

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA**

PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA OUTORGA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS. ESTUDO DE CASO: POLO INDUSTRIAL DE CAMAÇARI

Rosialine Marques Roedel

Salvador
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
ESCOLA POLITÉCNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL URBANA

PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA OUTORGA DE ÁGUAS
SUBTERRÂNEAS. ESTUDO DE CASO: POLO INDUSTRIAL DE CAMAÇARI

Rosialine Marques Roedel

Dissertação apresentado ao
mestrado em Engenharia Ambiental Urbana
como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL
URBANA

Orientador: Prof^a. Dr^a. Iara Brandão de Oliveira

Salvador

2017

R712p ROEDEL, Rosialine Marques
Proposição de critérios técnicos para outorga de águas
subterrâneas. Estudo de caso: polo industrial de Camaçari / ROSIALINE
MARQUES ROEDEL Roedel. – Salvador, 2017.
121 f. : il

Orientadora: Iara de Oliveira Brandão. Dissertação (Mestrado –
Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) – Universidade federal da
Bahia, Escola Politécnica, 2017.

1. água subterrânea. 2. Outorga. 3. Hidrogeologia. 4. Zoneamento
hídrico. 5. polo industrial de camaçari. I. de Oliveira Brandão,
Iara de Oliveira Brandão. II. Título.

CDU 556.18

DEDICATÓRIA

À minha mãe, que me ama incondicionalmente, pela oportunidade de conhecimento.

Engenheiro Sanitarista e Ambiental, formado pela Universidade Federal da Bahia, UFBA (2006).

“No final, nossa sociedade será definida, não pelo que criamos, mas pelo que nos recusamos a destruir.”

John C. Sawhill

ROSIALINE MARQUES ROEDEL

“PROPOSIÇÃO DE CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA
OUTORGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. ESTUDO DE
CASO: POLO IINDUSTRIAL DE CAMAÇARI.”

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental Urbana.

Salvador, 27 de julho de 2017

Banca Examinadora:

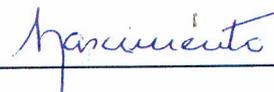
Profª Drª Iara Brandão de Oliveira
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº Drº Sandro Lemos Machado
Universidade Federal da Bahia – UFBA



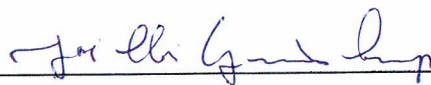
Profº Drº Sérgio Augusto de Moraes Nascimento
Universidade Federal da Bahia – UFBA



Profº Drº Luis Rogério Bastos Leal
Universidade do Texas - UT



Profº Drº José Eloi Guimarães Campos
Universidade Federal De Brasília- UnB



AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a minha mãe que me ama incondicionalmente e me apoia em tudo que faço e planejo, sem julgamentos, sempre me desejando o melhor.

Agradeço às minhas amigas-irmãs Luciana e Taty que pacientemente discutiram comigo o conteúdo do trabalho durante as várias etapas do meu processo, mesmo muitas vezes não entendendo muito do assunto.

Aos meus irmãos Thiana e Junior que mesmo distantes, sei que desejam o melhor para mim. Ao meu pai, também distante, mas com o melhor dos pensamentos em mim.

A minha coordenadora Iara, pessoa mais adorável que já conheci, que simplesmente nasceu para ser educadora, daquelas pessoas especiais que a humanidade deve sempre ter.

À CETREL pela liberação para realização desse trabalho, pelo apoio e dados fornecidos. Em especial à Eduardo e Jordon por todo apoio e suporte ao longo desse processo.

Aos meus colegas de trabalho, Cassia, Alice, Gedison, Marcão, Antônio Jorge, pelo suporte técnico e discussão sobre o conteúdo do trabalho, imprescindível para o desenvolvimento e conclusão do mesmo.

Ao meu colega de trabalho Cleber pelo suporte e apoio em algumas figuras apresentadas no trabalho. À Elvira pela ajuda na revisão bibliográfica.

A minha estagiária Raysa que me auxiliou na pesquisa e preparação dos dados brutos do banco de dados dos poços de produção e estava sempre disposta a ajudar.

A todos que compartilham a minha vida e que me apoiam e incentivam com palavras e gestos, mesmo que não tenham seus nomes citados, não reduzindo o seu inestimável valor.

A todos, minha eterna gratidão.

RESUMO

Este trabalho propôs critérios técnicos para determinação de vazões outorgáveis para águas subterrâneas na região do entorno do Complexo Industrial de Camaçari, dentro do sistema de aquífero Marizal/São Sebastião. Os critérios propostos foram: potencialidade hídrica total e efetiva; favorabilidade quanto à exploração; avaliação qualitativa dos parâmetros hidráulicos; vazão de base de drenagem superficial, vazão do poço obtida em ensaio de bombeamento; qualidade hidroquímica do poço. Para utilização desses critérios foram desenvolvidas / aprimoradas algumas ferramentas de análise: novo zoneamento hídrico, cálculo de reservas e potencialidades e classificação das zonas hídricas quanto ao grau de favorabilidade à exploração. A metodologia proposta para avaliação do processo de outorga integra os critérios técnicos às ferramentas de análise para liberação dos processos de outorga de águas subterrâneas na região do Complexo Industrial e entorno. No processo metodológico para avaliação das outorgas foi incorporado a ferramenta do modelo numérico de fluxo existente para a região, MNFR, validando o uso do modelo em relação aos prognósticos de novos poços de produção. Para isso, no estudo de caso, foi feita a simulação de ensaios de bombeamento em regime transiente, calibrados com dados reais de nível medidos em poços de observação, dando resultados satisfatórios, desde que respeitadas as condições da hidrogeologia local. Para avaliação da metodologia proposta, foi analisado um processo de outorga liberado para a região (bateria de 11 poços), buscando identificar os fatores que poderiam melhorar a gestão dos recursos hídricos na região. Verificou-se que o processo de gestão atual não prevê o uso sustentável dos recursos hídricos subterrâneos para cada zona hídrica. Além disso, para o estudo de caso avaliado pela nova metodologia, a outorga seria parcialmente negada, uma vez que demanda dos poços é superior a potencialidade hídrica calculada para a zona hídrica em que os poços estão inseridos.

Palavras chaves: outorga, água subterrânea, hidrogeologia, zoneamento hídrico

ABSTRACT

This research proposes technical criteria for determination of groundwater permits in the Camaçari Industrial Complex region, within the Marizal / São Sebastião aquifer system. The proposed criteria include: total and effective water potential; exploitation favorability; qualitative evaluation of hydraulic parameters; surface drainage base flow, well discharge obtained in the pumping test; groundwater hydrochemical quality. To use these criteria, some analysis tools were developed / improved: new water zoning, calculation of water reserves and potentials, and classification of water zones in terms of the degree of exploitation favorability. The proposed methodology for evaluation of permits process, integrates the technical criteria with the tools analysis to release processes of granting groundwater in the region of the Industrial Complex and surrounds. In the methodological process to assess the permits, the region model numerical flow, MNFR, was incorporated, validating the use of the model to the prognostic of new production wells. In the case study, the simulation of transient pumping tests, calibrated with real level data measured in observation wells, gave satisfactory results, provided that the conditions of the local hydrogeology were respected. To evaluate the proposed methodology, it was analyzed a permit process for the region (a battery of 11 wells), to identify the factors that could improve the management of water resources in the region. It was verified that the current management process does not foresee the sustainable use of groundwater resources for each water zone. In addition, for the case study evaluated by the new methodology, the granting would be partially denied, since demand for the wells is higher than the water potential calculated for the water zone in which the wells are inserted.

Keywords: granted, groundwater permits, hidrogeology, aquifer system.

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	VI
AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
SUMÁRIO	X
ÍNDICE DE TABELAS	XV
ÍNDICE DE FIGURAS	XVIII
SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	XXIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	4
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	6
2.1 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	6
2.1.1 <i>Ciclo Hidrológico e Reservas Hídricas</i>	6
2.1.1.1 Precipitação	8
2.1.1.2 Evaporação e Evapotranspiração	9
2.1.1.3 Infiltração X Recarga.....	11
2.1.2 <i>Tipos de Aquíferos</i>	12

2.1.3	<i>Coefficientes Hidrodinâmicos</i>	14
2.1.3.1	Condutividade Hidráulica	14
2.1.3.2	Transmissividade	15
2.1.3.3	Porosidade	16
2.1.3.4	Armazenamento em Aquíferos Freáticos e Confinados.....	17
2.1.4	<i>Conceitos Básicos Hidráulica de Poços</i>	19
2.1.4.1	Regimes Permanente e Transiente.....	19
2.1.4.2	Aquíferos Confinados: Parâmetros Hidráulicos.....	20
2.1.4.3	Aquíferos Freáticos: Parâmetros Hidráulicos	22
2.1.4.4	Métodos de Interpretação de Testes de Aquíferos	23
2.1.5	<i>Reservas Hidrogeológicas: Conceitos</i>	27
2.2	MODELOS HIDROGEOLÓGICOS	33
2.2.1	<i>Modelos Conceituais X Numéricos</i>	33
2.2.2	<i>Modelos Numéricos</i>	33
2.2.3	<i>Equação Geral do Fluxo</i>	34
2.2.4	<i>Método de Diferenças Finitas (MDF) e de Elementos Finitos (MEF)</i> 38	
2.2.5	<i>Modelo Numérico de Fluxo MODFLOW</i>	39
2.3	ASPECTOS GERAIS DA OUTORGA.....	41
2.3.1	<i>Fundamentação Teórica da Outorga</i>	41
2.3.2	<i>Outorga - Âmbito Federal</i>	43
2.3.3	<i>Outorga - Âmbito Estadual</i>	45
2.3.4	<i>Aspectos Técnicos da Outorga</i>	54

2.3.4.1	Processo de Outorga para Poços de Produção no Entorno do Pólo Industrial de Camaçari	59
2.4	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	62
2.4.1	<i>Localização</i>	62
2.4.2	<i>Hidrografia</i>	62
2.4.3	<i>Geologia Regional</i>	69
2.4.3.1	Arcabouço Geotectônico.....	69
2.4.3.2	Evolução Tectonoestratigráfica	71
2.4.3.3	Unidades Litoestratigráficas Superficiais	73
2.4.4	<i>Hidrogeologia Regional</i>	77
2.4.4.1	Hidrogeologia Local	81
2.5	GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS NA ÁREA DE ESTUDO	84
2.5.1	<i>Avaliação do Histórico de Exploração</i>	84
2.5.2	<i>Modelo Numérico de Fluxo Regional</i>	87
2.5.2.1	Modelo Conceitual	87
2.5.2.2	Geometria das Camadas	88
2.5.2.3	Modelo Numérico	89
2.5.2.4	Revisões, Calibrações e Análise de Sensibilidade.....	90
2.5.2.5	Malha Numérica e Condições de Contorno	90
2.5.2.6	Limitações do Modelo Numérico de Fluxo Regional	94
2.5.3	<i>Zoneamento Hídrico Regional</i>	95
2.5.4	<i>Condições Atuais de Exploração</i>	98
3	METODOLOGIA	105
3.1	PESQUISA BIBLIOGRÁFICA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	105

3.2	ESCOLHA DE CRITÉRIOS TÉCNICOS DE OUTORGA.....	105
3.3	OBTENÇÃO DOS PARÂMETROS NECESSÁRIOS À AVALIAÇÃO TÉCNICA DA OUTORGA.....	105
3.4	PROPOSIÇÃO DE METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS PROCESSOS DE OUTORGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	107
3.5	ESTUDO DE CASO	107
4	DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO E RESULTADOS	
	PRELIMINARES	111
4.1	CRITÉRIOS TÉCNICOS PARA OUTORGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	111
4.2	NOVO ZONEAMENTO HÍDRICO	111
4.3	CÁLCULO DAS RESERVAS E POTENCIALIDADES.....	117
4.3.1	<i>Parâmetros Hidráulicos</i>	117
4.3.2	<i>Estimativa da Recarga</i>	120
4.3.3	<i>Reservas e Potencialidades</i>	138
4.4	CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS HÍDRICAS.....	142
4.5	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO TÉCNICA DOS PROCESSOS DE OUTORGA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	150
4.5.1	<i>Metodologia para Avaliação Prévia da Outorga</i>	154
4.5.2	<i>Metodologia para Avaliação da Outorga Após Instalação do Poço</i> 155	
4.5.3	<i>Discussão da Metodologia Proposta</i>	157
5	ESTUDOS DE CASO E RESULTADOS FINAIS.....	158

5.1	PROCEDIMENTO DE OUTORGA DA CETREL: ESTUDO DE CASO, EMPRESA 01	158
5.1.1	<i>Breve Resumo do Caso</i>	158
5.1.2	<i>Condições Operacionais Pós-Outorga (2009 a 2015)</i>	166
5.1.3	<i>Aplicação da Metodologia de Avaliação Proposta</i>	179
5.1.3.1	Pré-avaliação da Outorga antes da Instalação dos Poços....	179
5.1.3.2	Avaliação da Outorga após Instalação da Bateria de Poços – Empresa 1	182
5.1.4	<i>Validação do MNFR quanto aos Testes de Vazão Escalonada – Empresa 1</i>	189
5.1.5	<i>Resultados Obtidos: Discussão do Estudo de Caso</i>	202
6	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	204
7	RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS	210
8	REFERÊNCIAS	211

ÍNDICE DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Métodos de Interpretação de Testes de Aquíferos em Função do Tipo de Aquífero e do Regime de Bombeamento	23
Tabela 2. Método de Diferenças Finitas versus Método de Elementos Finitos	39
Tabela 3. Programa Nacional de Águas Subterrâneas	45
Tabela 4. Critérios de Outorga de Águas Subterrâneas – Legislações Estaduais	47
Tabela 5. Critérios Técnicos Outorga de Águas Subterrâneas	58
Tabela 6. Potencialidade de Águas Subterrâneas nos Aquíferos Marizal / São Sebastião	80
Tabela 7 a. Vazões Médias Baseadas em Leituras de Hidrômetros (Monitoramento Mensal)	99
SI – sem informações Fonte: Elaborado pela autora.	99
Tabela 7. b. Vazões Médias Baseadas em Leituras de Hidrômetros (Monitoramento Mensal)	100
Tabela 8. Critérios Técnicos para Avaliação de Processos de Outorga de Recursos Hídricos Subterrâneos	112
Tabela 9. Valores Absolutos / Médios dos Parâmetros Hidráulicos dos Poços de Produção por Zona Hídrica	119
Tabela 10. Quantificação de Recarga do Aquífero Marizal / São Sebastião..	120
Tabela 11. Estações Pluviométricas Monitoradas na Área de Interesse	122
Tabela 12. Estações Pluviométricas Seleccionadas para Geração das Isoeitas na Área de Interesse.....	124

Tabela 13. Estações Pluviométricas Utilizadas para Geração das Isoietas...	125
Tabela 14. Dados de Evaporação e Evapotranspiração de Diferentes Fontes de Dados.....	128
Tabela 15. Valores de C' para o Cálculo de C, adaptados para a Área de Interesse do Estudo.	130
Tabela 16. Recargas Calculadas por Zona Hídrica.....	137
Tabela 17. Reservas e Potencialidades por Zona Hídrica	141
Tabela 18. Potencialidade Efetiva por Zona Hídrica	142
Tabela 19. Disponibilidades Hídricas por Recarga Direta.....	144
Tabela 20. Avaliação do Potencial de Exploração com Base em Dados de Disponibilidade Hídrica	145
Tabela 21. Classificação de Favorabilidade quanto à Exploração por Zona Hídrica.....	149
Tabela 22. Fator de Favorabilidade quanto à Exploração por Zona Hídrica ..	150
Tabela 23. Condicionantes para Avaliação de Outorga para Águas Subterrâneas na Área de Estudo	152
Tabela 24. Características dos Poços Instalados Anteriormente à Ampliação da Outorga.....	158
Tabela 25. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços -Tipo.....	161
Simulação Preliminar no MNFR.....	161
Tabela 26. Condutividades Hidráulicas nos Poços Existentes obtidas a partir dos Ensaios de Vazão	162
Tabela 27. Características dos Poços Instalados após Ampliação da Outorga	168

Tabela 28. Condições Operacionais dos Poços Instalados após Ampliação da Outorga.....	177
Tabela 29. Rebaixamentos Máximos Interferência entre Poços	178
Tabela 30. Aplicação da Metodologia de Avaliação de Processos de Outorga para o Pré- Projeto da Empresa 1 – Recursos Hídricos Subterrâneos... ..	181
Tabela 31. Comparativo entre Capacidades Específicas na Bateria de Poços – Empresa 1.....	184
Tabela 32. Aplicação da Metodologia de Avaliação de Processos de Outorga para Poço já Instalado da Empresa 1 – Recursos Hídricos Subterrâneos	185
Tabela 33. Parâmetros Hidráulicos nos Poços Instalados Obtidos do Aquífer Test	190
Tabela 34. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços Instalados dentro do MNFR	191
Tabela 35. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços Instalados dentro do MNFR após ajustes com Dados Litológicos de Campo	193
Tabela 36. Dados de Entrada no MNFR para Simulação em Regime Transiente	196

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 – Tipos de Aquífero (CLEARY, 1989).	13
Figura 2 – Diferença entre Regime Transiente e Permanente em função da água extraída do próprio aquífero ou vinda de uma fonte externa (modificado de CUSTODIO&LLAMAS, 1983 apud CPRM, 2000).	20
Figura 3 – Parâmetros Hidráulicos num Poço Bombeando um Aquífero Confinado (CLEARY, 1989).	21
Figura 4 – Parâmetros Hidráulicos num Poço Bombeando um Aquífero Freático (CLEARY, 1989).	22
Figura 5 – Volume Elementar de Controle Representativo da Equação Geral de Fluxo (modificado de Fetter, 1994).	35
Figura 6 – Vazão Total Outorgada - 2016 (elaborado pela autora).	59
Figura 7 – Fluxograma Simplificado de Avaliação de Novos Poços para Outorga (CETREL, 2003).	60
Figura 8 - Área Objeto do Estudo (elaborado pela autora).	63
Figura 9 - Delimitação da Bacia do Recôncavo Norte (elaborado pela autora).	64
Figura 10 - Sub-Bacias Inseridas na Bacia do Recôncavo Norte (elaborado pela autora).	65
Figura 11 - Localização dos Reservatórios (elaborado pela autora).	67
Figura 12 - Rios Importantes para a Região (elaborado pela autora).	68
Figura 13 - Bacia do Recôncavo: limites e arcabouço estrutural pré-rift	70
(ARAGÃO, 1994 apud BEISL, 1996).	70

Figura 14 - Seção Geológica Esquemática NW – SE, ilustrando a morfologia de meio-gráben da Bacia do Recôncavo, cujo depocentro fica a leste (MILHOMEN, et. al 2003 apud PRATES & FERNANDEZ, 2015).	70
Figura 15 - Evolução Estratigráfica da Bacia do Recôncavo (MILHOMEN, et. al 2003 apud PRATES & FERNANDEZ, 2015).	72
Figura 16 - Geologia Regional (adaptado CPRM, 1990).....	74
Figura 17 - Domínios Hidrogeológicos versus Unidade Hidrográfica da Bacia do Recôncavo Norte (adaptado CPRM, 2008).....	78
Figura 18 – Seção Hidrogeológica Transversal ao Sistema Aquífero Recôncavo na Área de Camaçari – Dias D’Ávila (LIMA, 1999).	79
Figura 19 – Mapa Potenciométrico Inferido do Sistema Aquífero Recôncavo (modificado de LEITE, 1964 apud LIMA, 1999).	81
Figura 20 – Mapa Geológico Regional com Falhas Camaçari e Leandrino (modificado de CPRM, 1990).....	82
Figura 21 – Modelo Depositional para a Formação Marizal (MAIA NOBRE, 1996).....	83
Figura 22 – Domínio Regional do Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).	91
Figura 23 - Domínio Vertical do Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).	92
Figura 24 – Novo Domínio Regional do Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).....	93
Figura 25 – Zoneamento Hídrico (adaptado de BAHIA, 2013).....	97
Figura 26 - Localização Poços de Produção em Operação – 2015 (elaborado pela autora).....	101

Figura 27 - Localização Poços de Monitoramento (elaborado pela autora)...	102
Figura 28 - Vazão de Bombeamento do Sistema Aquífero Marizal / São Sebastião pelo Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).	104
Figura 29 – Proposta de Compartimentação do Sistema Aquífero Recôncavo Norte por Blocos Estruturais para a área de Estudo (elaborado pela autora).	113
Figura 30 – Mapa de Vulnerabilidade da Região do PIC (Santos, 2010).	114
Figura 31 – Novo Zoneamento Hídrico Proposto – 2016 (elaborado pela autora).	116
Figura 32 – Análise de Consistência – Precipitação Anual (elaborado pela autora).....	124
Figura 33 – Precipitação Anual na Área de Interesse (elaborado pela autora).	126
Figura 34 – Evapotranspiração Anual na Área de Interesse (elaborado pela autora).....	129
Figura 36 - C' Aplicados ao Mapa de Solos para Obtenção do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) (adaptado do Mapa de Solos: IBGE. Escala 1:1.000.000).	133
Figura 37 – C' Aplicados ao Mapa de Vegetação para Obtenção do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) (adaptado do Mapa de Vegetação: IBGE. Escala 1:1.000.000).	134
Figura 38 – Mapa Escoamento Superficial na área de Interesse (elaborado pela autora).....	135
Figura 39 – Mapa de Recarga na área de Interesse (elaborado pela autora).	136

Figura 40 – Resultados do Balanço Hídrico por ZH_ MODFLOW (elaborado pela autora).....	146
Figura 41 – Critérios para Avaliação de Técnica de Outorga de Águas Subterrâneas (elaborado pela autora).	153
Figura 42 – Poços Existentes em Operação _ Empresa 1 (elaborado pela autora)	159
Figura 43 – Simulação Preliminar _Captura para TT 15 anos (elaborado pela autora).....	163
Figura 44 – Simulação Preliminar _Captura para TT 30 anos (elaborado pela autora).....	164
Figura 45 – Simulação Preliminar _ Rebaixamentos Máximos nas Camadas Produtoras (MNFR) (elaborado pela autora).....	165
Figura 46 – Localização da Bateria de Poços - Projeto X Instalação Final (elaborado pela autora).....	167
Figura 47 – Seção Esquemática da Hidrogeologia Local A- A' – Empresa 1 (elaborado pela autora).....	169
Figura 48 – Seção Esquemática da Hidrogeologia Local B' – B' – Empresa 1 (elaborado pela autora).....	170
Figura 49 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/009 (em operação) X PP-B/003 (inoperante) (elaborado pela autora).	171
Figura 50 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/011 (em operação) X PP-B/002 (inoperante) (elaborado pela autora).	172
Figura 51 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/012 X PP-B/004 (inoperante) (elaborado pela autora).....	172

Figura 52 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/013 X PP-B/005 (inoperante) (elaborado pela autora).....	172
Figura 53 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/014 X PP-B/006 (inoperante) (elaborado pela autora).....	173
Figura 54 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/015 X PP-B/007 (inoperante) (elaborado pela autora).....	173
Figura 55 – Localização dos Poços de Monitoramento Rasos (elaborado pela autora).....	175
Figura 56 – Diferença entre Cargas Hidráulicas no Aquífero Freático e Aquífero Confinado (elaborado pela autora).	176
Figura 57 – Representação Esquemática da Interferência entre Poços (DINIZ, 2008).....	178
Figura 58 – Localização Bateria de Poços (pré-projeto) em Relação ao Zoneamento Hídrico Proposto (elaborado pela autora).	180
Figura 60 – Calibração do Modelo em Regime Estacionário – Condição Inicial para Simulação Transiente (elaborado pela autora).	195
Figura 61 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP- B/002 (elaborado pela autora).	197
Figura 62 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/002 (elaborado pela autora).	198
Figura 63 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP- B/003 (elaborado pela autora).	198
Figura 64 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/003 (elaborado pela autora).	199

Figura 65 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/006 (elaborado pela autora).	199
Figura 66 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/006 (elaborado pela autora).	200
Figura 67 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/007 (elaborado pela autora).	200
Figura 68 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/007 (elaborado pela autora).	201

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CERB	Companhia de Engenharia Ambiental e Recursos Hídricos da Bahia
COFIC	Comitê de Fomento à Indústria
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Pesquisa Mineral
EMBASA	Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A.
INEMA	Instituto de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
SUDIC	Superintendência de Desenvolvimento Industrial e Comercial do Governo do estado da Bahia
PIC	Polo Industrial de Camaçari
PGRH	Programa de Gerenciamento das Águas Subterrâneas do Polo Industrial de Camaçari
MNFR	Modelo Numérico de Fluxo Regional

1 INTRODUÇÃO

A gestão dos recursos hídricos no Brasil está suportada pela Lei Federal nº 9.433/97 (BRASIL, 1997) que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Um dos instrumentos para controle e gestão dos recursos hídricos, suportada pela Lei Federal 9.433/97, é a outorga de direito de uso, cujos critérios e procedimentos são definidos pelas autoridades gestoras da bacia hidrográfica / hidrogeológica considerada.

Atualmente, não há consenso entre as autoridades outorgantes em relação aos critérios de outorga para águas subterrâneas. Alguns estados avaliam os pedidos por meio de testes de bombeamento, mas a maioria se preocupa apenas com a tomada de precauções por parte do usuário quanto à manutenção da qualidade do recurso em longo prazo (ANA, 2007).

Os Estados vêm, paulatinamente, consolidando suas respectivas legislações estaduais para inserção de critérios para outorga, porém no caso dos recursos hídricos subterrâneos os processos muitas vezes são subjetivos, não tendo aplicabilidade prática para os órgãos outorgantes.

Para que o processo de outorga ocorra conforme as premissas da Lei Federal nº 9.433/97, deve haver uma sinergia entre questões técnicas (hidrologia, hidráulica, ecologia, qualidade ambiental, etc.), legais (competências, direito e responsabilidade dos usuários, etc.) e políticas (mobilização social, acordos entre setores e governos para o desenvolvimento integrado e sustentável da bacia, articulação institucional, etc.) (COSTA, 2009).

Quando se trata de disponibilidade hídrica subterrânea, a definição de vazões a serem outorgadas se torna complexa, pois é difícil estimar o volume de água presente no sistema aquífero e seu aporte regular, o qual é uma função da sua área de contribuição (CAMPOS & CORREA, 2013). Além disso, para determinação da área de contribuição é necessário um profundo conhecimento da hidrogeologia da região, que nem sempre dispõe de dados suficientes para

as estimativas, como explicitado por Arraes & Campos (2007) *apud* Campos & Correa (2013).

Adicionalmente, requer-se metodologias que possam prover as inter-relações entre os recursos hídricos superficiais e os subterrâneos, bem como a articulação com outras autoridades outorgantes como o DNPM, responsável pela concessão de exploração de águas minerais (ANA, 2007).

A região do Complexo Industrial de Camaçari (PIC), área objeto desse estudo, está inserida em uma extensa planície que abrange bacias hidrográficas sensíveis e com complexas relações de carga e descarga com as águas subterrâneas e sistemas estuarinos próximos, mananciais de grande importância social e econômica para a população da região metropolitana de Salvador/BA.

Estudos ambientais conduzidos no final da década de 80 na região evidenciaram a necessidade da criação de programas de controle da exploração das águas subterrâneas do aquífero profundo, por conta das vulnerabilidades à poluição identificadas, bem como evidências de superexploração do aquífero, comprometendo a sustentabilidade do recurso em médio e longo prazo.

Nessa área, além da previsão de instalação de novas indústrias ou empresas, cuja atividade oferece algum potencial poluidor, já existem cerca de 90 empresas dos ramos petroquímico, químico, beneficiamento de minerais, dentre outros. Adicionalmente, as cidades de Camaçari e Dias D'Ávila vêm crescendo e aumentando a demanda por água subterrânea.

Na região do PIC o processo de outorga de poços de produção para a exploração de águas subterrâneas é conduzido pelo INEMA, com suporte técnico da empresa CETREL, sempre que solicitado, para avaliação das vazões outorgáveis através critérios específicos elaborados para a região ao longo dos anos.

Dentre os critérios considerados estão: utilização das ferramentas do zoneamento hídrico e da modelagem numérica de fluxo (ambos desenvolvidos para a região no ano de 2003 e atualizados a cada três anos), para avaliação das vazões e localizações requeridas para os novos poços.

O processo atual de outorga de águas subterrâneas para a região do PIC e entorno, contudo, possui limitações, dentre as quais pode-se citar:

- Ausência de uma instrução normativa do órgão ambiental, baseada em projeto de lei aprovado, que direcione a outorga de poços localizados na região do PIC e entorno;
- A utilização das ferramentas do Zoneamento Hídrico e do Modelo Numérico de Fluxo apenas pelos usuários associados ao Comitê de Fomento do Pólo Industrial de Camaçari (COFIC) para avaliação técnica das vazões de outorga para águas subterrâneas na região;
- O processo de autorização de perfuração é dissociado do processo de pedido de outorga, o que dificulta a avaliação da localização adequada, considerando critérios de zoneamento, por exemplo;
- Ausência de banco de dados integrado com informações dos poços geridos / instalados pelos principais usuários na região (EMBASA, CERB, DNPM e CETREL), dificulta a utilização de ferramentas de análise georreferenciadas, onde poderiam ser consideradas características hidráulicas, geológicas e de risco para determinação de vazões de segurança e distância mínima entre poços, por exemplo.

Portanto, a metodologia atual utilizada para pedidos de outorga na região precisa melhorar, com vista a melhor gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região.

O presente trabalho buscou contribuir para a melhoria da gestão dos recursos hídricos subterrâneos na região o PIC e entorno, propondo critérios técnicos para os processos de outorga de águas subterrâneas e uma metodologia para aplicação desses novos critérios.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral foi a proposição de critérios técnicos para determinação de vazões outorgáveis na região do PIC e entorno, sistema aquífero Marizal/São Sebastião, para melhoria da gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Revisar os aspectos da outorga de direito de uso de recursos hídricos no Brasil e Estado da Bahia, quanto a legislação pertinente e critérios técnicos já utilizados;
- Revisar a bibliografia existente sobre a caracterização da hidrogeologia na região em estudo;
- Avaliar o modelo hidrogeológico de fluxo incorporado ao modelo numérico existente para a região, enquanto ferramenta de controle de outorga para recursos hídricos subterrâneos;
- Propor critérios técnicos que possibilitem subsidiar a outorga para águas subterrâneas na região;
- Desenvolver uma metodologia para aplicação dos critérios propostos na área de interesse.
- Avaliar um estudo de caso com base em dados reais de outorga.

