walm. – Brasília. 173p. il.

ANA - Agência Nacional de Águas. 2018. Estudos Hidrogeológicos para a Gestão das Águas Subterrâneas da Região de Belém/PA. Elaboração e Execução: Profill Engenharia e Ambiente S.A – Brasília. 128 p. il.

ANA - Agência Nacional de Águas. Base Hidrográfica Ottocodificada. Brasília: ANA, 2017.

BARBOSA, J.A.; NEUMAN, V.H.; LIMA FILHO, M.; SOUZA, E.M. de; MORAES, M.A. de. Estratigrafia da faixa costeira Recife-Natal (Bacia da Paraíba e Plataforma de Natal), NE Brasil. Estudos geológicos, v. 17, n. 2, p. 3-30, 2007.

BATISTA, M.L.C.; REGO, J.C.; RIBEIRO, M.M.R. & ALBUQUERQUE, J.P.T. 2010. Modelagem do Fluxo Subterrâneo na Bacia Sedimentar Costeira do Baixo Curso do Rio Paraíba como Subsídio à Gestão de Recursos Hídricos. RBRH — Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 16 n.3 - Jul/Set 2011, 163-175.

BRAGA, A. C. R. 2014. Avaliação da potencialidade hídrica subterrânea e proposta para metodologia de outorga em uma região da bacia sedimentar costeira do baixo curso do rio Paraíba. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 2014.

BRAMAR. 2018. Mitigação da escassez de água no nordeste do Brasil. Anna Abels, Marcos Airton Sousa Freitas, Johannes Pinnekamp and Bernd Rusteberg. ISBN:978-3-00-059927-9.

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

CARNIER NETO, Dagmar. 2006. Análise das séries temporais de monitoramento de nível d'água em poços no aquífero Rio Claro. 2006. vii, 61 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas.

COSTA, W. D.; DE ALBUQUERQUE, J. DO P. T.; BRANCO, R. L. DE C.; MARANHÃO, C. M. L.; GOLDFABER, M. 2007. Estudo de caracterização e verificação da disponibilidade hídrica da vertente litorânea do Estado da Paraíba. Estudos Hidrogeológicos, Relatório Final, 125p.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo: Brasília: CPRM, 2004. Escala 1: 1.000.000. Programa Geologia do Brasil.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. 2019. Mapa Hidrogeológico do estado da Paraíba. Escala 1:500.000. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Ministério de Minas e Energia. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Volume 18 (4), 197-2012.

DRISCOLL, F.G. 1986. Groundwater and Wells, 2nd Edition.

EBERTS, S.M. & GEORGE, L.L. 2000. Regional Ground-Water Flow and Geochemistry in the Midwestern Basins and Arches Aquifer system in Parts of Indiana, Ohio, Michigan, and Illinois. U.S. Geological Survey Professional Paper 1423-C.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Súmula da 10. Reunião Técnica de Levantamento de Solos. Rio de Janeiro, 1979. 83p. (EMBRAPA-SNLCS. Micelânea, 1).

FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. 1979, Groundwater: Prentice-Hall, Inc., ISBN 0-13-365312-9, 604 p.

FURRIER, M.; ARAÚJO, M. E. DE; MENESES, L. F. de. 2006. Geomorfologia e tectônica da formação Barreiras no Estado da Paraíba. Geologia USP. Série Científica, 6(2), 61-70.

G.B. ALLISON, P.G. COOK, S.R. BARNETT, G.R. WALKER, I.D. JOLLY, M.W. Hughes, Land clearance and river salinisation in the western Murray Basin, Australia, Journal of Hydrology, Volume 119, Issues 1–4.1990.

	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Pr oduto03_REV03	

GOMES, L. H. 2008. Determinação da recarga profunda na bacia-piloto do Ribeirão da Onça em zona de afloramento do Sistema Aquífero Guarani a partir de balanço hídrico em zona saturada. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

HEALY, R.W. (2010) Estimating Groundwater Recharge. Cambridge University Press, Cambridge.