1.3 Estrutura da Dissertação

O trabalho está estruturado em 7 capítulos principais, onde na primeira parte (capítulo 1) são apresentados os objetivos geral e específicos e as principais questões da pesquisa.

No capítulo 2 está apresentado todo o referencial teórico utilizado no decorrer da pesquisa, bem como a revisão bibliográfica das características hidrogeológicas da área objeto do estudo de caso.

A metodologia da pesquisa está descrita de forma sucinta no capítulo 3.

O desenvolvimento metodológico para obtenção e aplicação dos critérios complementares para outorga, considerando a região objeto do estudo de caso é abordado no capítulo 4. Para validação da metodologia desenvolvida buscou-se testar os critérios em processos de outorga antigos e esses estudos são apresentados no capítulo 5. Nos capítulos 6, 7 e 8 são apresentadas as conclusões, recomendações para estudos futuros e referências, respectivamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Águas Subterrâneas

2.1.1 *Ciclo Hidrológico e Reservas Hídricas*

No ciclo hidrológico a água está em constante movimentação no ambiente. Sob a dinâmica da gravidade, movimentações tectônicas no interior da Terra e da energia do sol, a água se movimenta entre o continente, oceanos e atmosfera, alimentando o ecossistema e propiciando o equilíbrio da vida no planeta.

A água presente, especialmente nos oceanos, rios, lagos e outros corpos d'água evaporam, por conta da radiação solar e se acumulam na atmosfera na forma de vapor d'água (nuvens). A quantidade de água evaporada é variável, sendo maior na região próxima ao equador, onde a radiação solar é mais intensa. No processo de evaporação, são transportadas as moléculas de água pura, ficando os sais ou outras substâncias presentes na água líquida, precipitadas na superfície. O vapor d'água move-se através da atmosfera como parte integral do clima. Quando as condições atmosféricas são adequadas, o vapor d'água se condensa e forma gotículas, que por sua vez, podem precipitar nos oceanos ou na superfície dos continentes, ou ainda evaporar novamente antes de atingir o solo.

Nos continentes a água proveniente da atmosfera pode seguir diversos caminhos, infiltrar no subsolo e recargar reservas hídricas subterrâneas, escoar superficialmente na forma de rios, drenagens e alimentar lagos, oceanos, congelar formando geleiras nos cumes de montanha e precipitar novamente para atmosfera, reiniciando o ciclo.

Na subsuperfície do solo poroso a zona que contém água é conhecida como **zona vadosa** ou zona de aeração. Essa água tem função fundamental no crescimento das plantas, que por sua vez, através do processo de transpiração envia vapor d'água novamente para a atmosfera. Sob determinadas condições a água pode caminhar lateralmente na zona vadosa e o vapor d'água presente

no solo também pode migrar de volta a superfície na forma de evaporação. Outra parte da água migra a maiores profundidades por gravidade, e a determinada profundidade, pode ocorrer a saturação do solo, onde todos os poros vazios são preenchidos com água. A água acumulada na zona de saturação é chamada **água subterrânea**.

Na hidrologia, apesar de haver uma separação entre o estudo dos fenômenos que regem a hidrologia superficial e subterrânea, em função da tendência natural e científica em se compartimentar sistemas complexos, os ambientes estão intimamente relacionados, uma vez que a água subterrânea tem sua origem na superfície e atmosfera.

As **águas subterrâneas** são reservas de água acumuladas ao longo do tempo geológico nos espaços vazios existentes nos meios porosos das rochas sedimentares, vazios e fraturas de rochas cristalinas, ígneas e metamórficas. O movimento das águas subterrâneas através das rochas e camadas de solo pode levar a ocorrência de nascentes, ou manter relações de carga e descarga em rios, lagos e oceanos.

Em relação ao escoamento superficial, as águas subterrâneas movem-se comparativamente de forma muito mais lenta. Para exemplificar uma alta velocidade nas águas subterrâneas estaria na faixa de 1m/d, enquanto que um rio rápido poderia mover-se a 1m/s (Cleary, 1989).

As águas subterrâneas são excelentes reservas de água doce, e estrategicamente, onde há pouca disponibilidade de água superficial, são a opção para abastecimento industrial e da população em geral.

As reservas de águas subterrâneas no subsolo estão classificadas em **aquíferos e aquíferos**, sendo que o primeiro se trata de formações geológicas com suficiente permeabilidade e interconectividade entre os espaços para transmitir quantidades significativas de águas, sob gradientes hidráulicos naturais.

Os aquíferos, por outro lado, são excelentes armazenadores de água, contudo, devido ao contraste de condutividade hidráulica em relação aos aquíferos, não podem ser utilizados para extração de água por bombeamento.

Sua importância, em nível regional, tem a ver com a recarga e descarga entre camadas aquíferas produtoras, através da drenança vertical.

Em condições naturais, um aquífero está sempre em um estado de equilíbrio dinâmico (THEIS, 1938 *apud* FETTER, 1994). O volume de recarga do aquífero é igual ao volume de descarga, a superfície potenciométrica é estacionária e o armazenamento tende a ser constante. O máximo de água que pode ser transmitido de uma seção a outra do aquífero é em função da transmissividade e do máximo gradiente da superfície potenciométrica.

2.1.1.1 Precipitação

Na hidrologia a precipitação é entendida como toda a água proveniente do meio atmosférico que atinge a superfície terrestre (TUCCI, 2001). As medidas de precipitação são importantes na concepção dos mais diversos projetos de engenharia e nos estudos hidrológicos de bacias hidrográficas e hidrogeológicos de reservas hídricas subterrâneas.

As medidas de precipitação são tomadas a partir de equipamentos denominados pluviômetros, instalados em estações meteorológicas estrategicamente localizadas. O objetivo de um posto de medição de chuvas é a obtenção de uma série ininterrupta de precipitações ao longo dos anos e os dados obtidos devem ser submetidos a uma análise antes de serem utilizados.

Frequentemente, os postos de medições de dados de precipitação apresentam erros grosseiros tendo as mais diversas causas, desde falha do equipamento, condições ambientais ou erro de leitura do operador.

Segundo Tucci (2001), a avaliação estatística para preenchimento das lacunas de dados pode ser feita por vários métodos, sendo o mais comum o método de ponderação regional, normalmente utilizado para o preenchimento de séries mensais ou anuais de precipitações. Para determinado grupo de postos, são selecionados pelo menos três que possuam, no mínimo, 10 anos de dados e para o posto “Y” que apresenta falhas, as mesmas são preenchidas como base na equação (TUCCI, 2001):

$$y = \frac{1}{3} \left[\frac{X_1}{X_{m1}} + \frac{X_2}{X_{m2}} + \frac{X_3}{X_{m3}} \right] y_m \quad (1)$$

Onde “ y ” é a precipitação no posto Y a ser estimada; X₁, X₂ e X₃ são as precipitações correspondentes ao mês (ou ano) que se deseja preencher, observadas em três estações vizinhas, y_m a precipitação média do posto Y e X_{m1}, X_{m2} e X_{m3}, as precipitações médias nos postos vizinhos. Os postos vizinhos escolhidos devem estar numa região climatológica semelhante ao posto que se deseja preencher falhas.

Uma análise de consistência dos dados preenchidos deve ser conduzida, de modo a verificar a homogeneização dos dados disponíveis em relação às observações em postos vizinhos. Para essa etapa, um método frequentemente aplicado é o método de dupla massa, desenvolvido pelo Geological Survey (USA), utilizado para análise de séries mensais ou anuais (TUCCI, 2001). Para aplicação do método deve-se selecionar os postos de uma região, acumular para cada um deles os valores mensais (ou anuais), e plotar num gráfico cartesiano os valores acumulados correspondentes ao posto a consistir (nas ordenadas) e de um outro posto adotado como base de comparação (nas abscissas).

2.1.1.2 Evaporação e Evapotranspiração

Moléculas de água são frequentemente transferidas do estado líquido para o estado de vapor, sendo conduzidas nesse estado, para a atmosfera, o resultado desse processo é chamado evaporação e evapotranspiração (FETTER, 1994).

Em meteorologia, o processo de evaporação ocorre naturalmente, com a adição de energia no sistema, na forma radiação solar, proveniente do sol, da atmosfera ou de ambos e a ocorrência física dessa transferência é de difusão molecular e turbulenta (TUCCI, 2001). Além da radiação solar, as variáveis que interferem no processo de evaporação são a temperatura do ar, vento e pressão de vapor.

Os métodos normalmente utilizados para determinar a evaporação são transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas e evaporímetros.

Medidas diretas através de tanques de evaporação são muito utilizadas no meio científico, sendo o mais usado a nível mundial e presente em estações meteorológicas o tanque classe A, que têm forma circular com diâmetro de 121 cm e profundidade de 25,5 cm. A taxa de evaporação é medida com auxílio de uma ponta linimétrica apoiada em um tranquilizador, e trata-se do resultado das mudanças de nível de água no tanque, levando em consideração a precipitação ocorrida.

A Evapotranspiração, por outro lado, é considerada como a perda de água por evaporação do solo e transpiração da planta (TUCCI, 2001). Para o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica como um todo, o levantamento dos dados da evapotranspiração é conceitualmente mais correto do que apenas considerar os dados obtidos como evaporação do solo.

O termo “evapotranspiração potencial” foi introduzido por Thornthwaite (1944) como a perda de água na forma de vapor, se em nenhum momento há deficiência de água no solo para uso da vegetação no processo de transpiração (FETTER, 1994). Outra definição de “evapotranspiração potencial” considera a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade do tempo, de uma superfície extensa completamente coberta por vegetação de porte baixo e bem suprida de água (PENMAN, 1956 *apud* TUCCI, 2001).

A evapotranspiração real, por outro lado, trata da quantidade de água transferida para atmosfera por evaporação do solo e transpiração da planta, nas condições reais de fatores atmosféricos e de umidade do solo, sendo sempre igual ou menor que a evapotranspiração potencial ($EVT_{real} \leq EVT_{potencial}$) (GANGOPADHAYAYA *et. al.*, 1968 *apud* TUCCI, 2001).

Evapotranspiração pode ser medida diretamente com uso de equipamentos denominados lisímetros e as variáveis controladas são precipitação, escoamento, infiltração, armazenamento e percolação profunda, que permitem estabelecer a evapotranspiração real e/ou potencial. Inicialmente,

mede-se a umidade do solo inicial, para então medir a precipitação e a água adicionada para irrigação da cultura implantada no equipamento, mantendo-se em solo a capacidade de campo ($EVT_{\text{potencial}}$). Mudanças na umidade do solo indicará o quanto da água adicionada é perdida por evapotranspiração. A seguinte equação pode ser utilizada no lisímetro (FETTER, 1994):

$$EVT = S_i + P + I - S_f - D \quad (2)$$

Onde “EVT” é a evapotranspiração no período; “S” o volume inicial do solo úmido; “S_f” o volume final do solo úmido; “P” a precipitação medida no lisímetro; “I” a água de irrigação adicionada ao lisímetro e “D” o excesso de umidade denada do solo. Se a água é adicionada ao lisímetro a uma taxa suficiente para se manter a capacidade de campo, então o lisímetro irá medir a $EVT_{\text{potencial}}$.

2.1.1.3 Infiltração X Recarga

A “infiltração” pode ser definida como a passagem da água da superfície para o solo. A taxa de infiltração de água no solo depende, fundamentalmente, da água disponível para o processo e a medida que a água infiltra, o solo vai umedecendo de cima para baixo, alterando o perfil de umidade do solo. Durante o fenômeno da infiltração a taxa de saturação do solo ocorre de cima para baixo, estando a parte próxima a superfície mais saturada que a parte mais inferior do solo, a medida que o aporte de água cessa, o perfil de umidade do solo tende a inverter, reduzindo a saturação próximo a superfície e aumentando a umidade em profundidade, parte dessa umidade é perdida para a atmosfera por evapotranspiração. A definição do termo da infiltração pode ser atribuída, em parte, também à definição de “recarga”, ainda que esse termo inclua também a água que atinge o aquífero provinda de qualquer direção, seja de baixo, de cima ou lateralmente (LERNER, 1997 *apud* SCANLON, 2002).

Como descrito no artigo de Scanlon (2002), são inúmeras as técnicas para determinação da recarga direta de aquíferos, sendo aquela associada à infiltração proveniente de águas de chuva, irrigação e de corpos hídricos

superficiais, sendo as mais aplicadas por métodos indiretos (balanço hídrico, estudos de águas superficiais) ou diretos (lisímetros, aplicação de traçadores, etc.). Segundo Scanlon (2002), a maneira mais comum de se determinar a recarga pelo método do balanço hídrico é a abordagem indireta, onde todas as variáveis são medidas ou estimadas, na equação do balanço, exceto “R” (recarga), o qual é igual ao residual. A equação da recarga “R”, por balanço hídrico, fica então assim definida:

$$R = P + Q_{on}^{sw} - ES - EVT^{sw} - EVT^{uz} - \Delta S^{snow} - \Delta S^{sw} - \Delta S^{uz} \quad (3)$$

Onde “R” é a recarga; “ Q_{on}^{sw} ” a soma da contribuição da água superficial, mais a água que infiltra por irrigação, mais a água subterrânea; “ES” o escoamento superficial; “ EVT^{sw} ” a evapotranspiração superficial; “ EVT^{uz} ” a evapotranspiração na zona não saturada do solo; “ ΔS^{snow} ” a variação do armazenamento relacionada a neve; “ ΔS^{sw} ” a variação do armazenamento relacionada a água superficial; “ ΔS^{uz} ” a variação do armazenamento relacionada a zona não saturada do solo. Para muitos casos, alguns termos da equação (3) podem ser ignorados, em função da magnitude e disponibilidade dos dados, atribuindo-se as devidas considerações.

2.1.2 Tipos de Aquíferos

A Figura 1 exemplifica os tipos de aquíferos em meios porosos, assim como o posicionamento das superfícies potenciométricas em relação ao tipo de aquífero que está sendo perfurado, através da instalação de poços.

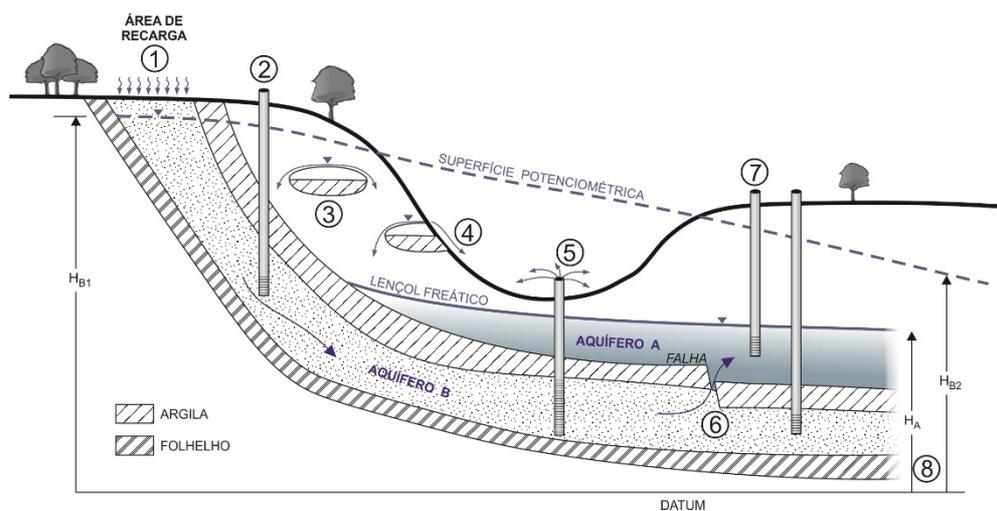


Figura 1 – Tipos de Aquífero (CLEARY, 1989).

O aquífero A exemplificado na Figura 1 é um tipo de aquífero livre, ou freático, a linha d'água medida em um poço situado nessa camada será coincidente com a linha de saturação de água no solo (7), ou seja, sob pressão atmosférica, o fluxo horizontal e o nível da água no poço é o mesmo que em sua circunvizinhança. Já em 3 e 4, a presença de lentes argilas na camada do aquífero livre pode formar reservas de água com extensão horizontal limitada, normalmente chamados aquíferos suspensos. Na localização 4, o chamado aquífero suspenso produz uma nascente surgente temporária, pois será dependente da taxa de infiltração da água no solo, variável como os índices pluviométricos locais e permeabilidade do solo.

O aquífero B é um exemplo típico de um aquífero confinado em meios porosos. Delimitado em sua parte superior e inferior por camadas argilosas pouco permeáveis, na localização 1 pode ter caráter livre pois trata-se de sua zona de recarga, além disso a presença de falhamentos e fraturas podem representar conexão hidráulica entre aquíferos diferentes (6). A superfície potenciométrica horizontal, representada por níveis d'água lidos em poços de monitoramento cuja seção filtrante está instalada nessa camada confinante, pode até mesmo extrapolar a topografia regional, dando caráter surgente ao poço instalado nessa posição (5).

Finalmente, a localização 8 mostra a relação entre aquíferos confinados e não confinados e sua relação de recarga / descarga. No exemplo mostrado, a

superfície potenciométrica do aquífero confinado está em potencial acima da linha de saturação do lençol freático, dessa forma, pode-se concluir que o aquífero B recarga o aquífero A, com tendência de fluxo ascendente, especialmente se as camadas confinantes tiverem características semipermeáveis.

Em função das características confinantes, os aquíferos podem ainda ser classificados em **não drenante**, quando as camadas confinantes são praticamente impermeáveis, nesse caso pode-se ter poços penetrantes nessa camada com níveis potenciométricos até acima da superfície, são os chamados poços artesianos ou jorrantes, e **drenante** ou semiconfinado, quando as camadas confinantes são semipermeáveis, permitindo contribuições entre as camadas do aquífero e aquitarde por gotejamento ou drenança.

2.1.3 Coeficientes Hidrodinâmicos

Para o entendimento do comportamento da água em meios porosos subterrâneos e hidráulica de poços, alguns conceitos básicos são importantes de serem entendidos. Neste trabalho, serão apresentados alguns deles, de relevância maior para a discussão que se seguirá. São eles a condutividade hidráulica (K), transmissividade (T), porosidade total e efetiva, e o coeficiente de armazenamento (S).

2.1.3.1 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica (K) pode ser definida como a medida do potencial do aquífero de conduzir água sob influência do gradiente de uma superfície potenciométrica. É uma função das propriedades do meio poroso e das características do fluido (CLEARY, 1989).

$$K = \frac{k \cdot \gamma}{\mu} \quad (4)$$

Onde “ k ”, que representa o meio poroso, é a permeabilidade intrínseca, dependente do diâmetro dos grãos, “ μ ” representa a viscosidade dinâmica do fluido e γ o peso específico ($\gamma = \rho g$, onde ρ é a densidade do fluido e g a gravidade).

Para expressar o fluxo de água através do meio poroso, utiliza-se a Lei de Darcy, expressa matematicamente por:

$$V_D = q = \frac{Q}{A} = -K \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (5)$$

Onde V_D é a velocidade de Darcy, definida como carga específica ($L^3/T/L^2$), Q é taxa volumétrica de fluxo (L^3/T), A é a área total da seção perpendicular à direção de fluxo (L^2), K a condutividade hidráulica (L/T) e Δh a perda de carga hidráulica (L) através da distância Δx (L).

Estendendo a lei de Darcy para três dimensões, têm-se as expressões necessárias para derivar a equação tridimensional de estado não estacionário de fluxo de água subterrânea, como será visto mais adiante.

$$V_x = -K_x \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad V_y = -K_y \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad V_z = -K_z \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (6)$$

Algumas vezes a Lei de Darcy pode ser expressa em termo de densidade do fluido e da permeabilidade intrínseca, quando os efeitos da densidade são importantes, por exemplo, na modelagem por intrusão salina:

$$V_x = -K_x \frac{\Delta h}{\Delta x} = -\frac{k\gamma}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{P}{\gamma} + Z \right] = -\frac{k}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} [P + \rho g Z] \quad (7)$$

2.1.3.2 Transmissividade

A transmissividade é a medida da quantidade de água que pode ser transmitida horizontalmente através de uma espessura saturada de aquífero sob

um gradiente hidráulico 1 (FETTER, 1994). É o produto da condutividade hidráulica pela espessura saturada do aquífero.

$$T = bK \quad (8)$$

Onde T é a transmissividade (m^2/d), b a espessura saturada do aquífero (L) e K a condutividade hidráulica do aquífero (L/T).

O conceito de transmissividade assume que o fluxo através do aquífero seja horizontal, em alguns casos essa premissa não é válida. Esse conceito é frequentemente utilizado para meio poroso que não representam as condições de contorno mais complexas inerentes aos aquíferos fraturados.

O escoamento de águas subterrâneas no meio fraturado é normalmente controlado pelas fraturas, podendo o fluxo seguir caminhos tortuosos em função do alto grau de heterogeneidade espacial das fraturas.

2.1.3.3 Porosidade

A porosidade de materiais é definida como a relação entre o volume dos espaços vazios entre os fragmentos sólidos e o volume total do solo. Na geologia é uma medida do volume de vazios pelo volume total dos sedimentos.

Em termos geológicos pode haver duas classificações de porosidade, sendo primária, aquela formada na época da formação da rocha (sedimentares ou cristalinas), e secundária, aquela que se refere às aberturas formadas após o processo de diagênese.

A porosidade total representa a máxima quantidade de água que um dado volume de material pode conter (CLEARY, 1989). Nesse caso, a porosidade total é composta pela água que drenará livremente por gravidade (vazão específica, às vezes chamada de porosidade efetiva η_{ef} , ou drenável) e pela água retida nos grãos por tensão superficial (chamada de retenção específica).

$$n = S_y + S_R \quad (9)$$

Onde S_y é a vazão específica e S_R a retenção específica.

A retenção específica aumenta com o decréscimo do tamanho dos grãos, por exemplo, uma argila pode ter uma porosidade total de 50% mas com uma retenção específica de 48%, nesse caso a porosidade drenável é inferior a 2%.

O conceito de porosidade efetiva η_{ef} é bem importante na hidrogeologia, especialmente em situações de fluxo não lineares. Dessa forma, para obtenção da velocidade real de fluxo, a partir da lei de Darcy, é necessária uma correção da fórmula, acrescentado o parâmetro da porosidade efetiva que trata do real volume que deverá fluir através da seção transversal.

$$V_R = -\frac{K}{\eta_{ef}} \frac{\Delta h}{\Delta x} \quad (10)$$

A velocidade real é o componente advectivo na equação advectiva-dispersiva, especialmente importante na modelagem de transporte de massa de contaminantes em três dimensões.

2.1.3.4 Armazenamento em Aquíferos Freáticos e Confinados

O coeficiente de armazenamento é o volume de água que uma unidade permeável irá absorver ou liberar do armazenamento por unidade de área, quando há alteração da carga hidráulica. Este parâmetro é adimensional.

Nos aquíferos freáticos, o coeficiente de armazenamento é chamado vazão específica (S_Y) ou porosidade efetiva (η_{ef}). Nos aquíferos confinados, utiliza-se o coeficiente de armazenamento específico (S_s), quando a carga varia em três dimensões, e quando a abordagem hidráulica bidimensional é válida, utiliza-se apenas S .

O coeficiente de armazenamento específico é dado pela expressão:

$$S_s = -\rho_w g(\alpha + n\beta) \quad (1/L) \quad (11)$$

Onde ρ_w é densidade da água (M/L^3), g é aceleração da gravidade (L/T^2), α é a compressibilidade do aquífero ($1/(M/LT^2)$), n a porosidade (L^3/L^3) e β a compressibilidade da água ($1/(M/LT^2)$).

O coeficiente de armazenamento específico é utilizado em análises de aquíferos confinados em regime transiente. Em regime permanente toda a água bombeada dos poços provém de fontes externas (por exemplo, drenança de um aquífero sobreposto), não tendo contribuição do armazenamento.

Nos aquíferos confinados, submetidos frequentemente a altas pressões, a água que é liberada frequentemente é tomada da compressão do aquífero (α) e da expansão da água (β), à exceção de rochas cristalinas, onde a compressão da água¹ poderia ser mais significativa, o coeficiente de armazenamento específico depende, principalmente, da compressibilidade do aquífero, portanto, quanto mais compressível o aquífero maior o armazenamento específico.

Quando a água é bombeada de um aquífero confinado, o aquífero permanece totalmente saturado, sem drenagem dos espaços porosos, a carga potenciométrica permanece acima da unidade geológica. A água provém da compressão do aquífero e da recarga que recebe de aquíferos sotopostos ou sobrepostos, porém, se a taxa de bombeamento foi muito superior à taxa de recarga para o aquífero por um longo período de tempo, o poço pode passar a receber contribuição também do armazenamento. Além disso, caso o aquífero tenha uma quantidade significativa de material compressível (camadas e lentes de textura fina), o bombeamento excessivo pode ocasionar a subsidência da superfície do terreno.

O armazenamento (S) de um aquífero confinado é o produto do armazenamento específico (S_s) pela espessura do aquífero (b).

$$S = bS_s \quad (L/L) \quad (12)$$

¹ A compressibilidade da água em temperatura ambiente é $4,6 \times 10^{-10} \text{ m}^2/\text{N}$.

Em aquíferos não confinados o nível de saturação aumenta ou diminui com a mudança da quantidade de água no armazenamento. À medida que o nível d'água decresce a água é drenada dos poros do material geológico. O armazenamento então é função da vazão específica (s_y) e do armazenamento específico da unidade (s_s), através da relação:

$$S = S_y + hS_s \quad (13)$$

Onde h é a espessura da zona saturada.

Ocorre que, em aquíferos não confinados, o valor de " s_y " é muito maior, em várias ordens de grandeza que a expressão $h S_s$, por isso, usualmente se considera o armazenamento S igual a vazão específica (s_y) ou porosidade efetiva (η_{ef}).

2.1.4 Conceitos Básicos Hidráulica de Poços

2.1.4.1 Regimes Permanente e Transiente

Os termos regime permanente e transiente são bastante utilizados na hidráulica de poços na interpretação de testes de aquífero, onde se pretende determinar os parâmetros hidráulicos do aquífero estudado.

Ao se iniciar um bombeamento em determinado aquífero, no espaço tempo, ocorre um cone de rebaixamento no entorno do poço bombeado e a variação desse cone ao longo do tempo representa uma situação de regime transiente. Inicialmente a água é extraída do armazenamento, após determinado tempo, o cone pode atingir massas de águas superficiais ou drenanças a partir de outros aquíferos, e, a partir do momento em que a contribuição para o cone for igual entre o armazenamento e a fonte externa, ocorrerá uma estabilização do mesmo, passando então para o regime permanente (Figura 2).

O regime permanente é frequentemente referido para aquíferos livres, onde a contribuição pode vir tanto do armazenamento, quanto de fontes

externas. Já o regime transiente é frequentemente referido para aquíferos confinados, especialmente os não drenantes.

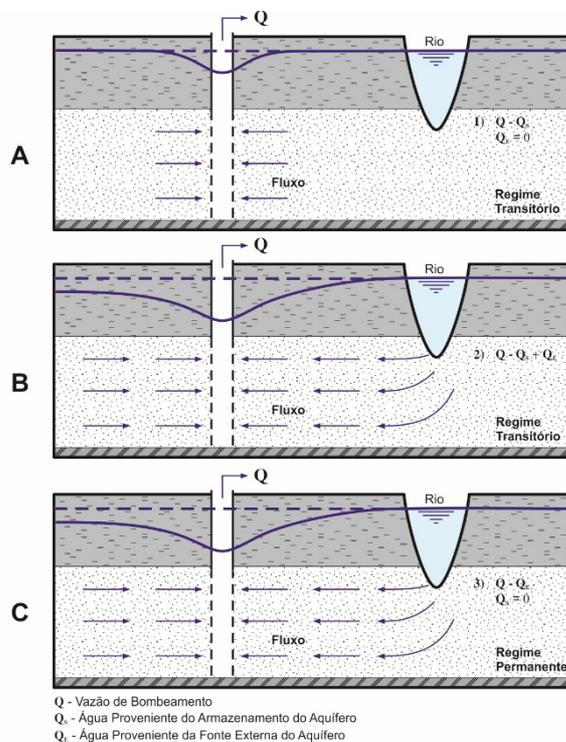


Figura 2 – Diferença entre Regime Transiente e Permanente em função da água extraída do próprio aquífero ou vinda de uma fonte externa (modificado de CUSTODIO&LLAMAS, 1983 *apud* CPRM, 2000).

2.1.4.2 Aquíferos Confinados: Parâmetros Hidráulicos

Na Figura 3 estão representados os parâmetros hidráulicos envolvidos no processo de bombeamento num aquífero confinado. Com base nessa Figura verifica-se que H_0 é altura da superfície potenciométrica estática, do poço não bombeando. Esse valor é obtido a partir da medida da boca do poço até o nível d'água, do poço não bombeando. A partir do momento que o poço começa a bombear, o nível d'água no poço vai aumentando a profundidade, até que as condições de equilíbrio sejam atingidas. A diferença entre o nível d'água antes de o poço estar bombeando e o nível d'água depois de atingidas condições de equilíbrio chama-se **cone de depressão**.

O cone de depressão expande-se até atingir o equilíbrio onde a recarga do aquífero se iguala a descarga proveniente do poço, contudo se as camadas confinantes do aquífero fossem impermeáveis, de tal modo, que não houvesse recarga / descarga, o cone de depressão poderia se expandir indefinidamente, pois a água estaria sendo removida do armazenamento (CLEARY, 1989).

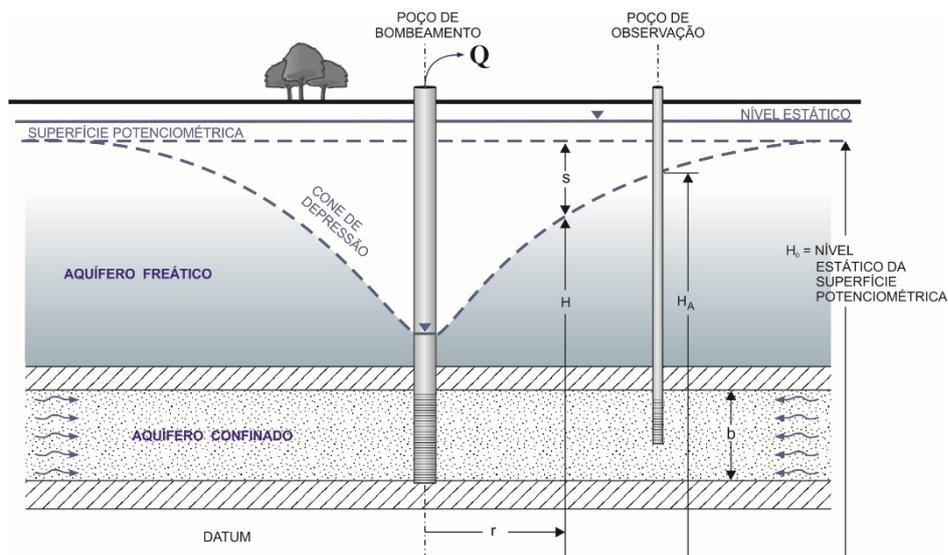


Figura 3 – Parâmetros Hidráulicos num Poço Bombeando um Aquífero Confinado (CLEARY, 1989).

O **rebaixamento** é a medida do quanto a carga ou potencial está fora de equilíbrio, na Figura 3 está representado por “s”. O rebaixamento num dado local de raio r é definido como a diferença entre o nível potenciométrico estático (H_0) e a carga (H), no local de mesmo raio.

$$s = H_0 - H \quad (14)$$

A Figura 3 trata-se ainda de um exemplo de poço de bombeamento **totalmente penetrante**, ou seja, onde a seção filtrante do poço atravessa toda a espessura do aquífero confinado. Já o poço de observação A, por exemplo, é chamado de **parcialmente penetrante**, pois o comprimento do filtro é menor que a espessura saturada do aquífero.

2.1.4.3 Aquíferos Freáticos: Parâmetros Hidráulicos

Na Figura 4 estão representados os parâmetros hidráulicos envolvidos no processo de bombeamento num aquífero freático. Nesse caso, o aquífero sofre drenança a partir dos espaços do meio poroso nas proximidades do poço.

Quando a superfície do lençol freático em um aquífero intercepta um contorno exposto à atmosfera, desenvolve-se uma face de drenança, que estará acima do nível d'água no poço bombeando.

Assim como nos aquíferos confinados, o cone de depressão no aquífero freático deverá expandir-se ate que a taxa de bombeamento se iguale a taxa de recarga, normalmente a partir da infiltração por precipitação.

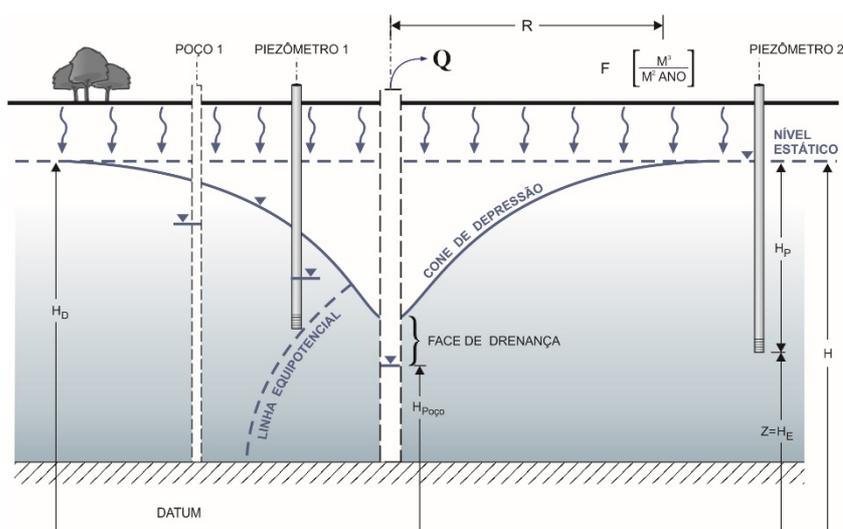


Figura 4 – Parâmetros Hidráulicos num Poço Bombeando um Aquífero Freático (CLEARY, 1989).

2.1.4.4 Métodos de Interpretação de Testes de Aquíferos

Os testes de aquífero têm por finalidade determinar os coeficientes hidrodinâmicos do meio poroso, tais quais transmissividade (T), coeficiente de armazenamento (S) e condutividade hidráulica (K). Durante os testes as variáveis monitoradas são vazão, rebaixamento nos poços e o tempo.

As condições físicas de cada tipo de aquífero (confinado não drenante, confinado drenante e livre), associadas ao comportamento da evolução dos rebaixamentos (regime permanente ou regime transiente) devem determinar o método adequado de interpretação dos testes de aquíferos, desenvolvidos por diversos autores ao longo dos anos.

Dentre os mais usuais, estão apresentados na Tabela 1 abaixo os métodos típicos de interpretação de testes de aquíferos.

Tabela 1. Métodos de Interpretação de Testes de Aquíferos em Função do Tipo de Aquífero e do Regime de Bombeamento

Regime de Bombeamento	Tipos de Aquíferos		
	Confinado não Drenante	Confinado Drenante	Livre
Permanente	THIEM	DE GLEE HANTUSH/JACOB	DUPOIT / THIEM
Transiente	THEIS COOPER	WALTON HANTUSH	THEIS c/ correção de JACOB BOULTON/PRICKET

Fonte: CPRM, 2000.

As fórmulas utilizadas para os métodos THIEM e THEIS, que serão utilizados neste trabalho, são apresentadas a seguir, retiradas do trabalho da CPRM (2000):

a) Método de Theis (aquífero confinado, não drenante, regime transiente)

O método costuma ser aplicado em um teste de aquífero com o acompanhamento de um poço de observação, contudo podem-se utilizar os dados de rebaixamento no próprio poço de bombeamento, nesse caso os dados fornecerão apenas uma ordem de grandeza dos valores de Transmissividade e armazenamento.

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (15)$$

Ou,

$$T = \frac{Q}{4\pi s} W(u) \quad (16)$$

E ainda,

$$S = \frac{4Tt_u}{r^2} \quad (17)$$

Onde:

T = Transmissividade (L^2/T)

Q = vazão de bombeamento (L^3/T)

s = rebaixamento a uma distância r do poço bombeado (L)

S = coeficiente de armazenamento (adimensional)

t_u = tempo a partir do início do bombeamento (T)

r = distância do poço bombeado ao ponto de rebaixamento s (L)

$W(u)$ = função de poço para aquífero confinado não drenante

Resumidamente, a aplicação do método consiste na construção de uma curva padrão de campo com os dados de rebaixamento (s) versus tempo (t), em papel log-log. Posteriormente, realiza-se a sobreposição desse

gráfico à curva padrão teórica (encontrada em livros texto), num ponto qualquer de sobreposição (preferencialmente valores inteiros de $W(u)$ e $1/u$ para facilitar os cálculos). Através da sobreposição dos gráficos, encontram-se os valores de $W(u)$, $1/u$, t , e s , e aplicam-se as equações (16) e (17) para obtenção dos valores de T e S , respectivamente.

Se o teste for feito somente no próprio poço de bombeamento, os dados, especialmente do armazenamento, não são confiáveis por necessidades de se estimar o valor de r para valores mínimos.

Finalmente, conhecendo-se a espessura do aquífero b , pode-se calcular a condutividade hidráulica K através da aplicação da expressão (8).

b) Método de Thiem (aquífero confinado, não drenante, regime permanente)

O método costuma ser aplicado em um teste de aquífero com o acompanhamento de, pelo menos, três poços de observação e seleção dos valores de rebaixamento para cada poço estabilizado.

Utilizando a expressão:

$$T = 0,366 \frac{Q}{\Delta s} \quad (18)$$

Onde:

T = Transmissividade (L^2/T)

Q = vazão de bombeamento (L^3/T)

Δs = variação do rebaixamento para um ciclo logarítmico (L)

O raio de influência é a distância para a qual o efeito do bombeamento de um poço é nulo. No regime permanente assume um valor constante, no regime transiente é em função do tempo de bombeamento e pode ser dado pela seguinte expressão:

$$R = 1,5\sqrt{\frac{Tt}{S}} \quad (19)$$

Onde:

R = Raio de influência, limite do cone de rebaixamento (L)

T = Transmissividade (L^2/T)

S = coeficiente de armazenamento (adimensional)

t = tempo a partir do início do bombeamento (T)

c) Método de Cooper - Jacob (aquífero confinado, não drenante, regime transiente)

Para valores de “ u ” muito pequenos, $u < 0,01$, os dois primeiros termos da equação de Theis é o suficiente para uma aproximação confiável de $W(u)$. Dessa forma, a equação fica:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \frac{0,561468}{\frac{r^2 S}{4Tt}} \quad (20)$$

Onde:

s = rebaixamento para um ciclo logarítmico (L)

T = Transmissividade (L^2/T)

Q = vazão de bombeamento (L^3/T)

R = Raio de influência, limite do cone de rebaixamento (L)

S = coeficiente de armazenamento (adimensional)

t = tempo a partir do início do bombeamento (T)

2.1.5 Reservas Hidrogeológicas: Conceitos

As estimativas de reservas hídricas e vazões sustentáveis têm sido um tema controverso entre diversos autores de diferentes países (CPRM, 2000).

No Brasil, a Agência Nacional de águas, ANA (2005), considera como **reservas permanentes** ou **seculares** aquelas que se situam abaixo da variação anual do nível freático, ou melhor, aquelas que não variam em função das precipitações anuais.

Para determinação dos volumes de reservas permanentes Costa (1998) propõe uma metodologia de cálculo, tanto para aquíferos livres quanto para aquíferos confinados ou semi confinados, em que se conhecem os parâmetros hidrodinâmicos a partir de ensaios de bombeamento.

a) Aquífero intersticial em bacias sedimentares

Para aquíferos livres, tem-se que:

$$R_{p1} = A_1 b \eta_{ef} \quad (21)$$

Onde, R_{p1} é a reserva permanente no aquífero intersticial de bacia sedimentar (m^3), A_1 é a área de ocorrência do aquífero (m^2) e b a espessura saturada do aquífero (m) e η_{ef} a porosidade eficaz do aquífero (adimensional).

Para aquíferos confinados ou semi confinados, tem-se que:

$$R_{p1} = (A_1 h S) + (A_1 b \eta_{ef}) \quad (22)$$

Sendo R_{p1} a reserva permanente no aquífero intersticial de bacia sedimentar, h a carga potenciométrica e S o coeficiente de armazenamento do aquífero confinado.

b) Aquífero intersticial aluvial

Conhecendo-se os parâmetros hidrodinâmicos, pode-se recorrer para a equação (21), caso contrário pode-se adotar para η_{ef} o valor de 10%, média da porosidade eficaz nesse tipo de aquífero.

$$R_{p2} = A_1 b (0,1) \quad (23)$$

Quando além da porosidade eficaz (η_{ef}) não se conhece o valor de b (espessura do aquífero), pode-se adotar o valor de 0,5 m, considerando que quase toda a água do depósito aluvial é percolada ou evaporada.

$$R_{p3} = A_1 (0,5)(0,1) = A_1 0,05 \quad (24)$$

Para estudos de bacias hidrográficas, quando não se conhecem os parâmetros dimensionais do aquífero, pode-se adotar 2% da área da bacia hidrográfica, com espessura saturada média de 0,5 m e porosidade efetiva de 10%.

$$R_{p4} = A_2 (0,02)(0,5)(0,1) = A_2 0,001 \quad (25)$$

Onde, A_2 é a área da bacia hidrográfica.

Para aquíferos fissurais ou cárstico-fissurais, as equações acima não são válidas, em função das variáveis envolvidas.

As **reservas reguladoras** ou **renováveis** correspondem ao volume de água armazenada no aquífero acima do nível freático mínimo, de forma geral, equivalente ao escoamento de base dos rios (contribuição do aquífero para os rios ao longo de um ciclo hidrológico), ou seja, o valor de recarga dos aquíferos (ANA, 2005). Estas reservas estão sujeitas ao efeito da sazonalidade e precipitação anual (CPRM, 2000).

Segundo Costa (1998) a reserva reguladora trata-se do volume hídrico dependente da porosidade eficaz ou coeficiente de armazenamento, variável

anualmente em decorrência dos aportes sazonais para os recursos hídricos superficiais, do escoamento subterrâneo e dos exutórios.

A seguir está descrita a metodologia proposta por Costa (1998) para o cálculo e determinação de reservas reguladoras, quando se conhecem as características hidrodinâmicas, ou quando se tem pouca informação sobre a reserva.

a) Aquífero intersticial em bacias sedimentares

Tendo-se um mapa potenciométrico e conhecendo-se a condutividade hidráulica do aquífero, é possível calcular a vazão de escoamento natural (VEN):

$$R_{r1} = VEN = Kbli \quad (26)$$

Onde, R_{r1} é a reserva reguladora do aquífero (m^3/ano), K é condutividade hidráulica (m/ano), b a espessura saturada (m), l a largura da frente do escoamento (m) e i o gradiente hidráulico medido entre as curvas potenciométricas (adimensional).

Outra possibilidade de cálculo é a partir da variação das superfícies potenciométricas, ou flutuação do nível freático, quando há registros da variação do nível estático da água nos poços existentes:

$$R_{r1} = A_3 \Delta s \eta_{ef} \quad (27)$$

Sendo A_3 a área de recarga do aquífero (m^2), S o rebaixamento médio anual da água nos poços (m) e η_{ef} a porosidade efetiva do aquífero (em camadas arenosas pode ser considerada 0,1 quando não há dados de ensaios de bombeamento).

As reservas reguladoras também podem ser estimadas, quando há infiltrômetros instalados na área:

$$R_{r1} = A_4 h' \quad (28)$$

Onde A_4 é a área do infiltrômetro (m^2) e h' é a altura da coluna d'água medida no infiltrômetro (m).

Conhecendo-se a taxa de infiltração, calcula-se a reserva reguladora por:

$$R_{r1} = A_1PI \quad (29)$$

Onde P é precipitação pluviométrica média anual na área (m/ano) e I a taxa de infiltração. As equações 28 e 29, no entanto, não são muito recomendadas, visto que, conceitualmente, a recarga na verdade corresponderá a uma fração da taxa de infiltração.

b) Aquífero intersticial aluvial

Conhecendo-se os valores de escoamento de base do rio na curva de recessão – hidrograma – a contribuição da água subterrânea corresponde à reserva reguladora.

Tendo os valores de variação de níveis dos poços rasos no depósito aluvial encontra-se a reserva reguladora da mesma forma que para os aquíferos sedimentares.

Quando não se conhece a espessura do aquífero (equação 1), pode-se admitir o valor de 1,0 para b , com porosidade eficaz (η_{ef}) de 10%, de forma que se obtenha um aproveitamento de 60%, a equação 21 fica:

$$R_{r2} = A_2(1,0)(0,1)(0,6) = A_20,06 \quad (m^3/ano) \quad (30)$$

Para estudos de bacias hidrográficas, quando não se conhecem os parâmetros dimensionais do aquífero, pode-se adotar 2% da área da bacia hidrográfica, com espessura saturada média de 0,5 m para b e porosidade efetiva de 10%, com aproveitamento de 60%.

$$R_{r2} = A_2(0,02)(0,1)(0,6) = A_20,12 \quad (m^3/ano) \quad (31)$$

Onde, A_2 é a área da bacia hidrográfica.

Para aquíferos fissurais ou cárstico-fissurais, pode-se admitir uma taxa de infiltração como 0,15% da precipitação, sendo a reserva reguladora o produto dessa lâmina d'água pela área da bacia hidrográfica.

$$R_{r,3} = A_2(0,0015)P \text{ (m}^3\text{/ano)} \quad (32)$$

As **reservas totais** ou **naturais** são o somatório das reservas permanentes e reguladoras, constituindo o volume total de água existente no sistema aquífero (CPRM, 2000).

Conceitualmente, a ANA (2005) considera que as **reservas exploráveis** de aquífero correspondem a uma parte da reserva reguladora, e pequena fração da reserva permanente. Entretanto, um conceito mais adequado e sustentável seria que as reservas de exploração constituem a quantidade máxima de água que poderia ser retirada do aquífero, sem prejuízos ao manancial (CPRM, 2000).

Hidrológos americanos conceituam ainda mais a fundo, considerando essas reservas exploráveis "*safe yield*" como a quantidade que pode ser retirada regularmente e permanentemente sem danos de depleção da reserva armazenada (FETTER, 1994).

A CPRM (2000) citando vários autores (Young, 1970, Wisscher, 1968, Custodio & Llamas, 1983) lista uma série de efeitos indesejáveis a serem evitados na determinação das vazões exploráveis dos aquíferos, sob os diferentes pontos de vista, tais quais:

- Hidrológico: que se exceda a recarga média anual, pois um aumento no bombeamento provoca aumento da recarga;
- Econômico: que os níveis piezométricos desçam abaixo da profundidade econômica de bombeamento e que provoquem exaustão do aquífero.
- Qualidade: que se permita entrada de água de qualidade não desejada para o uso preponderante;

- Legal: que não sejam afetados outros usuários vizinhos, em função da redução da disponibilidade ou alteração da qualidade da água, ou ainda alteração da recarga de base dos rios;
- Agrícola: rebaixamentos excessivos que provoquem prejuízos na paisagem e cultivos típicos da região;
- Morfológico e Geotécnico: que não provoquem subsidência de terrenos, com efeitos adversos.

A CPRM (2000) define por **potencialidade hídrica** como o volume de água que pode ser utilizado anualmente (reserva reguladora) e parte da reserva permanente, passíveis de serem exploradas, dessa forma, o conceito de “reservas exploráveis” está diretamente relacionado ao conceito de “potencialidade”, podendo ser considerados sinônimos.

Segundo Costa (1998), no cálculo das potencialidades pode-se considerar 20% das reservas permanentes no somatório com as reservas reguladoras, e convencionalmente, os técnicos adotam essa metodologia.

Na área no Polo Petroquímico, em trabalhos internos realizados pela CETREL (2012), adotou-se o critério de utilizar as reservas exploráveis como a reserva reguladora somada a cerca de 30% da reserva permanente em um período de 50 anos, ou seja, 0,6% ao ano da reserva permanente.

De forma conservadora, a ANA (2005), no trabalho realizado de cálculo de demandas e disponibilidade hídrica de águas subterrâneas no Brasil, considera que as reservas exploráveis correspondam apenas 20% das reservas reguladoras, desconsiderando assim o uso das reservas permanentes.

Em suma, o critério de reservas exploráveis a ser adotado deve considerar as especificidades da reserva hidrogeológica avaliada, levando-se em conta estudos pretéritos dessas reservas e argumentações dos hidrólogos teóricos, buscando aliar a técnica às questões econômicas e sociais dos usuários, de forma a agregar o conceito de sustentabilidade hídrica em longo prazo.

Adicionalmente, deve-se separar o conceito de reservas exploráveis (potencialidades) do conceito de **disponibilidade hídrica**, o qual trata do volume que pode efetivamente ser extraído a partir das reservas exploráveis, levando-

se em conta as perdas por percolação e evaporação, a capacidade específica do aquífero e obras de instalação de poços.

2.2 Modelos Hidrogeológicos

2.2.1 Modelos Conceituais X Numéricos

Os modelos conceituais são construídos de modo a explicar determinado fenômeno na natureza de forma simplificada, através de recursos matemáticos e visuais que auxiliem na compreensão e visualização de determinado problema.

Para as águas subterrâneas os modelos são frequentemente aplicados para estudar questões relacionadas à disponibilidade hídrica e à qualidade do recurso hídrico para os usos pretendidos e sua função dentro do ecossistema.

É importante destacar a diferença entre os termos utilizados na modelagem hidrogeológica. Os modelos conceituais são estáticos, pretendem representar a geologia / hidrogeologia do meio e descrição do fluxo (recarga / descarga). São importante base para a construção dos modelos numéricos, cujo principal objetivo é realizar previsões futuras do comportamento de um sistema, mediante interferências externas (NOBRE, 2006).

2.2.2 Modelos Numéricos

Os modelos numéricos para águas subterrâneas combinam três princípios fundamentais: o da conservação de massa, conservação de energia e da Lei de Darcy. Devem ser aplicados em casos onde as condições de contorno são complexas e há uma variação de parâmetros extensa para a área modelada (VAN DER HEIJDE ET. AL., 1985 *apud* FETTER, 1994).

Dentre as diversas aplicações dos modelos matemáticos, incluem-se investigação de alternativas para locação de poços de abastecimento, e determinação de zonas seguras de proteção dos poços sob condições de heterogeneidades e anisotropia, bem como a otimização do gerenciamento dos recursos de água subterrânea (CLEARY, 1989). Outras aplicações associadas

à simulação de transporte de contaminantes e avaliação de alternativas de remediação de águas subterrâneas constituem importantes ferramentas para a construção de modelos conceituais de remediação e de tomada de decisão por órgãos e gestores ambientais.

Apesar de se tratar de uma importante ferramenta, que amplia o conhecimento técnico e científico do fenômeno estudado, os modelos numéricos são aproximações da realidade e podem chegar a resultados bastante diversos a depender dos parâmetros considerados e da capacidade de análise do modelador. Os modelos tentam simplificar um sistema complexo, portanto seus resultados trazem incertezas que devem ser conhecidas pelo modelador e pelos técnicos que utilizam seus resultados em processos de tomada de decisão.

Por exemplo, no processo de modelagem, as equações são tão importantes quanto o modelo conceitual construído em etapa anterior, pois terão importância fundamental na construção das condições de contorno do fenômeno, uma vez que determinam e condicionam a resposta do modelo ao sistema (NOBRE, 2006).

Os métodos numéricos mais comumente usados são o método de diferenças finitas (MDF) e o método de elementos finitos (MEF). Uma ênfase será dada ao método das diferenças finitas, utilizado pelo MODFLOW, modelo de interesse para este trabalho.

2.2.3 Equação Geral do Fluxo

Com a aplicação do princípio da conservação de massa (ou da continuidade) e a Lei de Darcy a um volume elementar representativo de um aquífero, pode-se derivar a equação diferencial parcial, tridimensional, heterogênea, anisotrópica e de estado não estacionário, para a distribuição da carga. Ao volume elementar de um aquífero dá-se o nome de *volume de controle*, expresso em $\Delta x \Delta y \Delta z$, e o fluxo de água, através do volume de controle, é expresso em três componentes de q : q_x , q_y , q_z .

$$q = q_x i_x + q_y i_y + q_z i_z = -K \nabla h \quad (33)$$

Onde, i_x, i_y, i_z são vetores unitários nas três direções cartesianas (Figura 5).

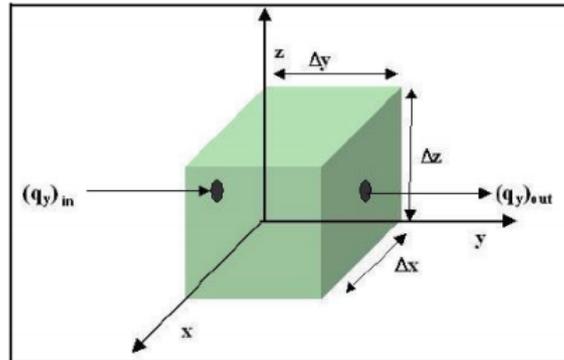


Figura 5 – Volume Elementar de Controle Representativo da Equação Geral de Fluxo (modificado de Fetter, 1994).

O balanço de massa ao longo do eixo y pode ser representado por:

$$\text{Balanço de massa} = \rho [(q_y)_{out} - (q_y)_{in}] \Delta x \Delta y \Delta z \quad (34)$$

Ou na forma diferencial,

$$\text{Balanço de massa} = \rho \frac{\partial q_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (35)$$

Portanto, a variação de massa no sistema, para as componentes x, y, e z, é dada pela diferença entre a massa que entra e a massa que sai e com a soma dos três termos obtêm-se o armazenamento interno ao volume elementar, dado por:

$$\text{Variação armazenado} = \rho \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (36)$$

Supondo que exista uma fonte ou sumidouro, designado por W , onde W será positivo se a água for adicionada ao aquífero e negativo se a água for retirada do aquífero, a expressão fica:

$$\text{Variação}_{\text{armazenamento}} = \rho \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - W \right) \Delta x \Delta y \Delta z \quad (37)$$

A variação no armazenamento também pode ser representada pelo parâmetro de armazenamento específico (S_s), através da equação:

$$S_s = - \frac{\Delta V}{\Delta h \Delta x \Delta y \Delta z} \quad (38)$$

Em que a variação de volume de água por unidade de tempo pode ser dada pela expressão:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (39)$$

Substituindo o termo $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ na equação (36) e considerando que a densidade do fluido possa variar com o tempo, em determinado tempo t , qualquer, ela será a mesma em todo domínio elementar, têm-se que:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - W = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (40)$$

Onde h é o potencial hidráulico ou carga hidráulica do aquífero.

Finalmente, considerando a Lei de Darcy nas três dimensões:

$$q_x = -K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad q_y = -K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad q_z = -K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \quad (41)$$

Onde K_{ij} é o tensor de condutividade hidráulica em 9 componentes, e substituindo os termos indicados em (40) na equação da continuidade nas três dimensões (39), tem-se a equação geral de fluxo transiente em um meio anisotrópico.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W(x, y, z, t) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (42)$$

Para **aquíferos confinados**, a componente vertical deixa de ser considerada, obtendo-se a equação de fluxo em duas dimensões. Com a integração da equação (41) na direção z tem-se que:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(T_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(T_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) - W = -S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (43)$$

Onde, T_{xx} ($K_{xx}b$) e T_{yy} ($=K_{yy}b$) são parâmetros de transmissividade (m^2/s), nas direções x e y , respectivamente; b é a espessura do aquífero e S ($=S_s b$) é o coeficiente de armazenamento (m/m). O termo W pode representar a recarga do aquífero, mas também fonte ou sumidouros no sistema, como poços de extração, drenança entre aquíferos, dentre outros.

Na zona saturada, a carga cria pressão, afetando o arranjo mineral dos grãos assim como a densidade da água nos vazios. Se a pressão se eleva, o arranjo mineral deverá expandir, se a pressão diminui o arranjo mineral irá comprimir. Esse fenômeno é conhecido como elasticidade. Da mesma forma, a água será comprimida com o aumento da pressão, e irá expandir com a redução da pressão. Quando a carga do aquífero declina, o aquífero se comprime, o que reduz a porosidade efetiva e expelle água (FETTER, 1994).

Em **aquíferos não confinados**, portanto, ocorre uma alteração da espessura saturada com o tempo, e conseqüente alteração da transmissividade

com o tempo. Dessa forma, a equação geral de fluxo em duas dimensões para aquíferos não confinados é conhecida como **equação de Boussinesq** (1904), solo isotrópico:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(b \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(b \frac{\partial h}{\partial y} \right) - W = - \frac{S_y}{K} \frac{\partial h}{\partial t} \quad (44)$$

Onde S_y é o coeficiente de armazenamento específico ou porosidade efetiva η_{ef} .

2.2.4 Método de Diferenças Finitas (MDF) e de Elementos Finitos (MEF)

Os dois métodos, MDF e MEF, se propõem a calcular derivadas parciais de equações diferenciais, cujas variáveis são discretizadas no espaço, x, y, z. O MDF é uma representação discretizada em um ponto, já o MEF é uma representação discretizada no espaço (CLEARY, 1989).

Os modelos numéricos, por diferenças finitas, na hidrogeologia, têm como objetivo calcular o valor da carga hidráulica em cada nó das células discretizadas com o auxílio de uma malha com elementos tridimensionais, regulares ou não, denominadas malha de diferenças finitas (NOBRE, 2006). Para o cálculo da carga em locais que não coincidem com o nó, deve-se utilizar metodologia de interpolação.

A Tabela 2 mostra as principais diferenças entre os métodos, destacados por Cleary (1989).

Tabela 2. Método de Diferenças Finitas versus Método de Elementos Finitos

MDF	MEF
Representação discretizada em um ponto	Representação discretizada em uma área
Valores de carga fora no nó devem ser interpolados	Valores de carga fornecidos para todo o domínio
O poço raramente coincide com o nó	O poço pode estar localizado virtualmente no seu local físico
Condições de contorno menos precisas que no MEF	Condições de contorno mais precisas que no MDF
Trata geologia anisotrópica bem quando as direções principais de condutividade hidráulica são paralelas aos eixos x e y da malha	Quando ocorrer anisotropia, com cada uma das direções principais diferentes, é o método mais apropriado

Fonte: (CLEARY, 1989).

2.2.5 Modelo Numérico de Fluxo MODFLOW

Desenvolvido originalmente por McDonald e Harbaugh em 1984, o MODFLOW é um modelo numérico de fluxo de águas subterrâneas por diferenças finitas (MDF). É um modelo tridimensional e pode ser utilizado para aquíferos livres, confinados ou a combinação dos dois (FETTER, 1994). O modelo simula recarga, evapotranspiração, fluxo em poços, drenagens e rios, em uma série de módulos separados.

Dentre as aplicações típicas do MODFLOW, pode-se citar: cálculo de interferência entre poços, projetos de capacidade de poços, recarga artificial, sustentabilidade de aquíferos, tempo de trânsito das águas subterrâneas, delimitação de áreas de proteção de poços, análise de zonas de captura de

poços, projetos de remediação de águas subterrâneas, estudos de impactos ambientais.

O MODFLOW pressupõe fluxo saturado, meio poroso, temperatura e densidade uniforme e, não resolve fluxo dependente da densidade (ex. intrusões salinas), fluxo multifásico (ex. DNAPL + água), sistemas onde há variações elevadas de anisotropia e meios fraturados (a menos que possam ser assumidos como meios porosos).

Basicamente, o MODFLOW resolve a equação diferencial de fluxo usando o método de diferenças finitas:

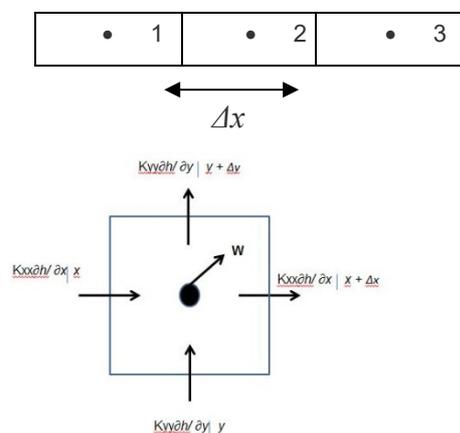
$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W(x, y, z, t) = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (45)$$

Em regime estacionário: $\frac{\partial h}{\partial t} = 0$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W(x, y, z, t) = 0 \quad (46)$$

Como princípio básico substitui-se a diferença infinitesimal, ∂x , pela diferença finita, mensurável, Δx :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) = \frac{1}{\Delta x} \left[\frac{K(h_3 - h_2)}{\Delta x} - \frac{K(h_2 - h_1)}{\Delta x} \right] \quad (47)$$



2.3 Aspectos Gerais da Outorga

2.3.1 Fundamentação Teórica da Outorga

Segundo Ribeiro & Lanna (2001), a política ambiental de um país se utiliza de dois tipos de instrumentos principais para controle das atividades econômicas impactantes e preservação de seus recursos naturais. São eles os instrumentos econômicos e os instrumentos regulatórios.