LIMA, E. A., NASCIMENTO, D. A., DOURADO, T. D. C., BRANDÃO, L. C. R. 2004. Mapeamento hidrogeológico da folha Sb.25-Y-C João Pessoa – Paraíba. XIII. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. Cuiabá – MT.

PAULA E SILVA, F.; FISCHER, T. V.; EZAKI, S.; GASTMANS, D.; RODRIGUES, V. R.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L.; FRANZINI, A.S.& NOALE, J. O. 2021. Avaliação do estresse hídrico subterrâneo das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ). Derbyana, São Paulo, 42: e754, 2021.

PONCE, V.M. 2007. Sustainable Yield of Ground Water. Disponível em: <http://ponce.sdsu.edu>.

ROSE, S. 2009. Groundwater Recharge and Discharge. Groundwater – Vol. III. ©Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).

SCANLON, B.R., REEDY, R.C., STONESTROM, D.A., PRUDIC, D.E. AND DENNEHY, K.F.. Impact of land use and land cover change on groundwater recharge and quality in the southwestern US. Global Change Biology, 11: 1577-1593. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.01026.x>. 2005.

SHABAN, Amin; KHAWLIE, Mohamad; ABDALLAH, Chadi. Use of remote sensing and GIS to determine recharge potential zones: The case of Occidental Lebanon. Hydrogeology Journal, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 433–443, 2006.

WOESSNER, W.W. 2020. Groundwater-Surface Water Exchange / William W. Woessner - Guelph, Ontario, Canada. 158 pag.

YEH, Hsin Fu et al. GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. Environmental Geology, [s. l.], v. 58, n. 1, p. 185–195, 2009.

 GOVERNO DA PARAÍBA 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 THE WORLD BANK IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_Produto03_REV03	

YEH, Hsin Fu et al. Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. Sustainable Environment Research, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 33–43, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>>

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 IBRD - IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

11 ANEXOS

11.1 ANEXO I - DADOS DE NÍVEL ESTÁTICO (NE) DE POÇOS LEVANTADOS POR COSTA ET AL. (2007).

Numero	Localidade	Município	utm-E	utm-N	Cota	NE (m)	Cota NE (m)
39,00	Sede	Alhandra	288939,00	9177184,00	23,00	4,20	18,80
41,00	Sede	Alhandra	289264,00	9177853,00	19,00	2,00	17,00
58,00	Tapuio	Alhandra	290009,00	9177973,00	66,00	58,00	8,00
89,00	Alto da Boa Vista	Bayeux	285615,00	9210707,00	55,00	79,15	-24,15
101,00	Sede Municipal	Bayeux	287824,00	9212216,00	10,00	13,50	-3,50
136,00	Termas	Bayeux	287975,00	9208471,00	51,00	87,19	-36,19
183,00	Av. Cleto Campello, 1.002 - Camalaú	Cabedelo	297582,00	9229018,00	2,00	1,27	0,73
184,00	Praia de Camboinha (R. João Vitaliano)	Cabedelo	298027,00	9225179,00	2,00	1,80	0,20
188,00	Conj. Residencial Príncipes de Micenas	Cabedelo	296022,00	9220606,00	4,00	13,20	-9,20
191,00	Granja Azul	Cabedelo	295589,00	9219854,00	7,00	5,50	1,50
208,00	Praia do Poço	Cabedelo	286368,00	9223566,00	2,00	5,27	-3,27
256,00	Conjunto dos Motoristas	Conde	299469,00	9192698,00	59,00	7,00	52,00
275,00	Grupo Escolar de Guruji	Conde	296033,00	9196328,00	74,00	59,00	15,00
344,00	Centro Cidade	Cruz do Espírito Santo	269206,00	9210248,00	25,00	4,00	21,00
354,00	Engenho São Paulo	Cruz do Espírito Santo	268546,00	9213748,00	28,00	2,00	26,00
356,00	Engenho São Paulo	Cruz do Espírito Santo	268362,00	9213747,00	24,00	1,10	22,90
398,00	Mercado Público	Cruz do Espírito Santo	268900,00	9210062,00	18,00	4,15	13,85
403,00	Santana	Cruz do Espírito Santo	264199,00	9204479,00	97,00	12,00	85,00
436,00	Sede do Município	Cruz do Espírito Santo	268808,00	9210123,00	17,00	3,50	13,50
547,00	Condomínio Residencial Coliseum	João Pessoa	296721,00	9214667,00	11,00	14,20	-3,20
549,00	Condomínio Residencial Gênova	João Pessoa	297029,00	9214305,00	9,00	17,63	-8,63
550,00	Condomínio Residencial Hannover	João Pessoa	297009,00	9214751,00	7,00	17,40	-10,40