Os instrumentos econômicos têm o objetivo de valorar os efeitos colaterais provenientes da produção ou uso de bens e serviços que atingem a terceiros e não aos agentes envolvidos. Como exemplos, os sistemas de cobrança, taxas e seguros ambientais, multas, etc.

Os instrumentos regulatórios ou normativos visam estabelecer os padrões e monitoramento da qualidade ambiental, regulando as atividades e aplicando sanções e penalidades, via legislação e normas. Como exemplos de instrumentos regulatórios estão os padrões, licenciamentos, zoneamentos ambientais, estudos de impacto ambiental, etc.

Na gestão de recursos hídricos, um importante instrumento regulatório é a outorga do direito de uso da água, que consiste em um ato administrativo, de autorização, mediante o qual o poder público outorgante faculta ao outorgado previamente ou mediante o direito de uso de recursos hídricos, por prazo determinado, nos termos e nas condições expressas no respectivo ato, consideradas as legislações vigentes (CNRH, 2001).

Em geral, as doutrinas que regem o direito de uso dos recursos hídricos subterrâneos variam conforme o país e as leis vigentes. As formas mais comuns de direito de uso de recursos hídricos são a Outorga Ripária (*riparian*), Outorga Comercializável e a Outorga Controlada (RIBEIRO & LANNA, 2001).

A doutrina que predomina em grande parte dos Estados americanos é a doutrina das apropriações ribeirinhas (*riparian*) onde os direitos de uso das águas são inerentes à propriedade da terra ribeirinha (SILVA & MONTEIRO, 2010). Contudo em grande parte dos Estados americanos, essa doutrina é aplicada de forma integrada às doutrinas que priorizam o uso racional do

recurso, levando em consideração os demais usuários instalados na área de influência do aquífero em questão (SANJAYA RAJ JOSHI, 2005).

Outra doutrina utilizada pelos Estados americanos é a de apropriação prévia, onde o domínio das águas subterrâneas é dos Estados, responsável por fornecer o direito de uso das águas. Nesse sistema de apropriação prévia o primeiro a solicitar a propriedade tem prioridade de uso, em detrimento dos demais usuários do corpo hídrico (*First in time is first in right*) (SANJAYA RAJ JOSHI, 2005).

Em alguns Estados o controle do governo ajuda a promover o uso racional do recurso, como no Arizona, Mississippi, New York, South Carolina, New Hampshire, Oklahoma, Michigan, Ohio e Wisconsin.

Na outorga comercializável, é atribuído o direito de uso da água, como um bem de mercado, regido pelas leis de oferta e procura que pode ser vendida, alugada ou leiloada (MATOS, 2004). Um exemplo desse tipo de experiência é o caso chileno, onde se optou por esse modelo na tentativa de se economizar o dinheiro público no investimento em infraestrutura para fornecimento de água e tratamento de esgot, contudo ainda se encontram dificuldades na regulamentação dos processos de direito e prioridade de uso dos recursos (CASTRO, 2012).

Na França, a Lei da Água, instituída em 1964, criou os comitês/agências de bacia e a cobrança pelo uso da água, nesse aspecto sendo bastante semelhante ao modelo brasileiro (CASTRO, 2012), inclusive em relação à gestão do Estado para liberação das outorgas de direito de uso.

Como destaca Silva & Monteiro (2010) a doutrina de apropriações ribeirinhas (*riparian*) é utilizada no Brasil, mesmo que informalmente, uma vez que as transações comerciais de propriedades rurais são tão mais valorizadas quanto na presença do recurso hídrico, como se a transferência da propriedade também incluísse a transferência do uso da água disponível, muitas vezes sem compromisso com os usuários de jusante.

A legislação ambiental do Brasil, no entanto, se utiliza do modelo de Outorga Controlada, onde o poder público tem o domínio sobre o direito de uso

dos recursos hídricos, sendo responsável pela liberação e controle de outorgas (RIBEIRO & LANNA, 2001).

2.3.2 *Outorga - Âmbito Federal*

Com a aprovação da Lei Federal nº. 9.433/97 (BRASIL, 1997), foi instituída a Política Nacional de Recursos Hídricos e criado o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos como suporte para a implementação da Política Nacional.

A Lei nº. 9.433/97 (BRASIL, 1997), em seus fundamentos (art. 1º), reconhece a água como um recurso natural, limitado, dotado de valor econômico, cujo domínio é público. Determina também que sua gestão deve ser descentralizada e participativa, devendo sempre proporcionar o uso múltiplo dos recursos hídricos.

Com base na supracitada Lei Federal o direito de uso dos recursos hídricos configura-se como um dos instrumentos mais relevantes. A Lei prevê o controle de todos os usos pelo Poder Público, com o objetivo de garantir sustentabilidade da água em qualidade e quantidade para usos múltiplos.

Segundo o art. 15 da Lei 9.433/97, serão cobrados os usos da água, sujeitos à outorga, pelo Poder Público, e em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos deve ser o consumo humano e a dessedentação de animais.

Conceitualmente, apesar de interligados, os instrumentos de outorga e cobrança estão dissociados um do outro. A metodologia de cálculo para cobrança, por exemplo, considera o uso efetivo do recurso, o que muitas vezes é difícil de mensurar e fiscalizar. Adiciona-se a questão de que as vazões outorgadas para determinada bacia já estão “comprometidas” com os usuários, limitando-se o uso do recurso naquele local, incentivando usuários a outorgar volumes muito maiores que os volumes efetivamente utilizados, como garantia “futura” de suas reservas. Na maioria dos Estados brasileiros o processo de cobrança ainda não está institucionalizado, apenas em algumas bacias de domínio dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Minas Gerais, Paraná e Paraíba.

No Estado da Bahia, as discussões sobre a forma de cobrança estão sendo conduzidas pelos comitês das bacias hidrográficas, havendo forte tendência a associar a cobrança ao processo de outorga.

A competência para a emissão dos atos de outorga das águas superficiais é da União, dos Estados e do Distrito Federal, e a das águas subterrâneas é dos Estados e do Distrito Federal. Quanto às águas minerais, a competência é atribuída ao Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), vinculado ao Ministério de Minas e Energia.

Vale ressaltar a existência, no meio acadêmico e jurídico, de certa discordância em relação ao domínio das águas subterrâneas, visto que alguns aquíferos que se situam subjacentes a dois ou mais estados da federação, poderiam ser considerados bens da União, assim como são consideradas as águas superficiais que banham mais de um estado.

Ressalta-se ainda que o planejamento dos recursos hídricos deve envolver as inter-relações entre as águas superficiais e subterrâneas, visto que ações em um recurso podem interferir no outro.

A dominialidade das águas subterrâneas é dos Estados, entretanto para que a gestão seja integrada, uma vez que aquíferos quase sempre ultrapassam os limites das bacias hidrográficas, estados e países, é necessário um suporte legal federal, que para o Brasil é representado pelo Programa Nacional de Águas Subterrâneas (PNAS), cujas premissas devem ser consideradas nos Programas Regionais de Recursos Hídricos (COSTA, 2009).

Esse programa é dividido em três subprogramas (MMA/SRHU, 2008), como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Programa Nacional de Águas Subterrâneas

Subprogramas	Ações
Ampliação do Conhecimento Hidrogeológico	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Estudos e Projetos para aquíferos de abrangência transfronteiriça e interestadual ➤ Estudos e projetos em escala local ➤ Monitoramento quali-quantitativo das águas subterrâneas
Desenvolvimento dos Aspectos Institucionais e Legais	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Promoção da Gestão Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) com ênfase nas águas subterrâneas em âmbito intersetorial; ➤ Adoção de mecanismos para a promoção da GIRH em aquíferos que abrangem a área de mais de uma bacia hidrográfica, interestaduais e transfronteiriços; ➤ Discussão dos instrumentos de gestão de recursos hídricos e sua aplicação em gestão de águas subterrâneas e o fortalecimento das estruturas institucionais a nível estadual.
Capacitação, Comunicação e Mobilização Social	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Promoção de ações que visem a inserção da temática de águas subterrâneas nos espaços de educação ambiental, difusão de informações e mobilização social, assim como a promoção de capacitação específica no tema

Fonte: (MMA/SRHU, 2008).

2.3.3 Outorga - Âmbito Estadual

Apesar dos Estados brasileiros possuírem Leis Estaduais que regulamentam a política para recursos hídricos, o processo de regulamentação do instrumento da outorga de direito de uso de recursos hídricos vem ocorrendo de forma mais gradual ao longo dos anos e se consolidando na última década, através da publicação de manuais, decretos e portarias, especialmente em função da experiência e conhecimento das bacias adquiridos pelos órgãos outorgantes ao longo dos anos.

Nos estados brasileiros há uma variação significativa quanto aos critérios de outorga de águas subterrâneas. Enquanto que em alguns estados como Distrito Federal, Mato Grosso, Paraná, Pernambuco, Rondônia, São Paulo se consideram aspectos do poço e/ou estudos hidrogeológicos dos aquíferos, outros estados, como Espírito Santo, Rio Grande do Sul, dentre outros, consideram aspectos mais subjetivos como os princípios da legislação, fatores

econômicos e sociais. A Tabela 4, modificada de Costa (2009) e Silva *et al* (2008) resumem bem esses critérios.

Em pelo menos 14 Estados, mais o Distrito Federal, são especificados critérios associados à potencialidade hídrica das reservas subterrâneas em suas legislações, estando em consonância com a diretriz básica da Lei Federal 9.433/97 em garantir a sustentabilidade em qualidade e quantidade para usos múltiplos.

O Estado de Pernambuco e o Distrito Federal têm estudos que embasaram o zoneamento hídrico de suas reservas, estabelecendo critérios de uso e restrição, conforme zona a ser explorada.

Em pelo menos 12 Estados são solicitados testes de vazão para determinação da vazão nominal e utilização desse critério para liberação da outorga. Mesmo nos Estados onde não há especificado esse critério, acredita-se que é o procedimento mais comumente utilizado pelos hidrogeólogos, utilizar a vazão nominal do poço como critério para liberação da outorga.

Para dispensa da outorga, a maioria dos Estados os critérios se baseia em características do aquífero, vazão captada e diâmetros dos poços (a serem determinados pelas autoridades outorgantes), no entanto, nem sempre as especificações são baseadas em estudos técnicos adequados, devido à dificuldade de investimentos em estudos hidrogeológicos das bacias (SILVA *et al*, 2008). Vale ressaltar que mesmo nos casos de dispensa de outorga, o cadastro dos solicitantes deve ser realizado no órgão outorgante, no intuito de formação de banco de dados consistente para avaliação de produtividades e possíveis interferências entre poços.

No Estado do Ceará, por exemplo, devido à ausência de dados hidrogeológicos dos aquíferos fissurais e dificuldade em se efetuar estimativas das reservas subterrâneas, são liberados de outorga poços com vazões inferiores a 2.000 L/h, ou seja, grande parte dos poços da região cristalina do Estado é dispensado de outorga, o que resulta na perda de informações que poderiam contribuir para o conhecimento das reais potencialidades do aquífero (STUDART & VIEIRA, 2015).

Tabela 4. Critérios de Outorga de Águas Subterrâneas – Legislações Estaduais

Estado	Documento	Título	Critérios de Outorga de Águas Subterrâneas
Acre	Lei nº. 1.500/03	Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, cria o Sistema Estadual de gerenciamento de Recursos Hídricos.	- Mesmas diretrizes gerais contidas na Lei Federal nº. 9.433/97
Alagoas	Decreto nº. 6/01	Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos prevista na Lei nº 5.965 de 10 de novembro de 1997.	- Capacidade de recarga do aquífero fundamentada em estudo hidrogeológico específico. - Interferência provocada pelo poço ou poços circunvizinhos.
Amapá	Lei nº. 0686/02	Dispõe sobre a Política de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Estado do Amapá e dá outras providências	- Mesmas diretrizes gerais contidas na Lei Federal nº. 9.433/97
Amazonas	Lei no. 2.712/01	Disciplina a Política Estadual de Recursos Hídricos, estabelece o sistema Estadual de Recursos Hídricos.	- Mesmas diretrizes gerais contidas na Lei Federal nº. 9.433/97
Bahia	Decreto nº. 6.296/97	Dispõe sobre a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, infração e penalidades.	- Pouco detalha sobre outorga para recursos hídricos subterrâneos
Ceará	Decreto nº. 23.067/94	Regulamenta o artigo 4º da Lei nº 11. 996, de 24 de julho de 1992, na parte referente à outorga do direito de uso dos recursos hídricos.	- Vazão nominal de teste do poço - Capacidade de recarga do aquífero
	Decreto nº. 23.068/94	Regulamenta o controle técnico das obras de oferta hídrica e dá outras providências.	- Classificação de poços quanto à profundidade e quanto à vazão nominalmente de teste.
Distrito Federal	Decreto nº. 22.018/01	Dispõe sobre a outorga e a cobrança pelo direito de uso da água subterrânea no território do Distrito Federal.	- Potencial do respectivo aquífero - Estudos hidrogeológicos existentes
	Decreto nº 22.358/01	Dispõe sobre a outorga de direito de uso de água subterrânea no território do Distrito Federal.	- Vazão nominal de cada poço tubular - Vazão de segurança de cada subsistema aquífero - Características hidrogeológicas de cada subsistema aquífero

Espírito Santo	Lei nº. 6.295/00	Dispõe sobre a administração, proteção e conservação das águas subterrâneas do domínio do Estado e dá outras providências.	<ul style="list-style-type: none"> - Objetivos do Plano Estadual de Recursos Hídricos - Fatores Econômicos - Fatores Sociais
Goiás	Lei nº. 13.583/00	Dispõe sobre a conservação e proteção ambiental dos depósitos de água subterrânea no Estado de Goiás.	- Características hidrogeológicas dos diversos aquíferos susceptíveis de aproveitamento
Maranhão	Decreto nº. 28.008/12	Regulamenta Lei no. 8,149, de 15 de junho de 2004 e a Lei no. 5.405, de 08 de abril de 1992, com relação às águas subterrâneas e dá outras providências.	- Estudos hidrogeológicos para avaliação do potencial de suas reservas hídricas.
Mato Grosso	Lei nº. 8.097/04	Dispõe sobre a Administração e a Conservação das Águas Subterrâneas.	<ul style="list-style-type: none"> - Estudos hidrogeológicos - Projetos de obras de captação
Mato Grosso do Sul	Lei nº. 2.406 29/01/2002	Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos	<ul style="list-style-type: none"> - Duas Etapas: Outorga Preventiva (autorização de perfuração de poço) e Outorga Final - Reserva explotável do aquífero e disponibilidade real
	Decreto Estadual nº. 13.990 02/07/2014	Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos prevista na Lei nº. 2.406 de 29 de janeiro de 2002.	- Teste de produção contínuo, com vazão constante e duração não inferior a 24 (vinte e quatro) horas, seguido de recuperação.
	Manual da Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos - Dezembro/2015	Orienta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, quanto a critérios e procedimentos.	- Distância mínima entre poços: 200 m ou execução de teste de interferência entre poços
Minas Gerais	Lei nº. 13.771/00	Dispõe sobre a administração, a proteção e a conservação das águas subterrâneas de domínio do Estado.	<ul style="list-style-type: none"> - Fatores Econômicos - Fatores Sociais
	Lei nº. 13.199/99	Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, e adota outras providências.	- Teste de bombeamento e duração não inferior a 24 (vinte e quatro) horas, seguido de recuperação.
	Portaria IGAM nº 49/2010	Estabelece procedimentos para regularização do uso de recursos hídricos do domínio de Estado de Minas Gerais	- Execução de teste de interferência entre poços, se houver poços próximos.
	Manual da Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos - 2010	Orienta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, quanto a critérios e procedimentos.	- Caracterização hidrogeológica e estudo de vulnerabilidades por parte dos usuários.

Pará	Resolução nº. 10/10	Dispõe sobre os critérios para análise de outorga preventiva e de direito de uso de recursos hídricos, e dá outras providências.	- A vazão de outorga será de 80% da vazão nominal obtida em teste de produção, num regime de 20 horas
Paraíba	Decreto nº. 19.260/97	Regulamenta a Outorga do Direito de Uso dos Recursos Hídricos.	- Vazão Nominal de Teste de poço - Capacidade de recarga do aquífero
Paraná	Lei nº. 12.726/99	Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos e adota outras providências.	- Estudos hidrogeológicos para avaliação do potencial de suas reservas hídricas.
	Decreto nº. 4.646/01	Dispõe sobre o regime de Outorga de Direito de Recursos Hídricos	- Duas Etapas: Outorga Preventiva (autorização de perfuração de poço) e Outorga de Direito - Vazão média e capacidade específica média do aquífero onde está locado o poço tubular
	Manual Técnico de Outorgas - Novembro/2006	Orienta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, quanto a critérios e procedimentos.	- Concentração de poços existentes no local - Vazão outorgada será vazão nominal do poço, respeitando-se o regime de bombeamento entre 10 e 20 h.
Pernambuco	Lei nº. 11.427/97	Dispõe sobre a conservação e a proteção das águas subterrâneas no Estado de Pernambuco e da outras providências.	- Condições de explotabilidade dos diversos aquíferos - Estudo hidrogeológico para avaliação das disponibilidades hídricas e do não comprometimento da qualidade da água do aquífero a ser explorado (para grandes volumes).
	Portaria SRH nº. 21/00	Estabelece critérios e procedimentos técnicos para a determinação da vazão de água subterrânea a ser outorgada para os diversos fins.	- Teste de produção contínuo, com vazão constante e duração não inferior a 24 (vinte e quatro) horas, seguido de recuperação de no mínimo 1 (uma) hora (para regiões consideradas superexplotadas)
	Portaria SRH nº. 25/00	Estabelece distância mínima entre poços tubulares nas Bacias Sedimentares Costeiras de Pernambuco, define critérios e limites para captação de água subterrânea. Resolução	- Teste de produção escalonado em múltiplos estágios, sem estabilização de nível, constituído de 3 (três) escalões e duração não inferior a 24 (vinte e quatro) horas - Distância mínima de 500 metros, a partir da localização de poços já regularizados.
	Resolução CRH nº. 4/03	Dispõe sobre a conservação e proteção das águas subterrâneas no Estado.	- Vazão máxima outorgável - Mapa de Zoneamento Explotável dos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife - Tabela de consumo Médio Diário de Água.

Piauí	Decreto nº. 11.341/04	Regulamenta a outorga preventiva de uso e a outorga de direito de uso de recursos hídricos do Estado do Piauí, nos termos da Lei nº. 5.165, de 17 de agosto de 2000.	<ul style="list-style-type: none"> - Planejamento do uso do aquífero - Reserva explotável do aquífero - Disponibilidade real do poço
Rio de Janeiro	Portaria SERLA nº. 567/07	Estabelece critérios gerais e procedimentos técnicos e administrativos para cadastro, requerimento e emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos de domínio do estado do Rio de Janeiro.	<ul style="list-style-type: none"> - Os aspectos quantitativos da vazão de extração nos locais indicados para exploração. - Interferência entre poços tubulares - A vazão máxima sustentável de um poço tubular
Rio Grande do Norte	Decreto nº. 13.283/97	Regulamenta o inciso III do art. 4º da Lei nº. 6.908, de 01 de julho de 1996, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - Capacidade de recarga do aquífero, prevista em portaria, fundamentada em estudo hidrogeológico específico. - Interferência provocada pelo poço em poços circunvizinhos - Múltiplos usos
Rio Grande do Sul	Decreto nº. 42.047/02	Regulamenta disposições da Lei nº 10.350, de 30 de dezembro de 1994, com alterações, relativas ao gerenciamento e à conservação das águas subterrâneas e dos aquíferos no Estado do Rio Grande do Sul.	<ul style="list-style-type: none"> - Prioridades do uso - Fatores Econômicos e sociais - Áreas de Proteção de Aquíferos
Rondônia	Portaria nº. 38/GAB/SEDAM /04.	Aprova as Normas e os Anexos de I a XV, que disciplinam o uso dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos do Estado de Rondônia.	<ul style="list-style-type: none"> - Estudo de Avaliação Hidrogeológica - Relatório final de execução do poço - Relatório de avaliação do uso da água

Roraima	Decreto Estadual nº. 8.123/07.	Regulamenta o inciso III, do artigo 4º., bem como os artigos 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 21, 22, 23, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76,77 e 78 da Lei no. 547, de 23 de junho de 2006, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos e institui o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos.	<ul style="list-style-type: none"> - Potencialidade Hídrica do aquífero - Estudos hidrogeológicos existentes - Parecer técnico de outorga - Vazão nominal do poço - Vazão de segurança de cada aquífero - Grau de ocupação da área - Grau de Favorabilidade quando a exploração - Fatores econômicos e sociais
Santa Catarina	Decreto Estadual nº. 4.778/06.	Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, de domínio do Estado, de que trata a Lei Estadual no. 9.748, de 20 de novembro de 1994, e estabelece outras providências.	<ul style="list-style-type: none"> - Deve considerar a interdependência das águas superficiais e subterrâneas, visando gestão integrada. - Dependerá da reserva explorável, descontado a disponibilidade real. - Operar de modo a preservar as características físicas e químicas das águas
São Paulo	Lei nº. 6.134/88	Dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo, e dá outras providências.	- Estudos hidrogeológicos para a avaliação das reservas e do potencial dos recursos hídricos
	Lei nº. 7.663/91	Institui a Política Estadual de Recursos Hídricos, e adota outras providências.	- Potencialidade Hídrica do aquífero total e real
	Decreto nº. 41.258/96	Regulamenta a outorga de direito de uso dos recursos hídricos	- Teste de produção escalonado, em três etapas, com duração de uma ou mais horas.
	DAEE - Instrução Técnica DPO no. 006	Procedimentos necessários à elaboração de projetos e estudos hidrogeológicos	- Aspectos Qualitativos das Águas Subterrâneas

Sergipe	Decreto nº. 18.456/99	Regulamenta a outorga de direito de uso de recursos hídricos, de domínio do Estado, de que trata a Lei nº 3.870, de 25 de setembro de 1997.	<ul style="list-style-type: none"> - Planejamento do uso do aquífero - Reserva explotável do aquífero - Disponibilidade real do poço
	Resolução nº. 03/02	Dispõe sobre critérios para a outorga de direito de uso de recursos hídricos subterrâneos nas regiões de Aracaju e São Cristóvão.	<ul style="list-style-type: none"> - Teste recente de produção contínua, com vazão constante e duração não inferior a 24 horas, seguido de recuperação de, no mínimo, 1 hora. - Relatório técnico: perfil geológico e construtivo do poço, metodologia do teste, equipamentos utilizados, vazão máxima permissível, vazão máxima recomendável, considerações técnicas quanto ao risco geotécnico de colapso e subsidência, nível estático e nível dinâmico.
Tocantins	Lei nº. 1.307/02.	Dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, e adota outras providências.	<ul style="list-style-type: none"> - Conveniência técnica, econômica e sanitária. - Preservação da qualidade das águas subterrâneas.

Fonte: modificado de Costa (2009) e Silva *et al* (2008) e contribuições próprias da autora.

O exemplo do Distrito Federal merece interessante abordagem. Nessa unidade da Federação há uma resolução (ADASA nº. 350, de 23 de junho de 2006) que estabelece procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga. Nessa resolução, o artigo 3º. define que a unidade básica adotada para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos são os sistemas aquíferos, o que representa um avanço importante na gestão dos recursos subterrâneos. O DF também estabeleceu como critérios básicos para outorga a validação das vazões requeridas mediante comparação com as potencialidades do aquífero e estudos hidrogeológicos existentes. Considera ainda o critério de limite máximo para bombeamento em 75% da vazão média nominal do poço e tempo máximo de 20 horas (MELLO & CASTRO, 2011).

No Estado da Bahia a política de recursos hídricos é instituída pela Lei Estadual No. 11.612 de 08 de Outubro de 2009, que dispõe sobre a Política Estadual de Recursos Hídricos, o Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, e dá outras providências. A Lei Estadual 12.377 de 28 de dezembro de 2011 altera a Lei no. 10.431, de 20 de dezembro de 2006, que dispõe sobre a Política Estadual de Meio Ambiente e de Proteção à Biodiversidade, a Lei no. 11.612/2009 e a Lei no. 11.051, de 06 de junho de 2008, que reestrutura o Grupo Ocupacional de Fiscalização e Regulação.

Os princípios contidos nas Leis Estaduais No. 11.612/2009 e No. 12.377/2011 estão em consonância com os princípios da Lei Federal n. 9.984/1997, com a inclusão do princípio do usuário-pagador e poluidor-pagador, bem como princípios de responsabilidade e ética ambiental.

O Decreto nº 6.296 de 21 de março de 1997, antecede as Leis Estaduais vigentes e procura orientar os processos de outorga de recursos hídricos no Estado da Bahia, contudo pouco detalha sobre critérios de outorga para recursos hídricos subterrâneos, estabelecendo regras apenas para os casos de dispensa de outorga.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos foi publicado em Março de 2005 com a finalidade de orientar a implementação da Política Nacional dos Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos.

Em relação às águas subterrâneas, tanto a Lei Estadual No. 11.612/2009, quanto o Plano Estadual de Recursos Hídricos pouco detalham sobre os procedimentos de concessão de outorga, estabelecendo apenas regras básicas para a concessão ou dispensa de outorga, essa última para o caso de vazões pequenas, mantendo a mesma linha do Decreto Estadual nº 6.296/1997.

A Resolução nº. 2.983 de 28 de junho de 2002, do Conselho Estadual de Meio Ambiente (CEPRAM) regulamenta a documentação necessária para solicitação de outorgas para recursos hídricos subterrâneos no Estado da Bahia, mas como requisição básica, são solicitadas apenas as informações do perfil litológico e construtivo do poço e teste de bombeamento ou de vazão escalonada.

2.3.4 Aspectos Técnicos da Outorga

De maneira geral, verifica-se que não há metodologias consolidadas para determinação de critérios de vazões outorgáveis, especialmente quando se tratam de águas subterrâneas.

No que se refere aos critérios técnicos de determinação de vazões outorgáveis para águas superficiais, o Código de Águas (BRASIL, 1934) já previa a utilização do conceito da vazão remanescente, quantidade de água que não pode ser extraída do corpo hídrico, que era entendida apenas como uma vazão mínima.

No âmbito de competência federal, a Resolução no. 16, de 8 de Maio de 2001 (BRASIL, 2001), estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso de recursos hídricos, onde determina as atividades e captações sujeitas a outorga, critérios para determinação de vazões de referência, prioridades de uso e informações mínimas a serem apresentadas pelo requerente no processo de solicitação da outorga.

Para os recursos hídricos superficiais, as vazões referenciais são calculadas com base em dados hidrológicos, ou seja, vazões de base em dados históricos aplicados a modelos estatístico-hidrológicos como Q7/10; Q90% e Q95%.

Alguns autores, no entanto, questionam essa abordagem e se utilizam do termo “vazão ecológica”, diferentemente de vazão de restrição ou vazão mínima, por considerar a quantidade de água mínima que deve permanecer a jusante do recurso hídrico para garantia dos usos múltiplos dos ecossistemas (SANTOS, 2013).

Nessa linha de raciocínio para determinação das vazões referenciais (restrição e/ou mínimas) deveriam ser considerados aspectos da condição da biota local, garantindo a sobrevivência dos ecossistemas antes da intervenção humana, não apenas as vazões hidrológicas históricas.

Atualmente, como considerado por Tucci & Mendes (2006) as funções hidrológicas utilizadas para determinar vazões de referência são Q90% (a vazão observada 90% do tempo

da série histórica), a Q95% (aquela que predomina em 95% das observações da série histórica) e a Q7,10 (vazão mínima de 7 dias de duração e 10 anos de tempo de retorno).

Segundo o Decreto Estadual da Bahia nº 6.296 de 21 de março de 1997, como critério de outorga para águas superficiais considera-se como diretriz geral:

I - 80% (oitenta por cento) da vazão de referência do manancial, estimada com base na vazão de até 90% (noventa por cento) de permanência a nível diário, quando não houver barramento;

II - 80% (oitenta por cento) das vazões regularizadas com 90% (noventa por cento) de garantia, dos lagos naturais ou de barramentos implantados em mananciais perenes;

III - 95% (noventa e cinco por cento) das vazões regularizadas com 90% (noventa por cento) de garantia, dos lagos naturais ou de barramentos implantados em mananciais intermitentes.

Se para os recursos hídricos superficiais há controvérsias em relação à determinação de vazões de referência, a situação se complica ainda mais quando se trata de águas subterrâneas. Na área técnica são utilizadas as mais variadas metodologias para representar a realidade da disponibilidade hídrica e o cálculo de vazões ecológicas e garantir serviços básicos dos ecossistemas.

A ausência de critérios pré-estabelecidos bem definidos pode acarretar em prejuízos para o sistema aquífero em longo prazo, especialmente quando se têm poucas informações hidrogeológicas disponíveis para a região requerida para outorga.

Assim como ocorre para os recursos hídricos superficiais é preciso que os órgãos outorgantes tenham disponíveis estudos hidrogeológicos que possam embasar a aplicação de critérios técnicos para exploração dos aquíferos, de modo a garantir a sustentabilidade em longo prazo localmente.

A utilização de informações de ensaios de vazão de poços não é suficiente para garantia da sustentabilidade hídrica e pode comprometer os usos múltiplos em caso de áreas onde há exploração intensa (vários usuários). A depleção hídrica de um aquífero não é algo fácil de monitorar, é necessária a construção de poços de monitoramento nem sempre previstos nos projetos de captação, ou muito vezes construídos com perfil inadequado, onde não se monitora a camada produtora dos poços.

A garantia da sustentabilidade em longo prazo pode ser monitorada e controlada com o conhecimento das reservas hídricas, sendo recomendado que após o conhecimento sobre as reservas dos mananciais explorados se possa criar metodologias de controle e fiscalização.

Os métodos para estimativas das reservas hídricas subterrâneas são os mais variados, e o conhecimento do meio físico, dinâmica do uso e ocupação do solo, morfologia, clima, grau de impermeabilização em zonas de recarga, domínio hidrogeológico e quantidade de dados disponíveis interferem diretamente na gestão sustentável dos recursos.

Adicionalmente, os interesses da sociedade envolvida devem ser conhecidos com a finalidade de melhor direcionar os diferentes usos da água (CAMPOS & CORREA, 2013).

Para o Distrito Federal, o artigo de Mello & Castro (2011) apresenta a metodologia de análise técnica dos processos de outorga, onde se busca atender aos objetivos de manutenção da disponibilidade hídrica e determinação de vazões de outorga sustentáveis, o que pode ser um ponto de partida para determinação de critérios técnicos de análise para outras regiões, levando-se em conta as especificidades de cada sistema aquífero.

A metodologia utilizada para avaliação técnica dos processos de outorga de poços no Distrito Federal pode ser resumida como: identificação do poço no contexto dos sistemas de aquífero da região, determinação da vazão a ser outorgada a partir 75% da vazão média do poço (teste de bombeamento), comparação dos valores de vazão requerida com os dados de disponibilidade hídrica, levando em consideração as vazões de segurança do sistema de aquífero em questão (MELLO & CASTRO, 2011).

No artigo de Campos & Correa (2013), foi definida uma metodologia para determinação da disponibilidade hídrica subterrânea por região em função da favorabilidade do uso, ou seja, para cada região foi definido um grau de favorabilidade baseado nos parâmetros naturais dos aquíferos e nas condições de uso e ocupação da superfície.

No desenvolvimento dos critérios técnicos a Agência Nacional de Águas (2007) recomenda metodologias que possam aliar as inter-relações entre os recursos hídricos superficiais e os subterrâneos, bem como a articulação com outras autoridades outorgantes como o DNPM, responsável pela outorga de águas minerais.

Maia & Rodrigues (2012) afirmam que a exploração sustentável de aquíferos requer a escolha adequada da localização e profundidade dos poços, bem como da distância entre eles, além disso, a vazão ótima deve ser determinada de modo a não haver prejuízos com as vazões dos recursos superficiais.

Como critérios técnicos para outorga no aquífero Urucuia, situado na região oeste do Estado da Bahia, Maia & Rodrigues (2012) propuseram (após simulações em modelos numéricos, modelos analíticos e avaliação de hidrogramas) os fatores de recarga, reservas e disponibilidades e integração com a gestão das águas superficiais.

Como recomendação metodológica na avaliação dos processos de outorga no Urucuia, deve-se considerar que o limite outorgado não ultrapasse 80% dos volumes disponíveis, alinhada com os princípios da outorga de água superficial e que a distância entre os poços e rios perenes na região seja na faixa de 2.500 metros. Caso as condições de outorga sejam diferentes das condições estabelecidas, deve-se proceder com execução de testes de vazão e aplicação dos modelos de Theis e Hunt para verificação da condição específica de captação (MAIA & RODRIGUES, 2012).

Segundo Campos & Correa (2013), dentre os mais relevantes critérios técnicos que podem ser utilizados para determinação das vazões outorgáveis para águas subterrâneas estão: percentual da vazão média do aquífero, percentual da vazão do poço, vazão de base da drenagem superficial, análise quantitativa dos dados de ensaios de bombeamento, rebaixamento disponível e vazão de segurança.

A Tabela 5 resume as definições dos critérios técnicos supracitados, segundo a descrição de Campos & Correa (2013).

Outro importante critério também abordado por Campos & Correa (2013) é o grau de favorabilidade dos sistemas de aquífero a ser considerado nos processos de outorga. Esse grau de favorabilidade é definido em função das características físicas / hidráulicas dos aquíferos e das condições de uso e ocupação da superfície.

A legislação em nível nacional e estadual, no que concerne aos princípios de uso e conservação dos recursos hídricos, é bastante abrangente e considera os aspectos mais profundos da manutenção da vida das populações e demais ecossistemas. Contudo, os critérios técnicos utilizados para a aplicação dos princípios contidos na legislação ainda carecem de estudos e consenso entre autores na determinação de vazões de referência que considerem os usos múltiplos dos recursos.

As características regionais das bacias hidrográficas e dos aquíferos também devem ser consideradas na determinação de critérios técnicos para outorga de águas superficiais e subterrâneas, bem como as inter-relações entre os dois recursos.

Tabela 5. Critérios Técnicos Outorga de Águas Subterrâneas

Critérios Técnicos Águas Subterrâneas	Definições
Percentual da Vazão Média dos Poços do Aquífero	<ul style="list-style-type: none"> • Determinada a partir de uma população de dados de poços com diferentes características construtivas. • Média aritmética simples ou média ponderada pela profundidade, diâmetro, comprimento da seção de filtros ou outro parâmetro construtivo. • Aplicável para aquíferos isotrópicos e homogêneos. • Determinação da capacidade específica média dos meios aquíferos de forma que se possa vincular a vazão para cada usuário à profundidade dos poços e ao rebaixamento provocado pela vazão de bombeamento. • Embasado nos parâmetros hidráulicos e dimensionais dos aquíferos como condutividade hidráulica, espessura saturada, porosidade eficaz e coeficiente de armazenamento.
Percentual da Vazão do Poço	<ul style="list-style-type: none"> • Fração da vazão obtida a partir da estabilização do nível dinâmico após ensaio de bombeamento contínuo de 24 horas (vazão constante, escalonado com ou sem recuperação, etc.). • Considerar as questões de sobreexploração ou pressão de exploração e as questões referentes aos riscos de contaminação a que os sistemas estejam submetidos (sistemas aquíferos que sejam fortemente anisotrópicos ou muito heterogêneos). • Ensaio escalonado sem recuperação são os mais aplicáveis, pois permitem avaliar conjuntamente o comportamento da capacidade específica a cada intervalo de ampliação da vazão.
Vazão de Base da Drenagem Superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Considera que todo o fluxo de água em cursos superficiais nos períodos críticos de recessão de chuvas representa fluxo subterrâneo, de forma que a outorga deve ser feita com base em um percentual da vazão de base. • Determinação do fluxo superficial, do fluxo interno e do fluxo de base (Método de Barnes).
Rebaixamento Disponível	<ul style="list-style-type: none"> • Análise matemática sobre dados de ensaio de bombeamento escalonados, com pelo menos três estágios com vazões crescentes (construção de equações características do poço).
Vazão de Segurança	<ul style="list-style-type: none"> • Espacialização das reservas explotáveis por unidade de área (km² ou hectare, por exemplo). • As reservas explotáveis (potencialidades) são obtidas a partir da soma da reserva renovável com um percentual da reserva permanente do aquífero.
Análise Qualitativa dos Dados de Ensaio de Bombeamento	<ul style="list-style-type: none"> • Dados de ensaios de bombeamento com destaque para a capacidade específica do poço (razão da vazão pelo rebaixamento)

Fonte: (CAMPOS & CORREA, 2013).

2.3.4.1 Processo de Outorga para Poços de Produção no Entorno do Pólo Industrial de Camaçari

A base de dados do INEMA, indica para a região de Camaçari e circunvizinhanças, até meado de 2016, um volume total outorgado de 296.425 m³/d para exploração de águas subterrâneas. A Figura 6 mostra a distribuição desses volumes outorgados por município, com destaque para o município de Camaçari, que detém mais de 70% do volume outorgado.

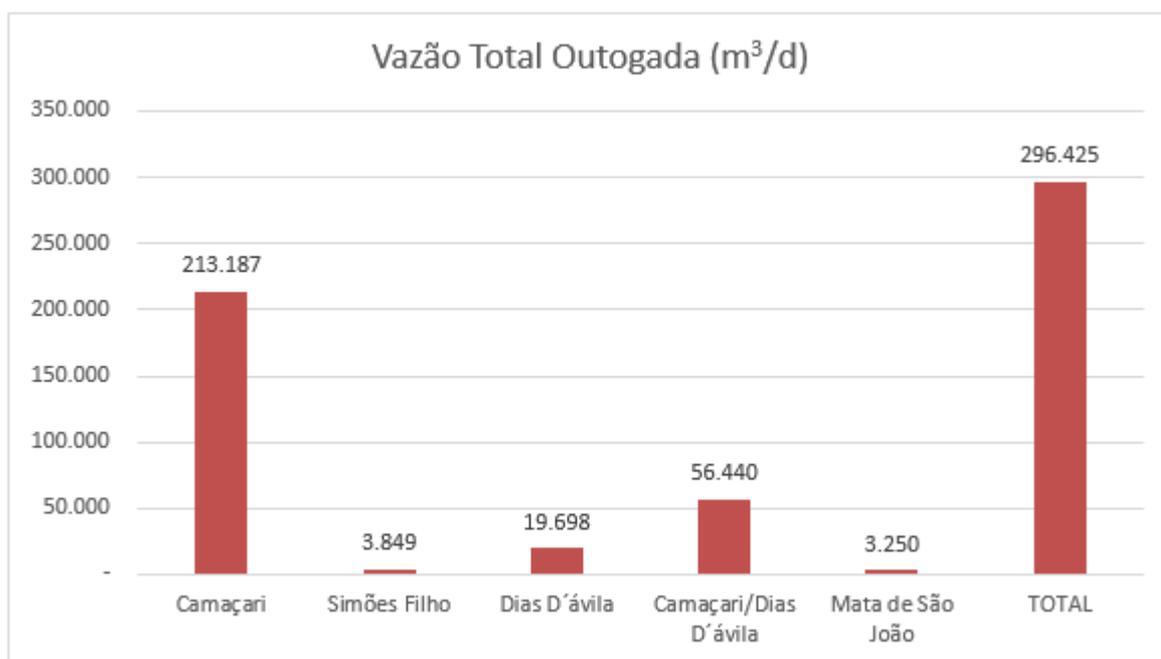


Figura 6 – Vazão Total Outorgada - 2016 (elaborado pela autora).

Para as áreas sob a gestão do Pólo Industrial de Camaçari (Poligonal SUDIC) os usuários (empresas associadas ao COFIC) devem fazer uma consulta prévia, mediante avaliação técnica da CETREL, e solicitar parecer favorável ou não para perfuração e liberação da vazão requerida para outorga, através da instrução normativa interna NS-017/2007 – Consulta Prévia para Solicitação de Outorga de Uso da Água.

No caso dos usuários empresas associadas ao COFIC, no processo de avaliação prévia pela NS-017/2007, a CETREL utiliza critérios técnicos para avaliação da localização e da vazão de outorga requerida, tais quais:

1. Com os dados de vazão requerida para outorga, localização e projeto do perfil construtivo do poço, a CETREL localiza o poço utilizando o *software* ArcGis no

contexto do Polo Industrial e verifica em que zona hídrica² o poço está localizado;

2. Caso esteja localizado em uma zona hídrica passível de exploração, a vazão ou vazões requeridas são simuladas no Modelo Numérico de Fluxo Regional existente, onde são simuladas zonas de captura e rebaixamento máximo, sendo, dessa forma, determinada distância mínima entre os poços e se a vazão requerida não causará rebaixamentos excessivos localizados;
3. Finalmente, é emitido parecer favorável ou não à instalação do poço, ou em determinados casos, novas sugestões de localização e vazões mais adequadas e compatíveis com as características hidrogeológicas regionais.

O fluxograma simplificado da Figura 7 mostra o processo de solicitação de análise e emissão de parecer favorável ou não a implantação de novos poços na área do PIC adotado pelo COFIC, através da normativa interna NS-017/2007.

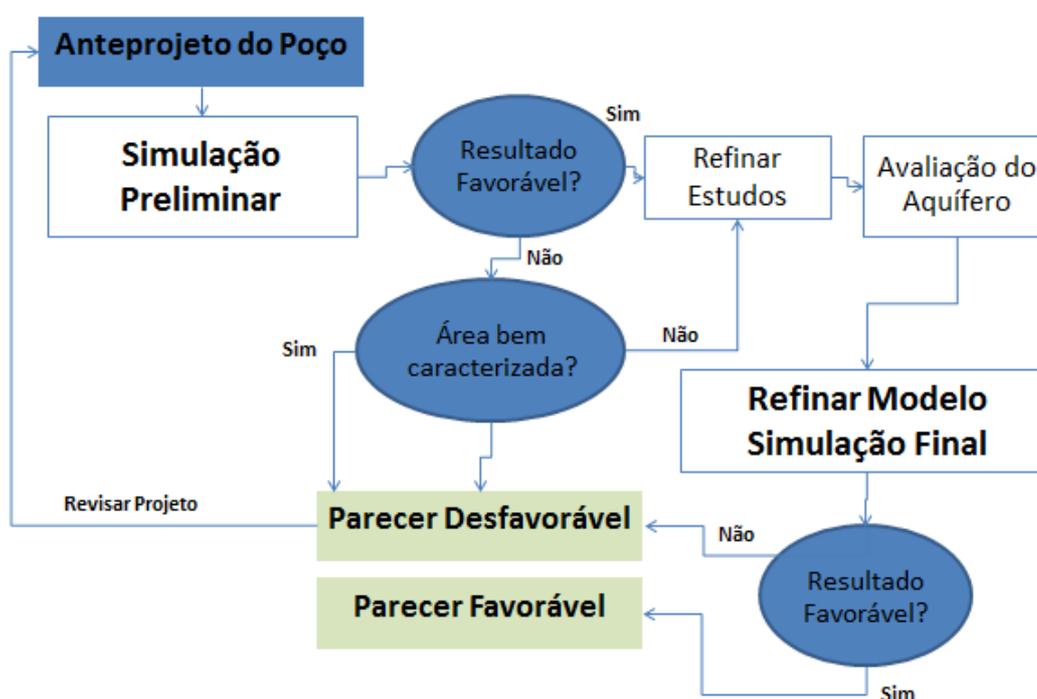


Figura 7 – Fluxograma Simplificado de Avaliação de Novos Poços para Outorga (CETREL, 2003).

² Nessa avaliação é consultada a versão do Zoneamento Hídrico inserido no Plano Diretor do Polo Industrial de Camaçari (2013), ainda em tramitação na Câmara dos Vereadores.

Posteriormente, de posse do parecer favorável do COFIC, o futuro usuário deverá fazer a solicitação de perfuração do novo poço diretamente ao órgão ambiental responsável, nesse caso o INEMA, que emite autorização com as exigências necessárias para avaliação.

Para usuários não associados ao COFIC a determinação de vazões de outorga para poços de produção considerando critérios técnicos não é realizada pela CETREL, ficando a critério do órgão ambiental.

Em geral, para a emissão de autorização para perfuração, é solicitado o projeto de instalação do poço, com perfil construtivo previsto, coordenadas geográficas e finalidade do poço, no caso abastecimento humano e industrial.

Na autorização de perfuração, em geral, o órgão ambiental indica condicionantes a serem cumpridas, tais quais execução de ensaios de vazão e considerações técnicas para perfuração.

Na avaliação das vazões de outorga para os novos poços de produção, feita pelo órgão ambiental em etapa posterior à perfuração dos mesmos, a gestão sustentável dos recursos hídricos da região fica vulnerável, uma vez que o processo tende a ser muito mais burocrático que técnico.

As vazões outorgadas também são, em geral, avaliadas de acordo com as vazões máximas obtidas no teste de vazão realizado, nem sempre levando em consideração as características hidrogeológicas regionais.

Em suma, na área do PIC, atualmente, considerando a ausência de um banco de dados consistente, integrando informações dos poços geridos e/ou instalados pelos principais usuários na região (EMBASA, CERB, DNPM e CETREL), bem como poucas informações sobre a hidrogeologia regional, e ausência de instrumentos normativos para essa análise, a avaliação técnica dos processos de outorga para águas subterrâneas fica a critério do técnico responsável no órgão outorgante, que nem sempre dispõe de ferramentas adequadas a uma avaliação mais regional das disponibilidades hídricas e vazões de outorga sustentáveis.

Por outro lado, os estudos conduzidos pela comunidade industrial na área do entorno do PIC, bem como pela universidade, fornecem material técnico para a condução de estudos regionais integrados, com a finalidade de melhoria da gestão dos recursos hídricos subterrâneos da região.

2.4 Caracterização da Área de Estudo

2.4.1 Localização

A área objeto do estudo está localizada na porção nordeste do Estado da Bahia e engloba parte dos municípios de Camaçari, Dias D'Ávila, São Sebastião do Passé, Mata de São João e Candeias.

A delimitação da área é coincidente com o domínio do modelo hidrogeológico existente e disponível para o desenvolvimento dos cenários de exploração de água subterrânea. Essa área está representada na Figura 8, destacada em vermelho.

O Complexo Industrial de Camaçari está localizado ao centro da área de estudo, que contém também a Poligonal do Polo Industrial³.

2.4.2 Hidrografia

A Bacia do Recôncavo Norte é uma das 13 bacias que abragem o Estado da Bahia, limitada ao norte pela bacia Inhambupe e rio Itapicuru, a oeste com a bacia do rio Paraguaçu, ao sul da bacia do Recôncavo Sul e a leste com o Oceano Atlântico, onde deságuam os rios (Figura 9). As ilhas de Itapacarica e da Baía de Todos os Santos também fazem parte desse grupo (BAHIA, 1996).

Está segmentada em outras 8 sub-bacias dos Rios Subaúma, Sauípe, Pojuca, Subaé, Jacuípe, Joanes, Açu e outros rios litorâneos de menor porte (Figura 10). A região alvo do estudo está inserida na Bacia Hidrográfica do Recôncavo Norte, dentro dos limites das bacias do Rio Joanes e Jacuípe.

A bacia do rio Joanes abrange, total ou parcialmente, os municípios de Camaçari, Lauro de Freitas, Simões Filho, Dias D'Ávila, Candeias, Salvador e São Sebastião do Passé. Já a bacia do Jacuípe, além dos municípios de Camaçari, Dias D'Ávila, Mata de São João e São Sebastião do Passé, tem sua nascente no município de Amélia Rodrigues, passando por Terra Nova e Santo Amaro.

³ A nova Poligonal do Polo Petroquímico destinada à ampliação foi definida, através do Decreto Nº 13.010 de 11 de Julho de 2011 do Governo do Estado da Bahia, da Superintendência de Desenvolvimento Industrial e Comercial (SUDIC).

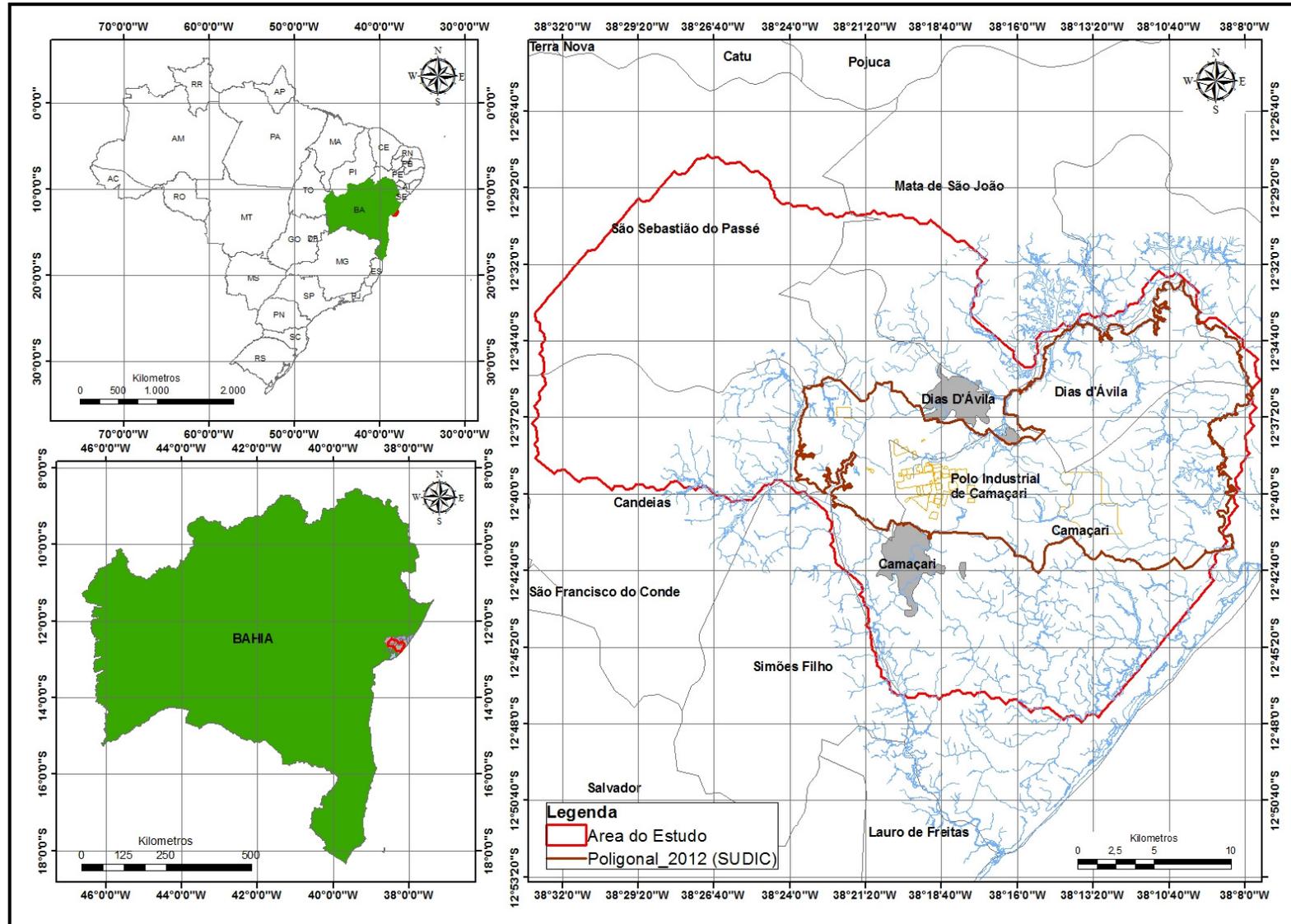


Figura 8 - Área Objeto do Estudo (elaborado pela autora).

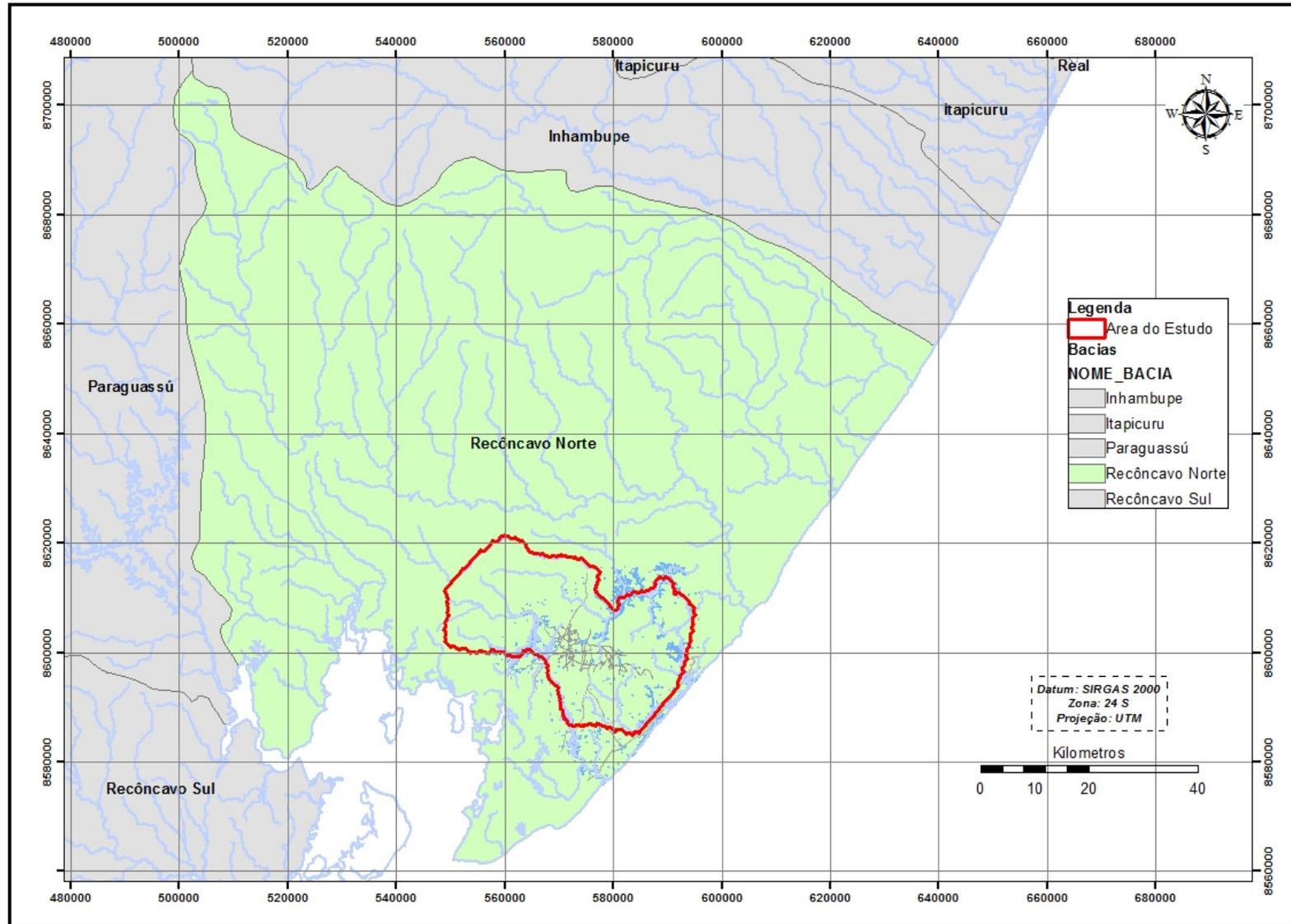


Figura 9 - Delimitação da Bacia do Recôncavo Norte (elaborado pela autora).

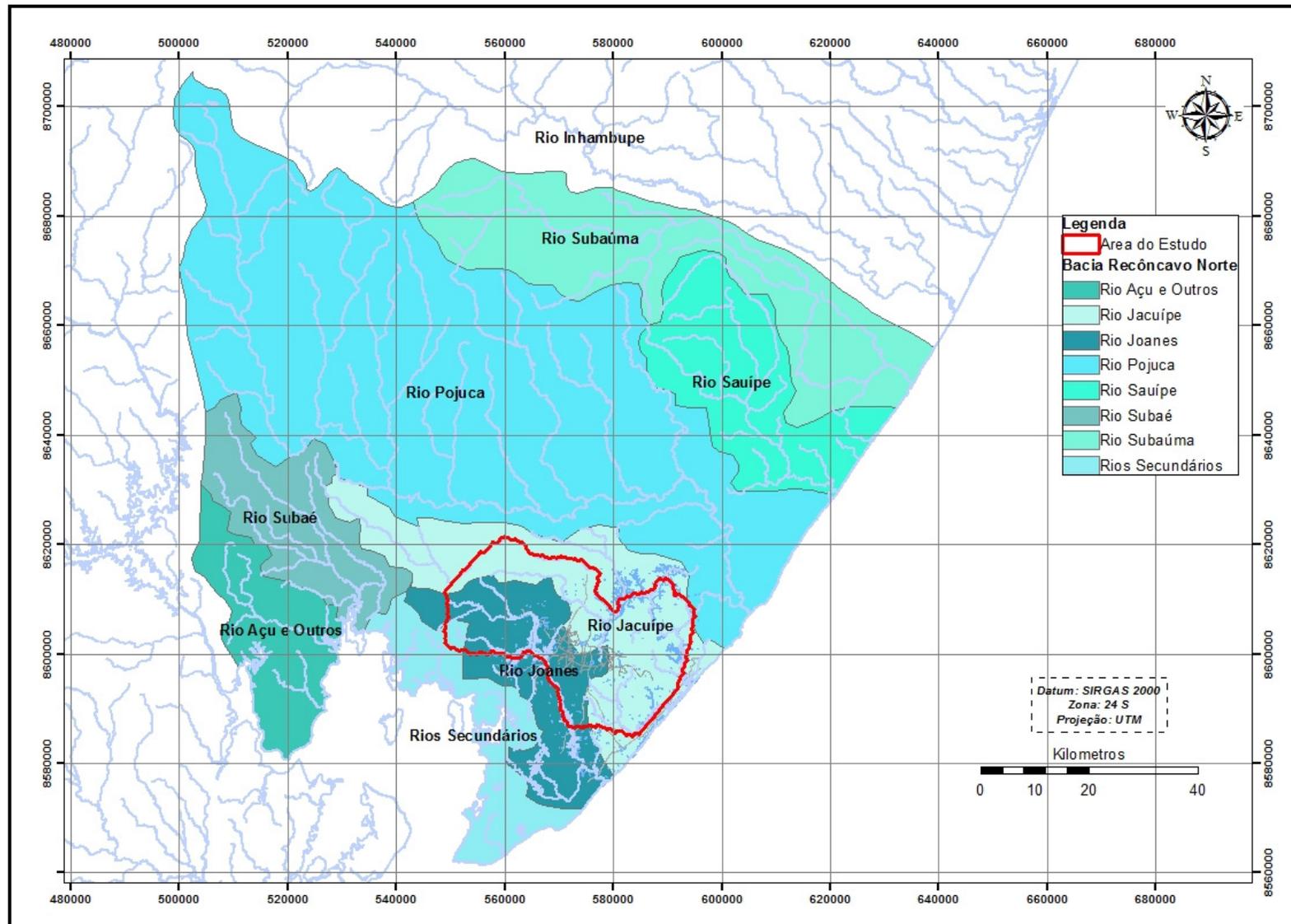


Figura 10 - Sub-Bacias Inseridas na Bacia do Recôncavo Norte (elaborado pela autora).

As bacias do rio Joanes e a do rio Jacuípe suportam quatro importantes reservatórios utilizados no abastecimento dos municípios da região: Joanes I, Joanes II e Ipitanga no rio Joanes e Santa Helena no rio Jacuípe. A Figura 11 mostra a localização desses reservatórios na área alvo do estudo.

A região de estudo têm exutórios (áreas de descarga) de suas águas superficiais e subterrâneas no oceano Atlântico. Um importante afluente do Rio Jacuípe é rio Imbassaí, cuja zona de inundação é considerada a principal área de descarga das águas do sistema aquífero Marizal/São Sebastião, maior fonte de suprimento industrial e humano da região, que nasce no município de Dias D'Ávila e contorna o Polo Industrial ao norte/nordeste (Figura 12).