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Numero	Localidade	Município	utm-E	utm-N	Cota	NE (m)	Cota NE (m)
551,00	Condomínio Residencial Imperial Palace	João Pessoa	297226,00	9214896,00	5,00	13,70	-8,70
552,00	Condomínio Residencial Maranhá	João Pessoa	296847,00	9216022,00	5,00	10,70	-5,70
553,00	Condomínio Resid . Príncipe de Castela	João Pessoa	297953,00	9213513,00	2,00	19,50	-17,50
554,00	Condomínio Residencial Panorâmico	João Pessoa	297697,00	9212133,00	5,00	23,70	-18,70
555,00	Condomínio Residencial Portoviejo	João Pessoa	297443,00	9213610,00	5,00	17,00	-12,00
557,00	Condomínio Residencial Valparaíso	João Pessoa	296023,00	9216547,00	6,00	27,50	-21,50
559,00	Conjunto dos Bancários	João Pessoa	297236,00	9209406,00	40,00	49,97	-9,97
564,00	Conjunto José Américo	João Pessoa	294689,00	9207654,00	46,00	49,68	-3,68
716,00	Instituto dos Cegos	João Pessoa	294484,00	9212999,00	45,00	25,38	19,62
723,00	Mangabeira I	João Pessoa	296687,00	9206832,00	41,00	46,80	-5,80
724,00	Mangabeira II	João Pessoa	296477,00	9205753,00	42,00	45,35	-3,35
729,00	Mangabeira VII	João Pessoa	297699,00	9207091,00	36,00	50,44	-14,44
731,00	Marés	João Pessoa	289229,00	9208750,00	21,00	47,20	-26,20
732,00	Marmitaria Dona Rosana	João Pessoa	295317,00	9208725,00	41,00	23,90	17,10
754,00	Pavilhão do Chá	João Pessoa	291749,00	9212333,00	50,00	53,75	-3,75
789,00	Tambaú (Av. Rui Carneiro1	João Pessoa	297232,00	9214908,00	31,00	49,84	-18,84
792,00	Terminal Rodoviário	João Pessoa	291078,00	9212739,00	8,00	1,39	6,61
796,00	Torre	João Pessoa	294363,00	9212476,00	45,00	58,40	-13,40
802,00	Valentina I	João Pessoa	296790,00	9204221,00	32,00	37,70	-5,70
804,00	Valentina II	João Pessoa	296393,00	9203728,00	36,00	45,80	-9,80
807,00	Assentamento Oiteiro de Miranda	Lucena	289387,00	9235514,00	85,00	42,50	42,50
808,00	Baleia Magik Park	Lucena	294726,00	9229160,00	4,00	0,20	3,80
815,00	Costinha	Lucena	295001,00	9229518,00	5,00	1,80	3,20
818,00	Estivas do Geraldo	Lucena	280375,00	9235585,00	22,00	6,65	15,35
823,00	Guia	Lucena	292356,00	9230746,00	12,00	1,50	10,50
831,00	Marcos João	Lucena	291299,00	9234938,00	8,00	1,70	6,30
840,00	Sede CAGEPA R. João de S. Sobrinho	Lucena	293036,00	9237357,00	5,00	1,80	3,20
844,00	Sede CAGEPA R. Mário Falcão, 500	Lucena	293129,00	9237142,00	6,00	7,50	-1,50
848,00	St. Vieira	Lucena	291832,00	9233748,00	20,00	1,55	18,45