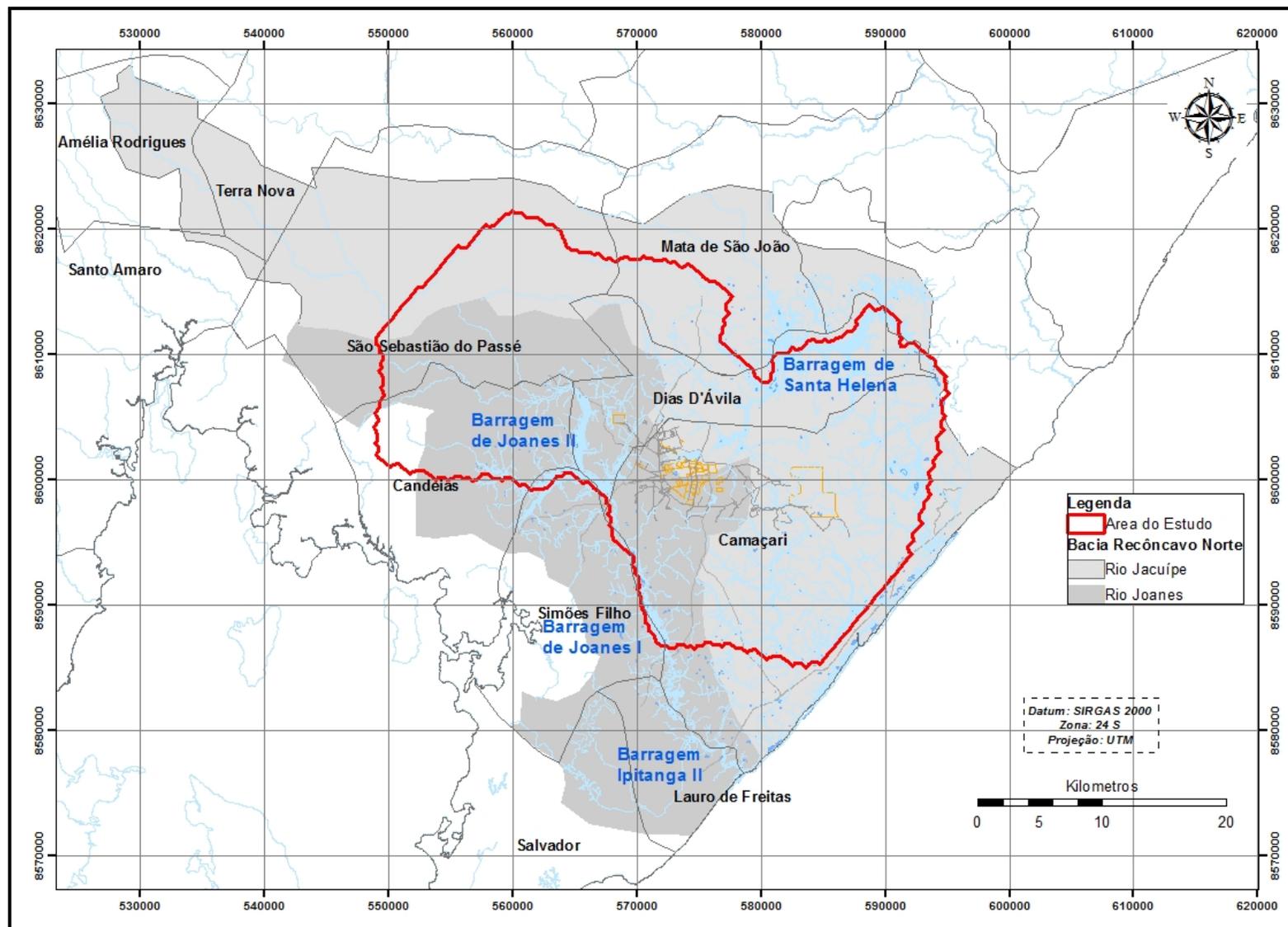


Figura 11 - Localização dos Reservatórios (elaborado pela autora).

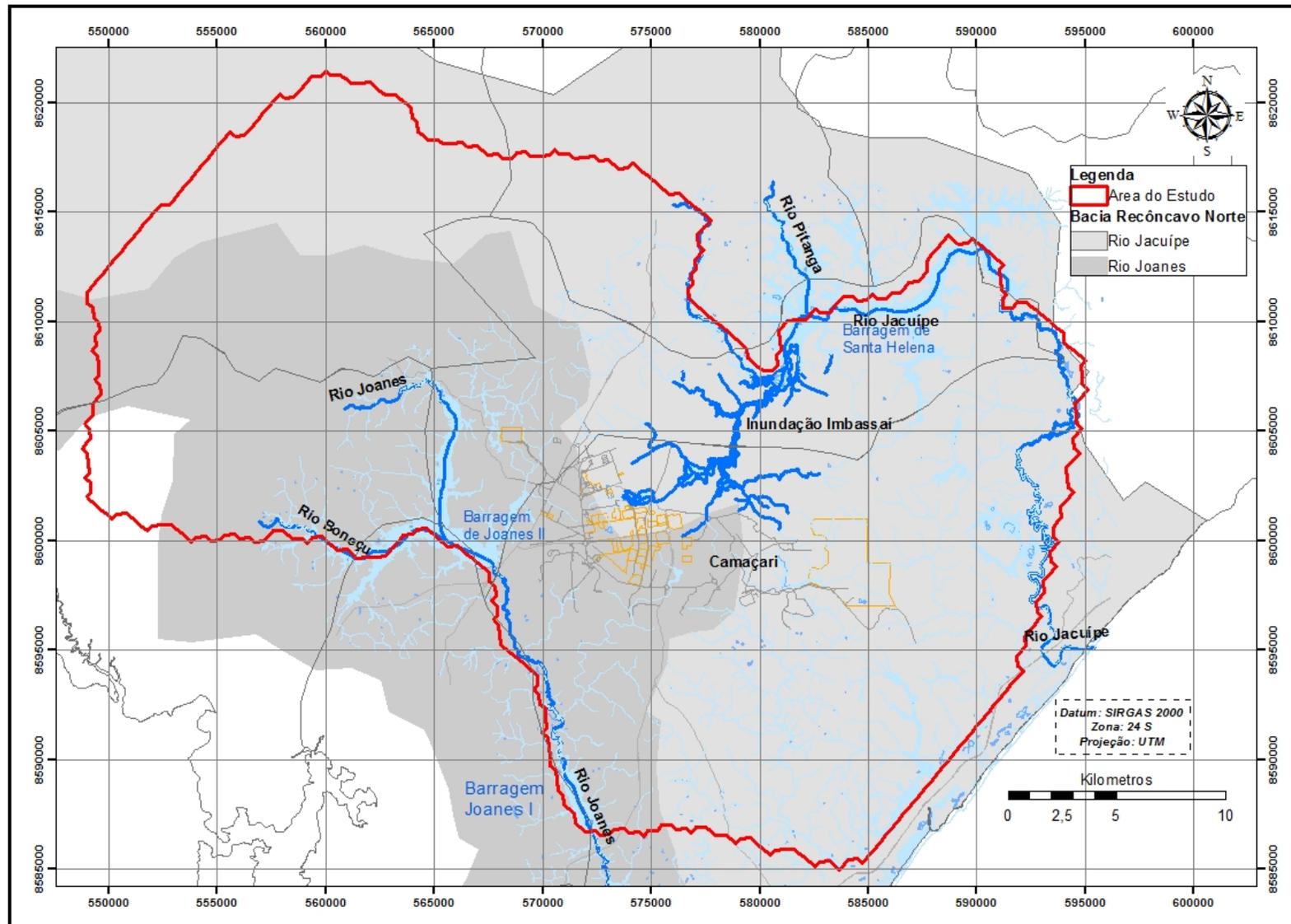


Figura 12 - Rios Importantes para a Região (elaborado pela autora).

2.4.3 Geologia Regional

A área objeto do estudo está situada na zona de ocorrência da Bacia Sedimentar do Recôncavo, cujas formações aflorantes localmente são as Formações Marizal, São Sebastião e Barreiras. A seguir será apresentado um resumo do contexto geotectônico da Bacia, a evolução de sua formação e ambientes de deposição e, finalmente a descrição em nível local das unidades litoestratigráficas de interesse para o aquífero estudado (Marizal / São Sebastião).

2.4.3.1 Arcabouço Geotectônico

O conjunto de Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá relacionam-se originalmente ao processo de rifteamento que afetou o paleocontinente Gondwana durante o Eocretáceo. Trata-se de um conjunto de grábens assimétricos alongados na direção NE-NO, preenchidos por sedimentos flúvio-lacustres, com horizontes ricos em matéria orgânica, sendo que a atividade tectônica foi paralisada durante o Eoaptiano (SANTOS *et. al*, 1990).

Esse sistema de *riffts* está assentado sobre diferentes substratos litológicos de idade geológica variada, desde o Arqueano ao Paleozóico, o que resulta em respostas deformacionais diferentes ao mesmo esforço aplicado (SANTOS *et. al*, 1990).

A Figura 13 mostra a delimitação da Bacia do Recôncavo (~11.500 Km²) e arcabouço estrutural mapeado no limite da seção pré-rift. Ao Norte esta limitada pelo Alto de Aporá, sendo seguida pela Bacia de Tucano, e ao sul, é delimitada pela Falha da Barra, seguida da Bacia de Camamu.

Ao Oeste a Bacia do Recôncavo é delimitada pela Falha de Maragogipe e a leste pela Falha de Salvador. Esta última com direção geral N20°. E, que acumula um rejeito total superior a quatro mil metros (LIMA, 1999), estudos conduzidos pela INPE (BEISL, 1996) citam rejeito até uma profundidade de 6.000 metros. O trecho exposto da F. Salvador se estende desde o Porto da Barra por mais de 20 Km até a altura de Água Comprida, quando assume a direção oeste para leste, reassumindo a direção NE já na altura de Arempepe.



Figura 13 - Bacia do Recôncavo: limites e arcabouço estrutural pré-rift (ARAGÃO, 1994 *apud* BEISL, 1996).

Na Figura 14 é possível visualizar a seção transversal do rift, meio gráben, com parte da assimetria gerada por uma falha de borda, a sudeste (Falha Salvador) e flexural a oeste.

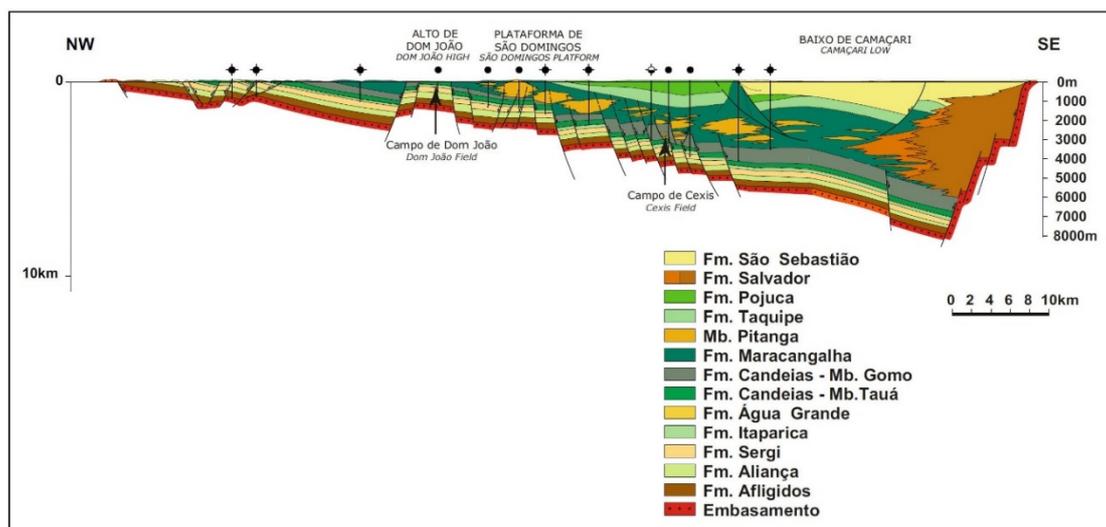


Figura 14 - Seção Geológica Esquemática NW – SE, ilustrando a morfologia de meio-gráben da Bacia do Recôncavo, cujo depocentro fica a leste (MILHOMEN, *et. al* 2003 *apud* PRATES & FERNANDEZ, 2015).

2.4.3.2 Evolução Tectonoestratigráfica

Na Figura 15 está representada a Carta Estratigráfica da Bacia do Recôncavo, onde resumidamente é possível observar a história geocronológica dos sedimentos depositados nos grábens formados.

Rochas arqueanas a paleoproterozoicas (Serrinha e *Greenstone Belt* Rio Itapicuru), rochas paleoproterozoicas da Faixa Salvador – Curaçá e neoproterozoicas da Faixa Sergipana formam o embasamento pré-cambriano das bacias Recôncavo-Tucano –Jatobá (DELGADO & PEDREIRA, 1995 *apud* SILVA *et. al.* 2003).

Em relação à Bacia do Recôncavo, o preenchimento sedimentar no depocentro (falha de Salvador) atinge cerca de 7.000 metros de espessura, compreendendo uma fase Sinéclise paleozóica (Formação Afligidos; Superseqüência Carbonífero-Permiana), seguida por uma fase pré-rift (SILVA, *et. al.* 2003). Os sedimentos aluviais do Grupo Brotas, compostos por argilas e arenitos da Formação Aliança, sobrepostos por arenitos fluviais com retrabalhamento eólico da Formação Sergi, compõem a fase pré-rift da supersequência Jurássica, que representa o estiramento inicial da crosta (MAGNAVITA, 1996). Ocorrem em seguida depósitos lacustrinos e fluviais das Formações Itaparica e Candeias (Grupo santo Amaro). Uma paraconformidade individualiza a Formação Itaparica dos sedimentos fluviais e eólicos da Formação Água Grande e dos folhelhos escuros lacustres da Formação Candeias (MAGNAVITA, 1996).

Na fase rift, inicialmente em uma megassequência progradação, depositaram-se argilas lacustres geradoras de hidrocarbonetos da Formação Candeias nos principais depocentros, juntamente com turbiditos (MAGNAVITA, 1996). Com a redução da taxa de subsidência inicial, evidenciado pela presença de carbonatos oncolíticos no topo da formação Candeias (CAMPOS, 1960; CHIGNONE, 1970 *apud* MAGNAVITA, 1996), formaram-se deltas sobre plataformas existentes, próximo às bordas flexurais, com o preenchimento dos depocentros com arenitos, siltitos, folhelhos e delgados carbonatos do Grupo Ilhas (Formações Marfim e Pojuca), seguidos dos arenitos fluviais médios a grossos do Grupo Massacará (Formação São Sebastião) (MAGNAVITA, 1996).

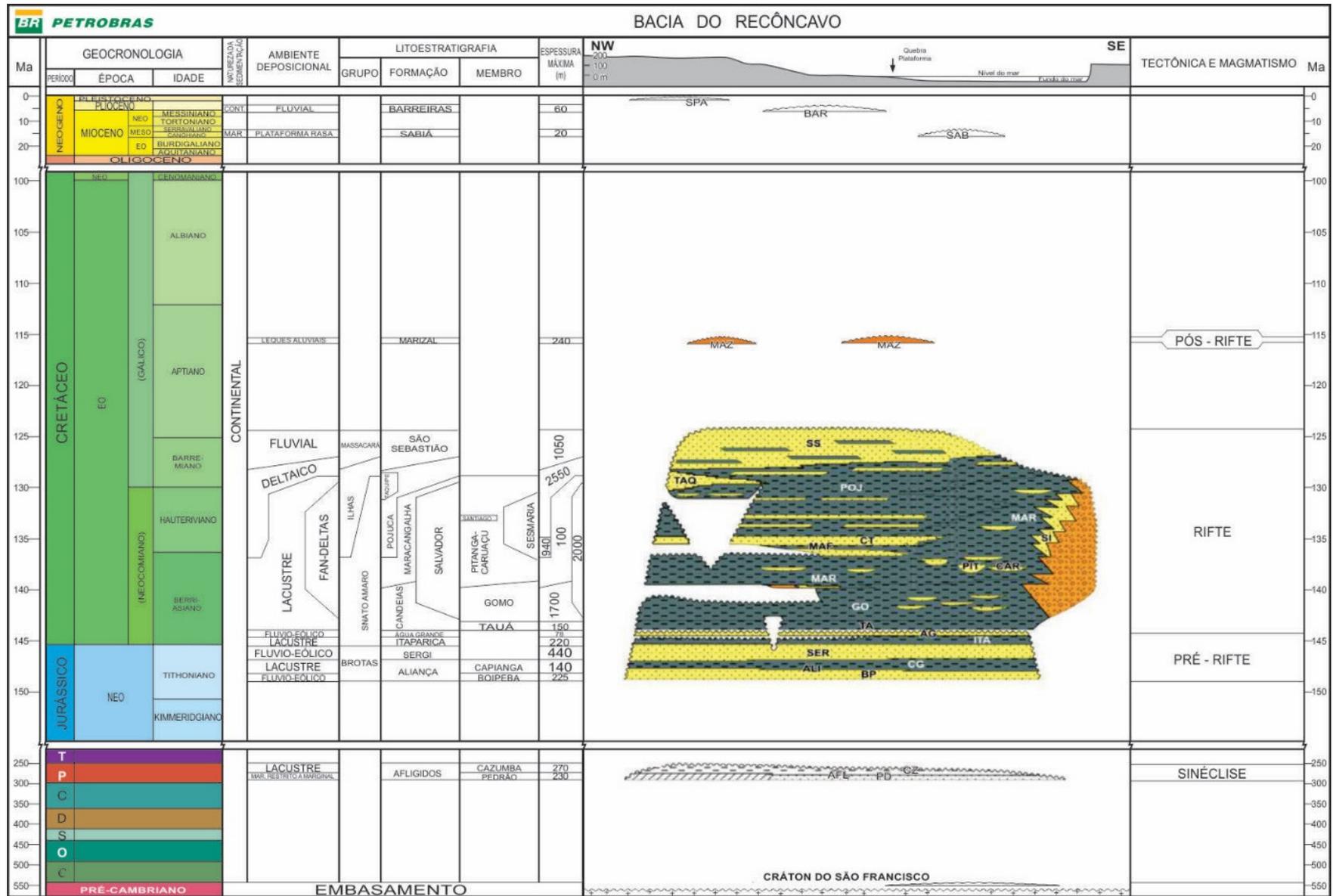


Figura 15 - Evolução Estratigráfica da Bacia do Recôncavo (MILHOMEN, et. al 2003 apud PRATES & FERNANDEZ, 2015).

Assentados de forma discordante sobre o Grupo Massacará, na fase pós-rift, ocorrem os arenitos e conglomerados aluviais da Formação Marizal (espessura aproximada de 50 m), depositados após um período de erosões generalizadas (SANTOS, 1990). Localmente, sobre essa Formação ocorrem folhelhos, calcários e arenitos miocênicos de origem marinha da Formação Sabiá (VIANA *et. al*, 1971 *apud* SANTOS, 1990).

Na fase rift, nas bordas das bacias, foram depositadas de maneira individualizada ou interdigitada outras formações, como a espessa cunha de conglomerados polimíticos sintectônicos, que correspondem a Formação Salvador, cuja espessura pode ser maior que quatro mil metros (SANTOS, 1990).

2.4.3.3 Unidades Litoestratigráficas Superficiais

A Figura 16 mostra o Mapa Geológico Regional (CPRM, 1990) com destaque para a área de interesse do estudo.

Na borda leste da Bacia do Recôncavo, delimitada pela Falha de Salvador, ocorre um bloco estrutural elevado do embasamento cristalino, constituído por rochas metamórficas de alto grau, classificadas como granulitos e gnaisses migmatíticos, que compõem o núcleo do Cráton do São Francisco (ALMEIDA, 1977; BARBOSA, 1990; FUGIMORI, 1968 *apud* LIMA, 1999).

O Mapa Geológico Regional (Figura 16) mostra a exposição do Grupo Ilhas na porção oeste da Falha de Salvador, região metropolitana da cidade de Salvador. Na maior parte da Bacia do Recôncavo predomina a Formação São Sebastião (K1ss), entretanto, localmente essa Formação encontra-se recoberta de forma discordante pela Formação Marizal e Grupo Barreiras.

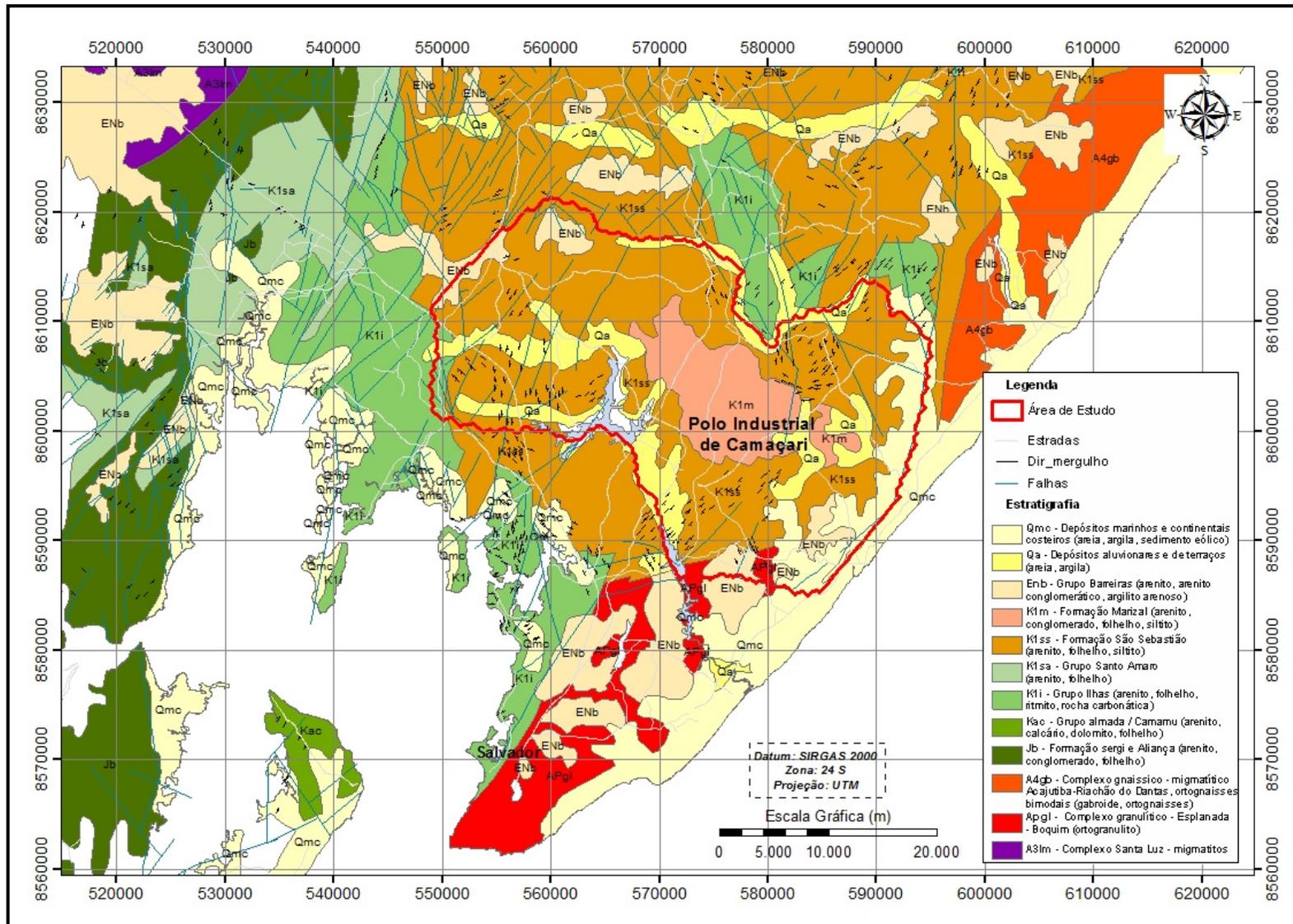


Figura 16 - Geologia Regional (adaptado CPRM, 1990).

Como descreve Vilas Boas (1996) o Grupo Ilhas é constituído pelas Formações Marfim, Taquipe e Pojuca, do mais antigo ao mais novo. A Formação Marfim tem idade cretácica inferior, evidenciada pela presença de ostracodes, trata-se de arenitos finos a silticos, raramente grossos, cinza-claro a esverdeados, com matriz argilosa, fragmentos de carvão e de folhelho. Folhelhos cinza, com estratificação paralela, localmente piritoso, contendo marga castanha, compõe a Formação Taquipe. Já a Formação Pojuca são intercalações de arenitos, folhelhos, siltitos e calcários. Os arenitos são bem estratificados, em tons variegados, muito finos a médios, calcíferos. Os folhelhos são cinza-esverdeados a verde-claros, calcíferos, micáceos, carbonosos, fossilíferos. Os siltitos apresentam estratificações paralelas e cruzadas, de coloração cinza-esverdeado a cinza-esbranquiçado. Os calcários são castanhos, localmente oolíticos, ostracoidais arenosos e argilosos.

A Formação São Sebastião se apresenta estratigraficamente sobreposta ao Grupo Ilhas, em contato normal, e sotoposta à Formação Marizal (K1m) e constitui-se de arenitos grossos a finos, amarelo-avermelhados, friáveis, feldspáticos, intercalados com argilas silticas, variegadas. Sua espessura é maior que 1.500 m (GHIGNONE, 1979; LIMA, 1991 *apud* LIMA, 1999). A base formada pelo Membro Paciência é constituída por arenitos finos a grossos, levemente calcíferos, feldspáticos, com nódulos de calcário castanho-amarelado e intercalações delgadas de argila cinza-amarelado e vermelha-claro. Siltitos e folhelhos cinza-claro a cinza-avermelhado ocorrem, intercalados. Na porção mediana (Membro Passagem dos Teixeiras) predominam espessos bancos de arenitos cinza-amarelados, róseos ou cinza-esbranquiçado, finos a médios, intercalados com delgadas camadas de argilas silticas variegadas e folhelhos silticos. Superposta a esses arenitos, encontra-se uma seção constituída de argilas silticas, folhelhos e arenitos finos. A parte superior da formação (Membro Rio Joanes) é composta por arenitos róseos, cinza-avermelhado, vermelho-brilhante, maciços, arcossianos, às vezes com estratificação cruzada, podendo ocorrer, localmente, delgadas lâminas de óxido de ferro. Sobre essa sequência ocorrem intercalações de argilas silticas, folhelhos, siltitos e arenitos pobremente fossilíferos. Seus sedimentos são bastante susceptíveis a processos erosivos, quando ocorre a retirada da cobertura vegetal (VILAS BOAS, 1996).

Segundo Lima (1991), a Formação Marizal é constituída por sedimentos depositados em ambiente de leques aluviais e sistemas fluviais entrelaçados, com grandes variações faciológicas, tanto horizontal quanto verticalmente, composta principalmente por arenitos e conglomerados, apresentando ainda siltitos, folhelhos e calcários. Os arenitos têm cores variadas, granulometria variando de fina a grossa, são quartzosos, pouco micáceos,

contendo grãos de argila branca resultantes da alteração dos feldspatos originalmente presentes.

Em estudos de afloramentos e análise de seções de radar penetrante no solo (GPR), Lima (1999) descreve que os arenitos da Formação Marizal ocorrem como corpos sub-horizontais longos e acunhados, com dominação de estratificações cruzadas na sua parte basal.

Vilas Boas (1996) descreve a base dessa formação como conglomerados médios a grossos que se apresentam maciços ou estratificados, possuindo matriz predominantemente arenosa e podem conter seixos e calhaus de gnaiss, arenito, calcário, quartzo, sílex, silito, lamito, quartzito e rochas ígneas básicas. Os folhelhos são sílticos, pouco calcíferos, às vezes apresentam lâminas de gipsita e barita ou camadas de sílex bandadas. Os silitos são micáceos, argilosos, raramente ferruginosos e calcíferos. As argilas em fáceis lamíticas de caulínica clara ou illíticas avermelhadas de cores variegadas ocorrem no topo dessa formação (CBPM, 2001).

O Grupo Barreiras, como descrevem Vilas Boas (1996) e Lima (1999), é constituído por areias finas a grosseiras, argilas cinza-avermelhadas, roxas e amareladas. Também na forma de arenitos pouco consolidados, grossos a conglomeráticos de matriz caulínica, pobremente selecionados, contendo grãos de quartzo angulosos a sub-angulosos. Tanto nas areias quanto nos arenitos ocorrem estratificações cruzadas acanalada e planar nas bases dos bancos arenosos, enquanto laminações plano-paralelas predominam no topo. São comuns truncamento de estratos e presença de conglomerados basais estratificados, onde predominam seixos e grânulos arredondados de quartzo leitoso, fragmentos alterados de rocha metamórfica, arenitos e pelotas de argila (arredores de Salvador). Os níveis lamosos e argilosos são lenticulares, maciços ou finamente laminados, com espessuras inferiores a cinquenta centímetros. Leitos mais espessos são menos frequentes, com geometria tabular e grande extensão lateral. Na Região Metropolitana de Salvador sua espessura não ultrapassa 80 m (GHIGNONE, 1979; DNPM/CONDER/SGM, 1992 *apud* LIMA, 1999).

Em zonas mais preservadas, como a noroeste de Camaçari, o Barreiras ocorre na forma de tabuleiros elevados até 150 m de cota, cobertos muitas vezes por cangas ferruginosas (LIMA, 1999).

Localmente, sobreposta às formações São Sebastião e Marizal, ocorrem depósitos aluviais de areias, com lentes finas de argilas e silte, representando os sedimentos do Quaternário, sempre margeando planícies de inundação e leitos de rios. Na porção litorânea ocorrem sedimentos arenosos e argilosos continentais e marinhos.

Na zona de ocorrência do Grupo Ilhas (oeste da Falha de Salvador), a morfologia se apresenta comprimida entre baixos tabuleiros e zonas de mangue, na forma de solos argilosos, rasos, massapê esverdeados plásticos, ricos em matéria orgânica, relacionados aos calcários ricos em motmorilonita (LIMA, 1999).

2.4.4 Hidrogeologia Regional

Dentre os principais domínios geológicos armazenadores de água (fraturado, fraturado-cárstico e poroso), são as rochas sedimentares (domínio poroso) as melhores armazenadoras de água e que constituem os melhores aquíferos (ANA, 2005). Quase metade dos terrenos do Brasil é sedimentar, constituindo uma área de 4.130.000 Km², sendo que destes 2.761.086 km² constituem área de recarga para as reservas hídricas subterrâneas (ANA, 2005).

Como já comentado, em termos de gerenciamento de recursos hídricos, as áreas de influência dos aquíferos não se restringem a delimitação da bacia hidrográfica, podendo, os sistemas de aquíferos, estarem inseridos em uma ou mais unidades hidrográficas. O sistema de aquífero do Recôncavo (Marizal / São Sebastião), por exemplo, está localizado na área abrangência da unidade hidrográfica da Bacia do Recôncavo Norte. No entanto, parte desse domínio hidrogeológico se estende por regiões onde ocorrem as formações base desses aquíferos, ultrapassando inclusive limites estaduais (Bacias Sedimentares do Recôncavo / Tucano), o que pode gerar conflitos de gestão relacionados à dominialidade definido pela legislação (Figura 17).

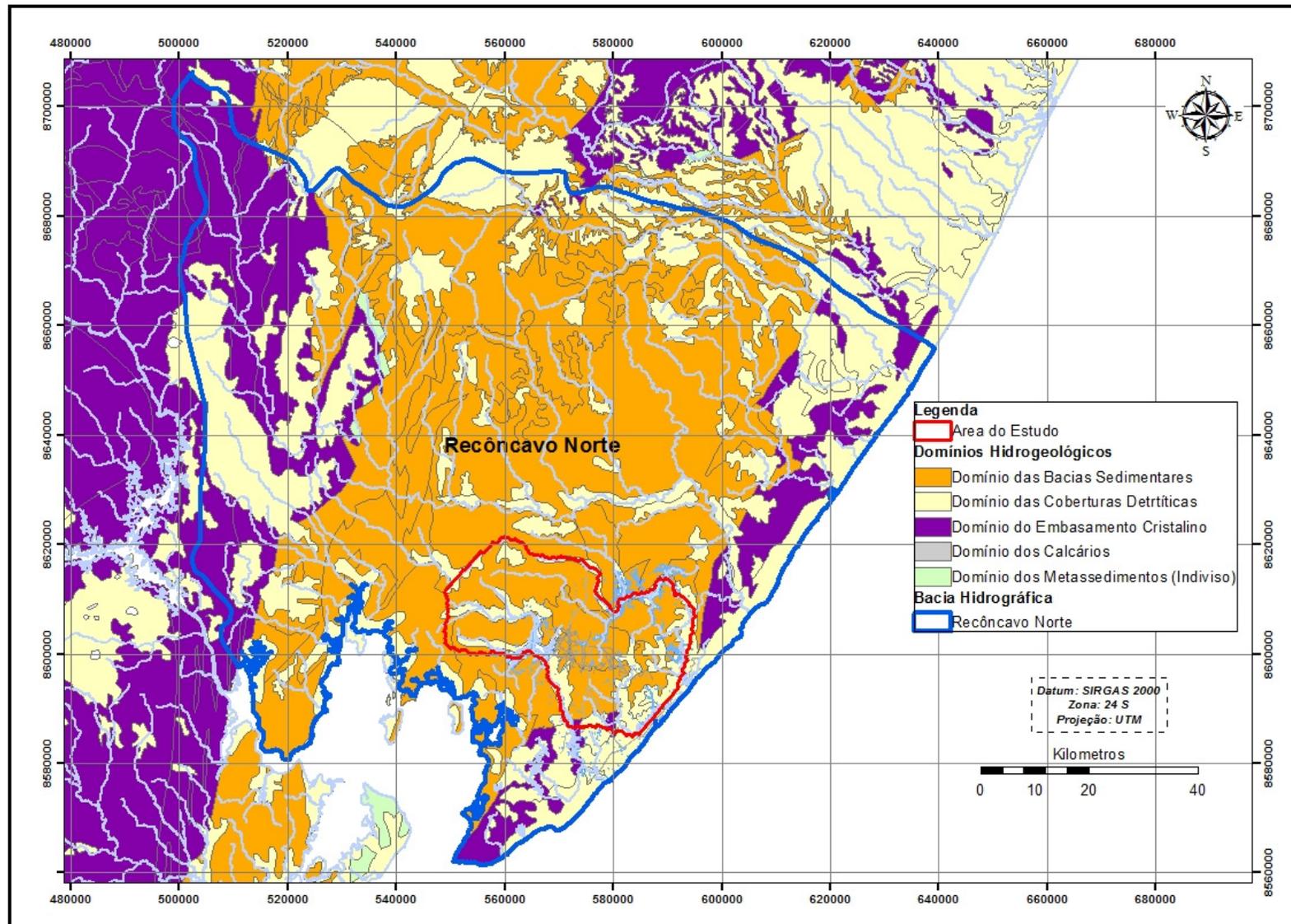


Figura 17 - Domínios Hidrogeológicos versus Unidade Hidrográfica da Bacia do Recôncavo Norte (adaptado CPRM, 2008).

Os arenitos da Formação São Sebastião representam o principal aquífero da Bacia do Recôncavo, explorado para abastecimento de cidades, comunidades e atividades industriais instaladas na região (LIMA, 1999).

Lima (1999) descreve o sistema de aquífero do recôncavo em dois componentes, sendo o primeiro, freático, composto pelas Formações Barreiras, Marizal e parte superior da Formação São Sebastião, e outro, semi-confinado ou artesiano, composto pelos arenitos dispostos totalmente na Formação São Sebastião.

A Figura 18 mostra uma seção geológica transversal ao sistema aquífero São Sebastião na área de interesse (Camaçari – Dias D'Ávila), onde se observam os níveis basais conglomeráticos da Formação Marizal em contato com a Formação São Sebastião, por vezes depositados sobre os arenitos bem selecionados ou diretamente sobre os folhelhos mergulhados na direção NW (LIMA, 1999).

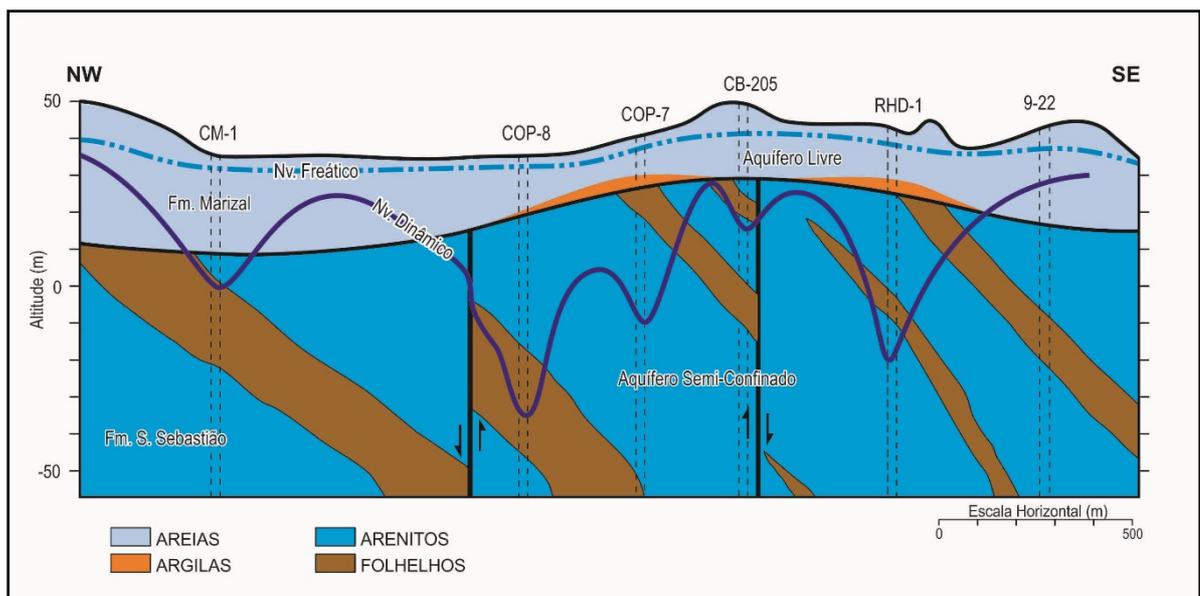


Figura 18 – Seção Hidrogeológica Transversal ao Sistema Aquífero Recôncavo na Área de Camaçari – Dias D'Ávila (LIMA, 1999).

A presença das camadas de folhelho (em espessuras que podem superar 50 metros) caracterizam o aquífero São Sebastião em trechos confinados a semi-confinados, complicando ainda a relação com o aquífero freático superior (Marizal), pois em alguns trechos ocorre conexão hidráulica entre as formações. O nível d'água das porções confinadas / semi-confinadas pode se elevar até acima da zona de contato entre as formações, podendo até se apresentar como surgente (LIMA, 1999).

Segundo estimativas da ANA (2005), foram calculados valores de $2,3 \times 10^8$ e $2,6 \times 10^8$ m³/ano sobre reservas exploráveis (potencialidade hídrica) para os aquíferos Marizal e São Sebastião, respectivamente.

A Tabela 6 resume as estimativas de áreas de recarga e reservas exploráveis anuais para os citados aquíferos.

Tabela 6. Potencialidade de Águas Subterrâneas nos Aquíferos Marizal / São Sebastião

Sistema de Aquífero	Tipo* ¹	Região Hidrográfica Dominante	Área de Recarga (km ²)	Espessura Média (m)	Precipitação (mm/ano)	Reserva m ³ /ano	
						Reguladora	Explorável
Marizal	P, L, C	Atl. Leste São Francisco	18.797	200	514	1,13x10 ⁹	2,3x10 ⁸
São Sebastião	P, L, C	Atl. Leste	6.783	-	1.358	1,29x10 ⁹	2,6x10 ⁸

*¹ P – Poroso; L – Livre; C- Confinado

Fonte: (ANA, 2005).

Um cálculo estimado do armazenamento desse sistema (Marizal / São Sebastião) foi apresentando por Lima (1999), multiplicando-se a superfície exposta pela espessura de água doce presente, pela proporção de areia e porosidade média da formação, chegando a um valor de 6×10^{11} m³ de água para reservas permanentes. A reserva anual explorável, obtida pelo produto da área exposta da formação pela altura anual de chuvas e taxa efetiva de infiltração, foi estimada em 5×10^8 m³ de água, bem próximo aos valores obtidos pela ANA (2005).

O fluxo regional subterrâneo concorda com o mergulho dos estratos, saindo de W-NW para S-SE, finalmente, o gradiente hidráulico regional é da ordem de 3,5 m/km (LIMA, 1999).

A Figura 19 mostra o Mapa Potenciométrico Regional Inferido da Bacia do Recôncavo.

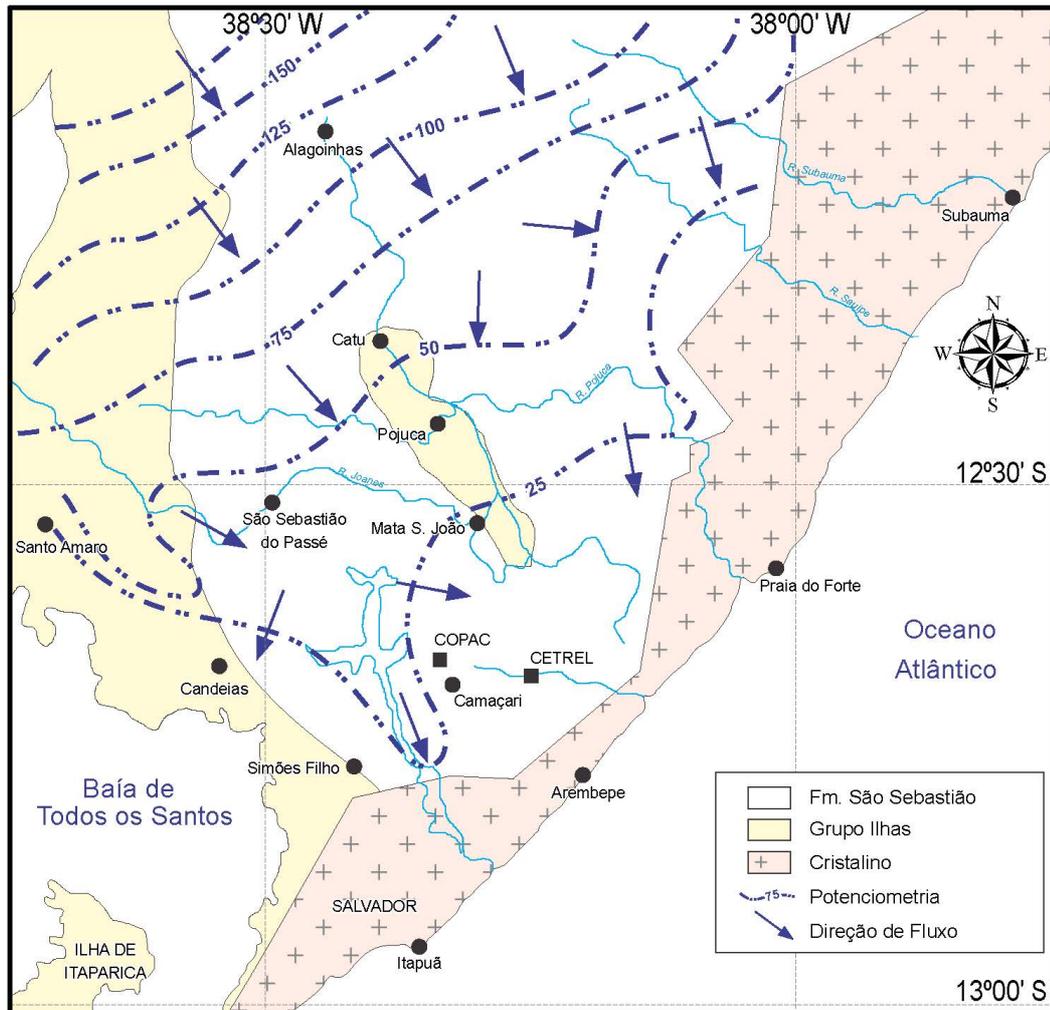


Figura 19 – Mapa Potenciométrico Inferido do Sistema Aquífero Recôncavo (modificado de LEITE, 1964 *apud* LIMA, 1999).

2.4.4.1 Hidrogeologia Local

Segundo Lima (1999), nas áreas de Camaçari e Dias D'Ávila, de interesse para o atual estudo, no intervalo de 500 metros de profundidade, ocorrem sedimentos das Formações Barreiras e Marizal, dispostos de forma discordante sobre a Formação São Sebastião.

O Mapa Geológico mais localizado (Figura 20) mostra o posicionamento das Falhas de Leandrino e Falha de Camaçari, ambas situadas na porção central da área de estudo, interpretada por Lima (1999) a partir de dados geofísicos obtidos da Petrobrás.

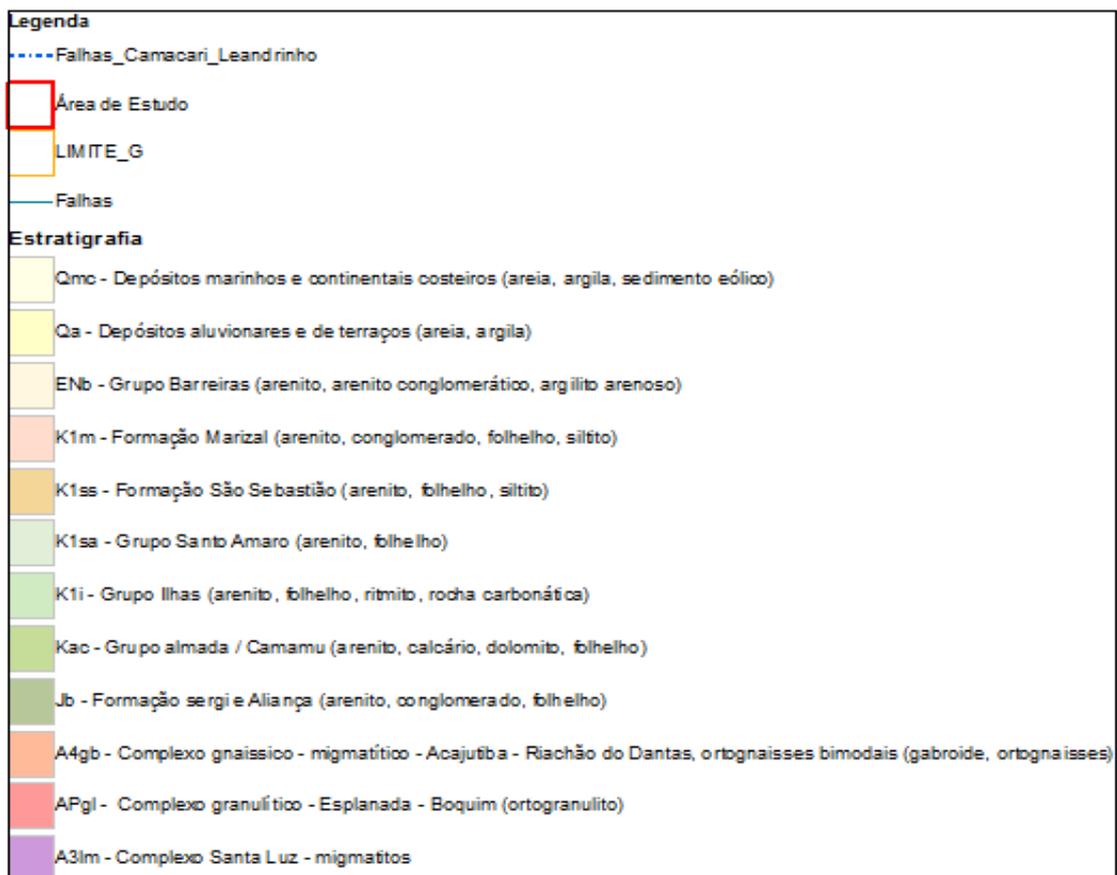
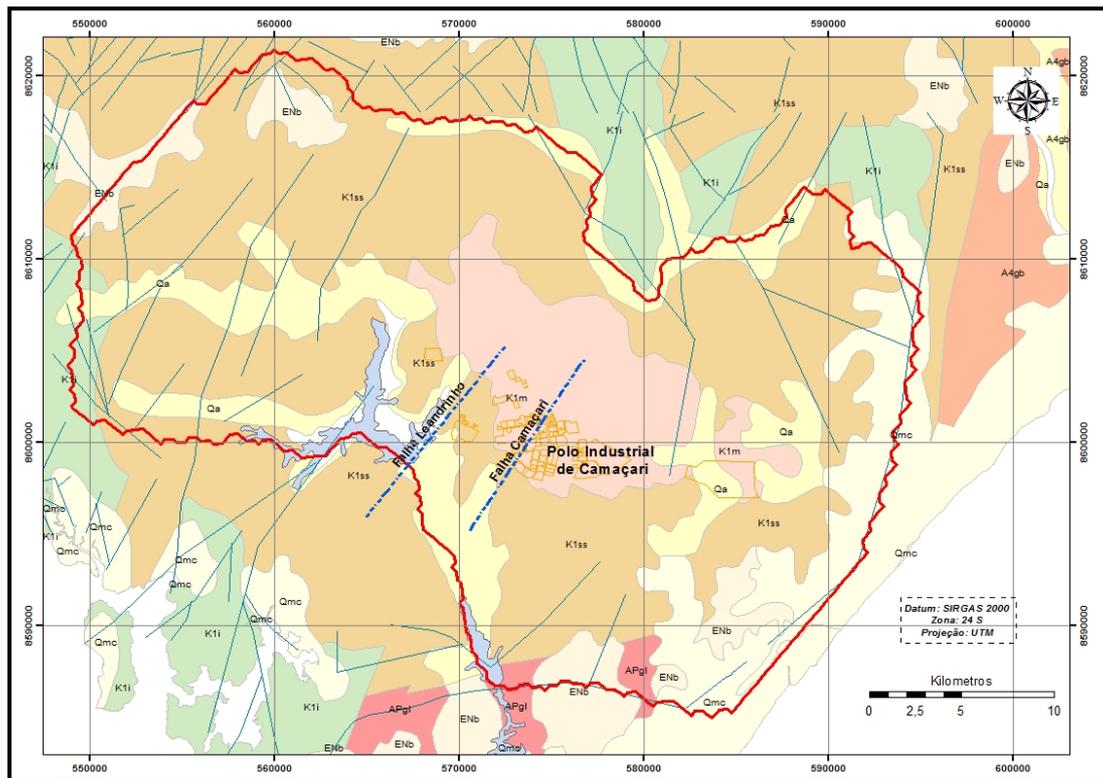


Figura 20 – Mapa Geológico Regional com Falhas Camaçari e Leandrino (modificado de CPRM, 1990).

As supracitadas falhas movimentaram verticalmente os blocos de rochas, soerguendo áreas que foram posteriormente erodidas e elevando as porções mais profundas das camadas.

A despeito dos trabalhos desenvolvidos por Lima (1999), mapear a hidrogeologia local não é tarefa simples, especialmente porque grande parte dos poços de monitoramento instalados na área alvo do estudo se concentra nos limites do Complexo Industrial de Camaçari, penetrando apenas a Formação Marizal.

Maia Nobre (1996) apresentou um modelo deposicional para a Formação Marizal (Figura 21), indicando sistema de deposição angular discordante sobre a F. São Sebastião, mostrando relevo acidentado com elevações e depressões entre as formações.

O trabalho de Maia Nobre (1996) envolveu a avaliação litoestratigráfica dos poços de monitoramento rasos (até 30 metros de profundidade) instalados na F. Marizal, cujos resultados indicaram ainda a deposição sobre forma de rios entrelaçados, largos e rasos e com baixa sinuosidade. O sistema fluvial resultante apresenta características multi-empilhada, que favorece a existência de aquíferos sem grandes conectividades dentro de um mesmo sistema.

Devido a esse caráter, os pacotes sedimentares produtores de água na região, estão posicionados nas camadas da Formação São Sebastião, que possui caráter confinado a semi-confinado, apresentando conexão hidráulica em alguns trechos, recortados por falhas menores.

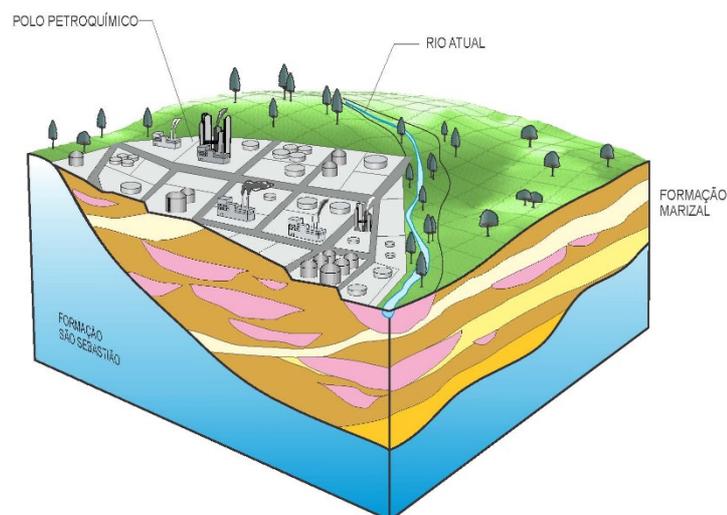


Figura 21 – Modelo Depositional para a Formação Marizal (MAIA NOBRE, 1996).

2.5 Gestão dos Recursos Hídricos na Área de Estudo

2.5.1 Avaliação do Histórico de Exploração

No projeto inicial de instalação do Pólo Petroquímico, para o suprimento das demandas hídricas foi definido o reservatório Joanes II, contudo, com o aumento da demanda e longos períodos de estiagem ao longo dos anos, logo foi necessário buscar alternativas de abastecimento. Devido a grande potencialidade do sistema aquífero subjacente ao PIC (Polo Industrial de Camaçari), o Aquífero São Sebastião, com estimativas de reservas reguladoras (renováveis) de $1,29 \times 10^9$ m³/ano (ANA, 2005), as águas subterrâneas se tornaram alternativa mais utilizada, transformando-se em importante fonte de abastecimento urbano e industrial da RMS. A partir de 2009, o PIC passou a ser abastecido também pelo reservatório de Santa Helena e vem estudando alternativas de abastecimento e exploração em área do entorno, mais distantes das instalações industriais.

Estudos conduzidos no final da década de 80 indicaram sinais de superexploração do aquífero São Sebastião, por conta da elevada quantidade de poços instalados bem como elevadas vazões de exploração, sem o devido planejamento e controle. Foram identificados ainda problemas técnicos no projeto construtivo dos poços instalados, como a conexão de camadas superficiais com as camadas do aquífero confinado. Os estudos indicaram o rebaixamento do aquífero profundo, provocado pela superexploração, formando um extenso cone de depressão, especialmente na área do Complexo Básico, modificando o padrão regional de fluxo e potencializando os riscos de migração vertical de contaminantes para níveis mais profundos do aquífero.

O quadro hidrogeológico da região no final da década de 80 mostrava problemas com os rebaixamentos excessivos, inversões de fluxo e aumento do gradiente hidráulico em algumas áreas, e nesse contexto, o Programa de Gerenciamento das Águas Subterrâneas do Polo Industrial de Camaçari (PGRH) foi criado em 1993, tendo como um dos objetivos reverter o quadro de superexploração verificado.

Como uma das primeiras ações, o PGRH recomendou a paralisação de uma quantidade poços de bombeamento que apresentavam problemas em seu projeto construtivo, e outros que exerciam maior influência no rebaixamento do aquífero. No decorrer da década de 90 e início do ano 2000, foi observado o efeito da paralisação dos poços de produção com a recuperação dos níveis do aquífero, em alguns locais em mais de 20 metros.

Como decorrência desse processo, reduziu-se a possibilidade de indução de contaminantes em níveis mais profundos do aquífero, além disso, novos sistemas de captação foram instalados em áreas mais afastadas das instalações industriais.

Outras ações importantes para evitar/reduzir impactos sobre os recursos hídricos da região do PIC foram a transferência do lançamento dos efluentes líquidos, que até 1993, eram tratados na ETE da CETREL e depois lançados no rio Capivara Pequeno, para um emissário submarino e a criação de uma Barreira Hidráulica, que têm contido as plumas de contaminantes do lençol freático dentro dos limites da área industrial do PIC.

A primeira proposta de Zoneamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos foi elaborada em 2003, após a finalização da construção do modelo numérico de fluxo regional, e vêm sendo atualizada a cada três anos, acompanhando a renovação da Licença de Operação do Polo, como instrumento para gestão e uso racional dos recursos hídricos.

Contudo, o novo ciclo de expansão do Pólo e crescimento das zonas urbanas de Dias D'Ávila, Camaçari e Mata de São João, verificado nos últimos anos, provocou um aumento na demanda de água. Volumes elevados de água subterrânea foram outorgados em áreas circunvizinhas ao Complexo Básico do PIC entre 2009 e 2012, que são captadas por poços com profundidades entre 400 e 450m.

A operação dessas baterias de poços provocou mudanças potenciométricas no Aquífero São Sebastião. Novas evidências de superexploração localizadas começaram a ser notadas. Rebaixamentos maiores que aqueles previstos nos projetos fizeram com que os sistemas não captassem os volumes outorgados, como no caso do sistema de captação situado na Área Industrial Norte que bombeava 20% a menos que o projetado e a bateria de poços da região a sudoeste do Complexo Básico, 38% menos.

Nos poços de produção mais antigos localizados nas proximidades da área Norte verificou-se rebaixamentos excessivos, especialmente após o início de operação dos dois últimos sistemas implantados. A partir de 2009 rebaixamentos potenciométricos foram verificados em poços de monitoramentos rasos localizados nas áreas norte e sul do Complexo Básico. Esse quadro mostrou a necessidade do aprimoramento do gerenciamento dos recursos hídricos, para evitar o retorno ao quadro de super exploração caracterizado até 1993 e, para isso, a redução dos volumes explotados nas regiões localizadas a norte e ao sul do Complexo Básico era imprescindível.

Estudos de risco conduzidos em 2012 resultaram em novas ações e recomendações de paralisações de poços dentro da área industrial e redução de vazão de outros poços. Vale ressaltar que no processo de gestão praticado pelo COFIC / CETREL as alternativas de

abastecimento são previamente alinhadas e planejadas juntos com os usuários (empresas), portanto a paralisação dos poços não é imediata.

Esta situação levou o PGRH, a buscar novas áreas para exploração de água subterrânea para permitir a redução dos volumes explorados nas áreas consideradas críticas e conseqüentemente dos rebaixamentos potenciométricos e níveis de interferência entre poços; o reaproveitamento de águas servidas (reuso) e um novo modelo para o gerenciamento da água em seus processos, considerando novas opções e soluções que impliquem em autonomia e sustentabilidade no abastecimento de água e racionalização/redução no seu consumo e a integração do risco ambiental e a saúde humana na gestão das águas subterrâneas.

Em 2012, o PGRH elaborou um “Plano de Gestão Integrada e Zoneamento dos Recursos Hídricos no Polo Industrial de Camaçari”, que estabelecia critérios de sustentabilidade para a exploração de águas subterrâneas na Poligonal do Polo através da definição de áreas com restrições ao uso e áreas apropriadas para exploração desses recursos. Previa ainda a desativação, ou redução de vazão, de poços de produção de água, aumento da oferta de águas superficiais e, para aqueles processos industriais que necessitam de água de qualidade superior, perfuração de novos poços para captação de águas subterrâneas em outras áreas, mas de acordo com os critérios estabelecidos por um “Plano de Gestão Integrado”.

O objetivo principal desse Plano seria uma solução ambientalmente sustentável para o abastecimento industrial atual do Polo, bem como para atender ampliações de demandas anunciadas por algumas empresas já instaladas e por outras que manifestaram interesse em se instalarem no Polo.

O documento supracitado foi utilizado pelo Governo do Estado da Bahia na revisão do Plano Diretor do Polo Industrial de Camaçari em 2013 (BAHIA, 2013), o qual contempla o Zoneamento de Gestão dos Recursos Hídricos, como recomendado pela CETREL, através de 08 Zonas Hídricas.

Esse zoneamento hídrico, no entanto, foi delineado de modo a abranger apenas as áreas consideradas de uso industrial (Poligonal do Polo Industrial SUDIC), sendo desconsideradas as áreas do entorno da Poligonal, que abrangiam toda a área considerada pelo Modelo Numérico de Fluxo Regional (MNFR).

Tal premissa foi provavelmente considerada em função das dificuldades encontradas para a integração do processo de gestão dos recursos hídricos em áreas em que o PGRH não tinha domínio. Entretanto, o crescimento desordenado das cidades do entorno e

consequente aumento da exploração dos recursos hídricos subterrâneos pode impactar diretamente na gestão interna do Polo Industrial, e uma integração desses processos deveria ser requisitada.

A premissa de restrição da área alvo da gestão interna do Pólo teve como consequência a revisão do Modelo Numérico de Fluxo Regional (MNFR) para um domínio menor ao construído originalmente, mas ainda ocupando uma área maior que a Poligonal Industrial. Em 2014 foi realizada a atualização do MNFR, englobando a Análise de Sensibilidade com relação ao novo domínio proposto, que representou 60% da área do modelo original.

2.5.2 Modelo Numérico de Fluxo Regional

Entre os anos de 2002 e 2003 foi elaborado pela empresa Waterloo Brasil, sob gestão da CETREL, um modelo conceitual hidrogeológico da região, implementado num modelo numérico tridimensional, cujo objetivo foi auxiliar na gestão dos recursos hídricos quanto ao zoneamento sustentável dos recursos e ferramenta de controle e preditiva na avaliação de futuros poços de extração, tanto em termos de localização quanto de regime operacional.