 	Tipo de Documento: Documento de trabalho	 IBRD • IDA
	Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03	

Numero	Localidade	Município	utm-E	utm-N	Cota	NE (m)	Cota NE (m)
858,00	Cajazeiras	Mamanguape	263030,00	9273644,00	58,00	32,00	26,00
892,00	Fazenda Pindobal II	Mamanguape	267717,00	9241246,00	29,00	1,00	28,00
857,00	Brejinho	Mamanguape	256078,00	9260784,00	64,00	0,30	63,70
891,00	Fazenda Pindobal (Tabuleiro)	Mamanguape	268092,00	9241192,00	57,00	8,40	48,60
918,00	Brejinho	Marcação	284637,00	9256742,00	18,00	8,00	10,00
922,00	Caieira	Marcação	283964,00	9256094,00	34,00	24,00	10,00
924,00	Conjunto Mari	Marcação	277223,00	9251949,00	96,00	40,50	55,50
928,00	Grapiúna de Cima	Marcação	271242,00	9257240,00	49,00	6,00	43,00
1010,00	Nova Aurora	Pedras de Fogo	264511,00	9182029,00	161,00	12,00	149,00
1025,00	Santa Terezinha	Pedras de Fogo	261826,00	9196893,00	85,00	50,00	35,00
1041,00	Loteamento Marisco	Pitimbu	299871,00	9170868,00	3,00	15,00	-12,00
1051,00	Sítio Navalho	Pitimbu	297799,00	9168349,00	13,00	18,00	-5,00
1058,00	Barra de Mamanguape	Rio Tinto	287608,00	9249674,00	3,00	2,00	1,00
1063,00	Cajarana	Rio Tinto	269163,00	9263579,00	113,00	60,00	53,00
1071,00	Fazenda do Dr. Júlio	Rio Tinto	271374,00	9245668,00	3,00	1,00	2,00
1081,00	Jaraguá - Poço IV	Rio Tinto	272473,00	9247922,00	11,00	7,00	4,00
1096,00	Postinha Rio tinto	Rio Tinto	269077,00	9246451,00	9,00	6,00	3,00
1101,00	Praia de Campina	Rio Tinto	288443,00	9246452,00	2,00	8,00	-6,00
1131,00	Sítio Boa Vista	Rio Tinto	271119,00	9242920,00	33,00	10,50	22,50
1139,00	Taberaba	Rio Tinto	273699,00	9244200,00	11,00	0,80	10,20
1177,00	BR-230, Km 43,6 (DNIT)	Santa Rita	278300,00	9208814,00	76,00	41,00	35,00
1292,00	Tibiri II-Rua Campina Grande	Santa Rita	282564,00	9211370,00	66,00	74,00	-8,00
1300,00	Tibiri I	Santa Rita	281266,00	9210578,00	71,00	12,00	59,00
1336,00	Cobe	Sapé	264052,00	9209763,00	22,00	6,40	15,60
1352,00	IntraFruit Sapé	Sapé	252782,00	9215881,00	123,00	10,00	113,00
1379,00	Santa Helena I	Sapé	260530,00	9212617,00	101,00	9,15	91,85
1345,00	Fazenda Santa Luzia	Sapé	253302,00	9212457,00	83,00	0,80	82,20
1380,00	Santa Helena	Sapé	264309,00	9217899,00	100,00	19,00	81,00
1381,00	Santa Helena II	Sapé	262623,00	9214222,00	53,00	2,00	51,00

11.1 ANEXO II – ANEXO DIGITAL – MAPA POTENCIOMÉTRICO EM ESCALA A0

 <p>GOVERNO DA PARAÍBA</p>  <p>AESA</p>	<p>Tipo de Documento: Documento de trabalho</p> <p>Cód. do Documento: SEIRHMA_PARAIBA_EHIDG_IgneoProfill_ Produto03_REV03</p>	 <p>THE WORLD BANK IBRD • IDA</p>
--	---	--

APÊNDICE