A seguir será apresentado um resumo deste trabalho, com as premissas técnicas básicas consideradas para a construção do modelo conceitual e posterior modelo numérico de fluxo.

2.5.2.1 Modelo Conceitual

Para construção do modelo conceitual foram utilizadas informações da geologia local, obtidas principalmente a partir dos boletins de perfuração dos poços de produção e de monitoramento de conhecimento da CETREL S. A.

A partir dessas informações e dados da bibliografia geológica da região (descrição das formações, estruturas e falhas geológicas) foram construídos perfis litoestratigráficos, utilizados na interpretação e definição das camadas do modelo numérico de fluxo.

Os dados disponíveis dos poços de produção em operação, assim como informações de testes de bombeamento e testes de aquífero (com poços de observação), foram utilizados para avaliação dos regimes de exploração da época (2002-2003), rebaixamentos observados e, principalmente para cálculos e estimativas das propriedades hidrodinâmicas do aquífero.

A capacidade específica média do aquífero calculada com base nos dados de 2002-2003 era de aproximadamente $3\text{m}^3/\text{h}/\text{m}$ (variando de 0,01 a $11,76\text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$). A profundidade média de exploração era de 229 metros.

O volume total de exploração estimado foi de $282.217\text{ m}^3/\text{d}$, considerando apenas os poços de produção da área monitorada pela CETREL.

O padrão de fluxo regional para o aquífero profundo registrava uma tendência de noroeste para sudeste, com componente de menor fluxo para a Baía de Todos os Santos. A descarga principal se dava no contato do aquífero com o embasamento cristalino (F. Salvador), a sudeste.

Foi observada na área de maior densidade de poços de produção, no complexo industrial, a existência de uma inflexão do fluxo do aquífero profundo na direção dos poços de extração, e na porção mais rasa, freática, o fluxo tende a seguir o padrão da topografia, na direção das drenagens superficiais.

As estimativas das taxas de recarga obtidas a partir da análise de dados climatológicos foram na faixa de 350 até $550\text{ mm}/\text{ano}$. Contudo, os dados se basearam em apenas uma estação meteorológica, com série histórica de apenas 4 anos de observação.

Os valores de transmissividade foram obtidos a partir de ensaios de bombeamento ou calculados / estimados com base na capacidade específica dos poços, e estiveram na faixa de 10 a $300\text{ m}^3/\text{d}/\text{m}$. Os valores de condutividade hidráulica foram calculados a partir dos valores de transmissividade, sendo obtidos faixas de $1\text{E}-6$ a $1\text{E}-4\text{ cm}/\text{s}$.

Os valores de armazenamento não foram calculados por conta da escassez de dados de testes de aquíferos com poços de observação, sendo obtidos por modelagem matemática numérica, através da reprodução de um ensaio de bombeamento com vários poços de observação, situando-se na faixa de $1\text{E}-5$ a $1\text{E}-4$, com porosidade eficaz na faixa de 10 a 20 %.

2.5.2.2 Geometria das Camadas

Nos estudos conduzidos entre 2002 e 2003, com base em dados de descrições litológicas de poços, interpretação de mapa geológico e estudos sobre a geologia da região, foram construídos perfis litoestratigráficos simplificados, que posteriormente correlacionados e interpretados, foram consolidados em um modelo conceitual de 8 camadas, inseridas no MODFLOW para as simulações numéricas de fluxo.

A hipótese da continuidade das camadas foi testada no modelo, não indicando consistência, dessa forma, as heterogeneidades observadas nas camadas foram inseridas no modelo através da interpolação dos valores de condutividades hidráulicas observados.

2.5.2.3 Modelo Numérico

Para construção e simulação do modelo numérico de fluxo foi utilizado o *software* Visual MODFLOW (GUIGUER & FRANZ, 1996), o qual utiliza pré e pós processadores desenvolvidos para o modelo MODFLOW (McDONALD & HARBAUGH, 1988) do Serviço Geológico Americano (USGS).

Como já abordado, esse modelo resolve a equação geral de fluxo tridimensional através do método de diferenças finitas, em malha quadrática, comportando diferentes condições de contorno, heterogeneidades e anisotropia, camadas horizontais ou inclinadas, simulação de fluxo em regime transiente ou estacionário, de modo a simular as condições hidrológicas locais.

O Visual MODFLOW incorpora ainda o programa MODPATH, que calcula a trajetória de partículas hipotéticas lançadas no aquífero, tanto no sentido do fluxo, quanto no sentido contrário (retropropagação). Uma técnica bastante útil na definição de zonas de captura de poços e linhas de fluxo, e que pode ser utilizada para simular o tempo de trânsito de contaminantes por processos advectivos.

Para o trabalho desenvolvido pela Waterloo (2003) foram utilizados dentro do Visual MODFLOW os seguintes aplicativos:

- MODFLOW: para o cálculo das cargas hidráulicas em cada nó, pelo método de diferenças finitas.
- MODPATH: para a simulação de trajetórias de partículas hipotéticas e consequente simulação de zonas de captura de poços ou conjunto de poços.
- Zone Budget: para determinação do balanço hídrico e das zonas hídricas específicas dentro do modelo.
- PEST: para rotinas de calibração e análise de sensibilidade do modelo.
- VMOD 3D Explorer: para visualização e auxílio na interpretação tridimensional dos resultados obtidos.

2.5.2.4 Revisões, Calibrações e Análise de Sensibilidade

Com vistas à efetividade do uso do modelo numérico de fluxo regional nas atividades de gestão de águas subterrâneas do Complexo Industrial de Camaçari, especialmente no que concerne a exploração de águas do aquífero, e atualização do zoneamento hídrico foi inserida na condicionante de licença de operação do Polo (Portaria IMA 12.064, de 30/12/2009) a necessidade de revisão, atualização e calibração do modelo numérico de fluxo a cada três anos.

A última atualização do Modelo Numérico de Fluxo da Região foi realizada entre 2014/2015 e os trabalhos conduzidos contemplaram as seguintes etapas:

- Consolidação dos dados históricos do PIC para atualização do modelo para as condições mais atuais (dados PGRH-2015);
- Adaptação do modelo original para um novo modelo com menor domínio (60% da área original) para possibilitar menor esforço computacional na simulação de cenários hipotéticos, com a eliminação de áreas remotas e isentas de monitoramento, fora da zona de interesse do PIC;
- Realização de Análises de sensibilidade, contemplando a variação das condições hidrogeológicas do modelo, condições de contorno de fluxo, bem como condições operacionais de poços de produção.

2.5.2.5 Malha Numérica e Condições de Contorno

No domínio regional anterior (2003), a área total de modelagem era de 1.562 km², com discretização de células entre 50 m (área da Barreira Hidráulica da CETREL) a 500 m (fronteiras do domínio), com a aplicação das condições de contorno (Figura 22).

O domínio vertical do modelo varia de -500 m até + 143 m acima do nível do mar, discretizado em 8 camadas (Figura 23).

Para o novo domínio (2014) a área efetiva de modelagem é de 961 km², cerca de 60% da área do modelo original. As alterações incluíram a definição de novas condições de contorno em fronteiras naturais mais próximas do Polo Industrial e da zona de interesse do estudo (Figura 24). No novo domínio a discretização vertical não foi alterada.

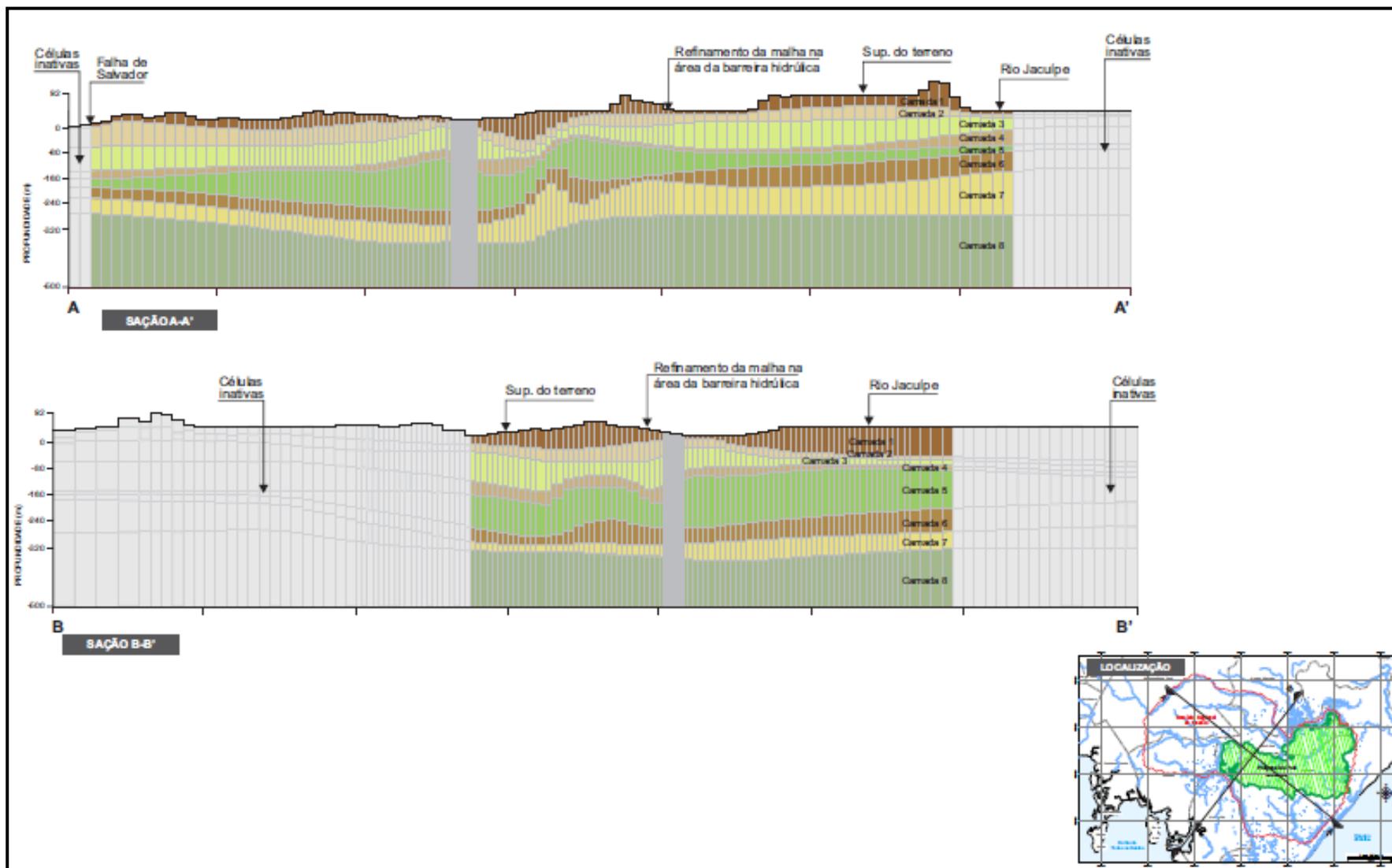


Figura 23 - Domínio Vertical do Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).

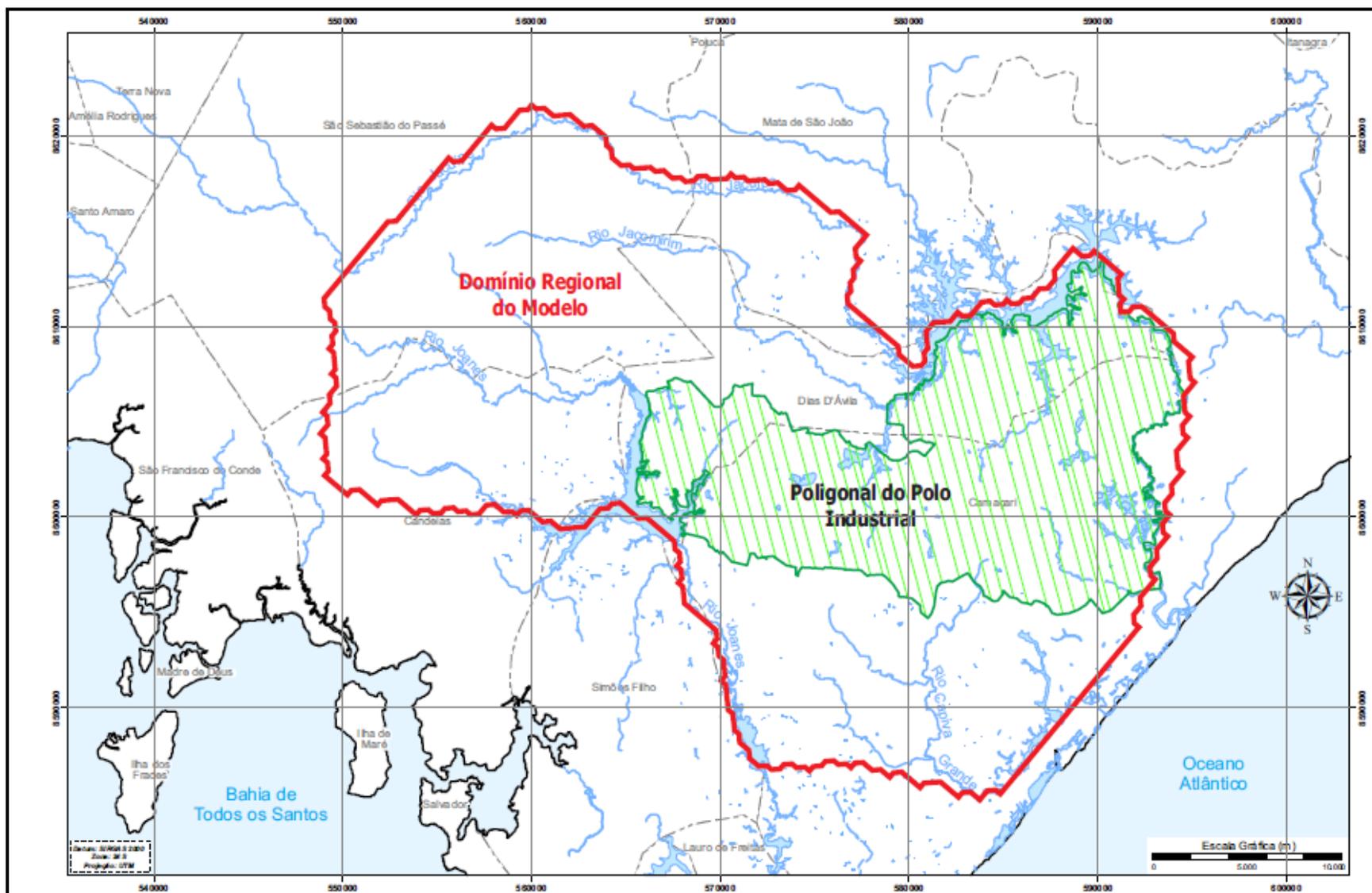


Figura 24 – Novo Domínio Regional do Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).

Vale observar que para o novo domínio não houve alteração/refinamento da malha numérica, nem alteração significativa dos parâmetros hidráulicos, apenas adaptação do modelo para as novas condições de contorno e nova calibração.

A área de domínio do Modelo Numérico de Fluxo Regional, definida em 2014, é coincidente com a área alvo do estudo deste trabalho, propositalmente assim escolhida em função das informações, dados e estudos disponíveis para o desenvolvimento da pesquisa.

As condições de contorno de fluxo adotadas para o modelo foram do 1º. tipo – Dirichlet (fronteira Ω_1); do 2º. tipo – Neumann (fronteira Ω_2) ou do 3º. tipo – General Head ou Cauchy (fronteira Ω_3). Para cada camada foram adotadas condições de contorno específicas, com exceção das camadas 5 a 7 que possuem as mesmas condições. A fronteira Ω_1 atribuída à camada 8 foi um artifício adotado para evitar células secas na superfície. Na atualização do domínio do modelo, realizada em 2013, foram atribuídas condições de contorno de fluxo similares ao modelo original aplicadas ao novo domínio reduzido, limitado ao norte pelo rio Jacuípe e ao sul pelo rio Joanes.

2.5.2.6 Limitações do Modelo Numérico de Fluxo Regional

O modelo numérico de fluxo apresenta limitações técnicas quanto à representação da condição hidrogeológica da região em alguns aspectos, tais quais:

- As condições de semi-confinamento do aquífero mais profundo (maiores que 200 m de profundidade), em função da presença de uma camada de folhelho que varia de 40 a 80 metros de espessura na região não está bem representada no modelo, que registra conexão hidráulica entre todas as camadas, simulando rebaixamentos provocados no aquífero freático que não se confirmam na realidade. Por outro lado, em algumas regiões a conexão hidráulica entre as camadas é observada em campo, e essas diferenças são difíceis de representar no modelo;
- Na construção do modelo foram atribuídos valores de condutividade hidráulica dos poços através da espacialização por processos de krigagem, que nem sempre representam as heterogeneidades reais do aquífero;
- O modelo numérico de fluxo representa as camadas até a profundidade de 500 m, separado em 8 camadas que se diferem por suas características hidrogeológicas, entretando as profundidades de exploração de boa parte dos

cadastrados está entre 200 e 550 metros de profundidade e nessa profundidade praticamente não existem poços de observação que possam ser utilizados como pontos de calibração do modelo;

- Os poços de produção cadastrados são aqueles que fazem parte do programa de monitoramento do Polo Industrial de Camaçari (PGRH), mas o modelo também contempla outros poços do entorno, como os administrados pela EMBASA ou concessões de exploração de água mineral pelo DNPM, entretanto esse banco de dados necessita de atualização constante, as quais são limitadas por questões financeiras e estruturais;
- As variações de condutividade hidráulicas são mais relevantes nas primeiras camadas do modelo, da camada 6 em diante, os efeitos de anisotropia são desprezados, portanto a geometria das zonas de captura para essas camadas tende a ser mais arredondada, considerando o aquífero isotrópico e homogêneo. Como consequência, os rebaixamentos simulados no modelo podem ser superestimados.
- A base topográfica utilizada para representação do terreno registra discordância com as cotas de nível estático de alguns poços de monitoramento.

Nas avaliações locais de novos poços para exploração de água, o técnico deve ter em mente as limitações previstas e sempre que possível realizar ajustes finos, comparando ainda os dados obtidos em simulações com os dados de campo.

2.5.3 Zoneamento Hídrico Regional

O primeiro zoneamento hídrico proposto para a região foi construído em 2003, subsidiado pelo modelo numérico e mapeamento de vulnerabilidade intrínseca do aquífero. Esse primeiro zoneamento compartimentou a área de domínio do modelo e 13 unidades de gerenciamento (WATERLOO, 2003).

Em 2011, uma nova proposta foi apresentada pela CETREL, limitada às áreas de zoneamento à poligonal do pólo industrial, onde havia um maior controle dos aspectos de gestão e avaliação dos poços de abastecimento para a indústria. Essa proposta foi utilizada na construção do Zoneamento Hídrico contido no Plano Diretor do Polo Industrial de Camaçari (2013), que ainda está em tramitação na câmara dos vereadores para discussão.

O Zoneamento Hídrico atual está representado na Figura 25, e estabelece 08 Zonas Hídricas (ZH), apenas dentro da Poligonal do PIC, considerando critérios geológicos,

evidências de superexploração, passivos ambientais, análise de risco e ampliações das captações destinadas ao abastecimento público.

As Zonas Hídricas (ZH) foram classificadas da seguinte forma:

- ZH-01 – Zona Hídrica 01: Zona com potencial de exploração de água subterrânea.
- ZH-02 – Zona Hídrica 02: Zona com potencial de exploração parcial, passível de ampliação.
- ZH-03 – Zona Hídrica 03: Zona de controle e redução de exploração de águas subterrâneas por condição de superexploração.
- ZH-04 – Zona Hídrica 04: Zona não passível de exploração de águas subterrâneas por superexploração e riscos de contaminação por atividades industriais da petroquímica.
- ZH-05 – Zona Hídrica 05: Zona com exploração parcial, passível de ampliação.
- ZH-06 – Zona Hídrica 06: Zona não passível de exploração de águas subterrâneas por riscos de contaminação causados pela concentração de efluentes líquidos na ETE.
- ZH-07 – Zona Hídrica 07: Zona com potencial de exploração de água subterrânea.
- ZH-08 – Zona Hídrica 08: Zona reservada para abastecimento futuro a partir do aquífero São Sebastião e de exploração estratégica de água superficial a partir da Represa Santa Helena.

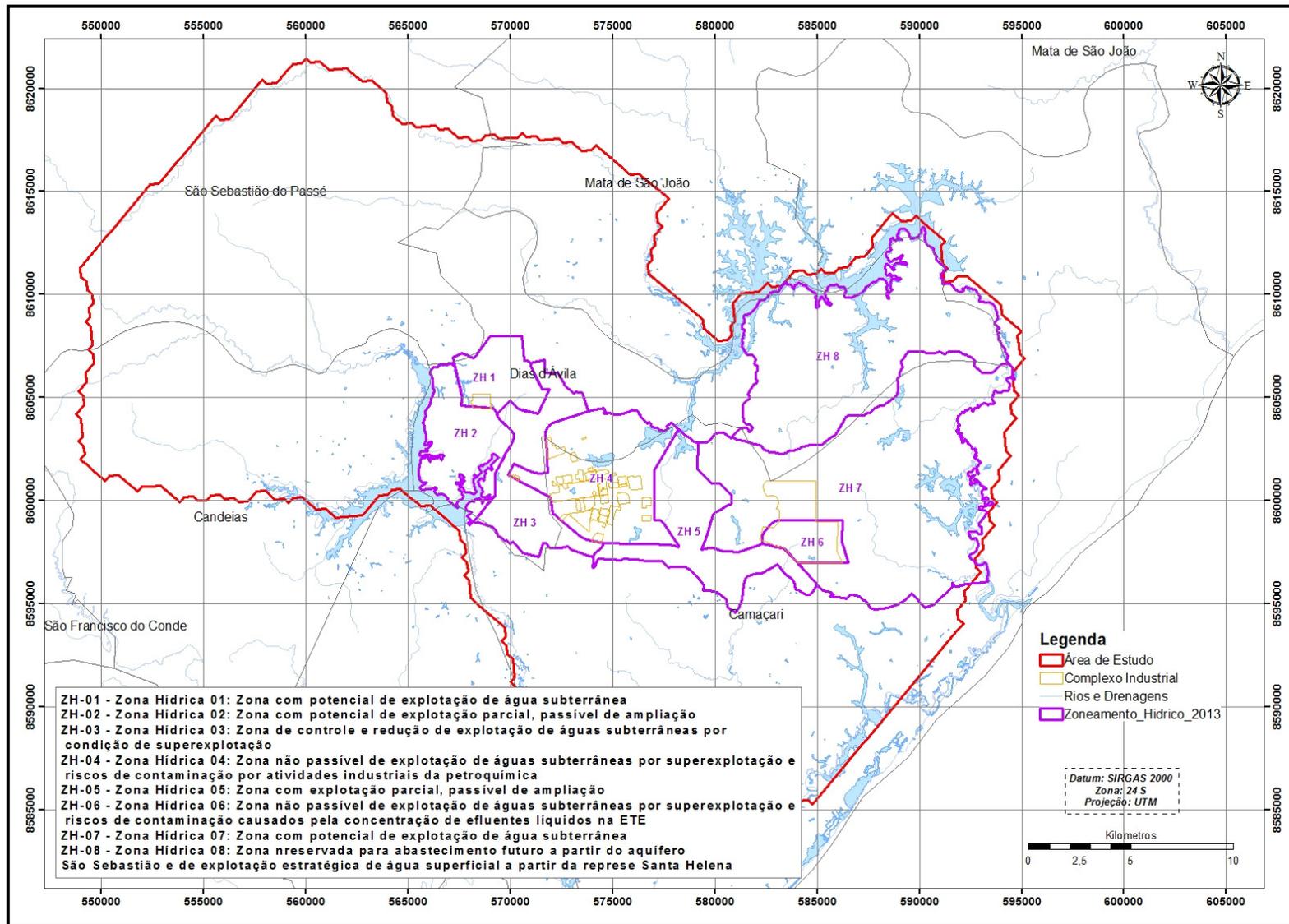


Figura 25 – Zoneamento Hídrico (adaptado de BAHIA, 2013).

2.5.4 Condições Atuais de Exploração

Segundo dados levantados pela CETREL (2015) dentro da área objeto do estudo existem, atualmente, 85 poços de produção em operação, incluindo poços da área industrial e poços da Embasa Dias D'Ávila, Água Dias D'Ávila, Água Indaiá e Leandrino. Esses dados estão resumidos na Tabela 7a e Tabela 7b.

As vazões médias para o ano de 2013 indicadas em vermelho foram obtidas através de visita de campo, são estimadas. As vazões médias para ano de 2015 indicadas em azul foram repetidas de 2013 para 2015. A consideração desses valores estimados auxilia na estimativa de vazões totais operacionais para os poços em operação.

Para alguns poços não foi possível realizar estimativas de vazão. Na gestão interna do Pólo Industrial é exigida a instalação de medidores de vazão e nível, de acordo com as normas, contudo nem todas as empresas atendem a esses requisitos, o que dificulta o monitoramento.

Portanto, com base nas informações disponíveis no banco de dados da CETREL (poços de produção monitorados mensalmente), o volume total de exploração pelos poços de bombeamento em 2015 na área do Polo Industrial foi de 8.398 m³/h. (201.560 m³/d), o que equivale a uma disponibilidade efetiva instalada de 73.569.546 m³/ano. Esses valores estão subestimados, pois não incluem alguns poços sem medidores e não incluem alguns poços do entorno operados pela Embasa ou fiscalizados pelo DNPM.

O mapa de localização desses poços de produção pode ser conferido na Figura 26.

Sobre os poços de monitoramento possíveis de serem monitorados na área de abrangência do estudo, praticamente 100% desse total estão adensados na porção central do Polo Industrial, como mostra a Figura 27.

Tabela 7 a. Vazões Médias Baseadas em Leituras de Hidrômetros (Monitoramento Mensal)

Poço	Prof. (m)	Vazão Média (2013) - m ³ /h	Vazão Média (2015) - m ³ /h	Vazão Média (2015) - m ³ /d	Perfil Disponível?
PP-C/001	265	SI	SI	SI	S
PP-B/009	451	159	187	4.476	S
PP-B/010	450	182	181	4.348	S
PP-B/011	480	203	166	3.992	S
PP-B/012	454	165	172	4.116	S
PP-B/013	450	200	202	4.848	S
PP-B/014	449	202	186	4.471	S
PP-B/015	450	216	142	3.396	S
PP-B/016	450	162	191	4.572	S
PP-B/017	448	197	177	4.256	S
PP-B/018	451	150	176	4.232	S
PP-B/019	449	218	191	4.576	S
PP-D/002	146	7	23	563	S
PP-E/001	350	55	52	1.256	S
PP-E/002	370	47	48	1.158	S
PP-E/003	370	59	46	1.098	S
PP-E/005	377	65	49	1.178	S
PP-E/008	365	36	140	3.360	S
PP-F/001	185	SI	59	1.420	S
PP-F/002	100	12	12	288	S
PP-G/001	100	SI	SI	SI	S
PP-G/002	84	27	24	577	S/I
PP-H/004	145	SI	5	120	S
PP-I/004	152	68	21	501	S
PP-I/006	81	7	0	0	S
PP-I/008	70	8	9	205	S
PP-I/010	130	14	35	840	S
PP-J/001	271	73	73	1.752	S
PP-K/010	337	158	140	3.363	S
PP-K/014	363	155	155	3.720	S
PP-K/015	346	101	101	2.424	S
PP-K/017	420	213	200	4.804	S
PP-K/020	420	216	216	5.184	S
PP-K/021	420	205	201	4.812	S
PP-K/022	450	SI	230	5.520	S
PP-K/023	450	SI	194	4.662	S
PP-K/024	550	SI	230	5.520	S
PP-K/025	514	SI	SI	SI	S
PP-K/026	-	3	6	138	S/I
PP-L/001	130	12	12	288	S
PP-M/001	250	135	96	2.300	S
PP-N/001	166	5	7	161	S/I

SI – sem informações Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 7. b. Vazões Médias Baseadas em Leituras de Hidrômetros (Monitoramento Mensal)

Poço	Prof. (m)	Vazão Média (2013) - m ³ /h	Vazão Média (2015) - m ³ /h	Vazão Média (2015) - m ³ /d	Perfil Disponível?
PP-O/002	-	37	33	790	S/I
PP-P/001	70	0	14	336	S
PP-Q/004	360	200	200	4.800	S
PP-R/002	370	200	200	4.800	S
PP-S/001	450	200	200	4.800	S
PP-S/002	356	200	200	4.800	S
PP-S/003	364	200	200	4.800	S
PP-S/004	328	200	200	4.800	S
PP-S/005	160	SI	SI	SI	S
PP-S/006	171	SI	25	608	S
PP-T/002	178	72	110	2.643	S
PP-T/004	-	147	170	4.080	S/I
PP-T/005	120	69	57	1.376	S
PP-T/006	-	SI	179	4.284	S/I
PP-T/007	260	SI	152	3.655	S
PP-T/008	-	10	10	240	S/I
PP-T/010	-	10	10	240	S/I
PP-U/002	200	283	283	6.792	S
PP-U/003	-	SI	58	1.383	S/I
PP-V/004	65	8	2	49	S
PP-V/005	-	SI	SI	SI	S/I
PP-X/001	400	88	88	2.112	S
PP-Z/002	400	84	84	2.016	S
PP-ZA/001	150	8	12	279	S
PP- ZA /002	410	64	78	1.872	S
PP-ZB/001	427	253	240	5.748	S
PP-ZC/001	407	206	208	4.980	S
PP-ZC/002	408	189	87	2.085	S
PP-ZC/003	477		173	4.147	S
PP-ZC/004	340	323	323	7.752	S
PP-ZC/005	351	237	237	5.688	S
PP-ZD/001	100	25	13	314	S
PP-ZD/002	240	SI	SI	SI	S
PP-ZE/003	200	77	40	960	S
PP-A/001	-	SI	40	960	S/I
PP-ZF/001	48	1	6	140	S
PP-ZG/001	70	2	2	48	SI
PP-ZH/001	291	2	62	1.489	S
PP-ZI/002	205	SI	68	1.624	S
PP-ZJ/001	-	6	5	111	S/I
PP-ZK/001	150	8	7	172	S
PP-ZL/001	110	2	7	177	S
PP-ZM/001	96	SI	3	77	S

SI – sem informações Fonte: Elaborado pela autora.

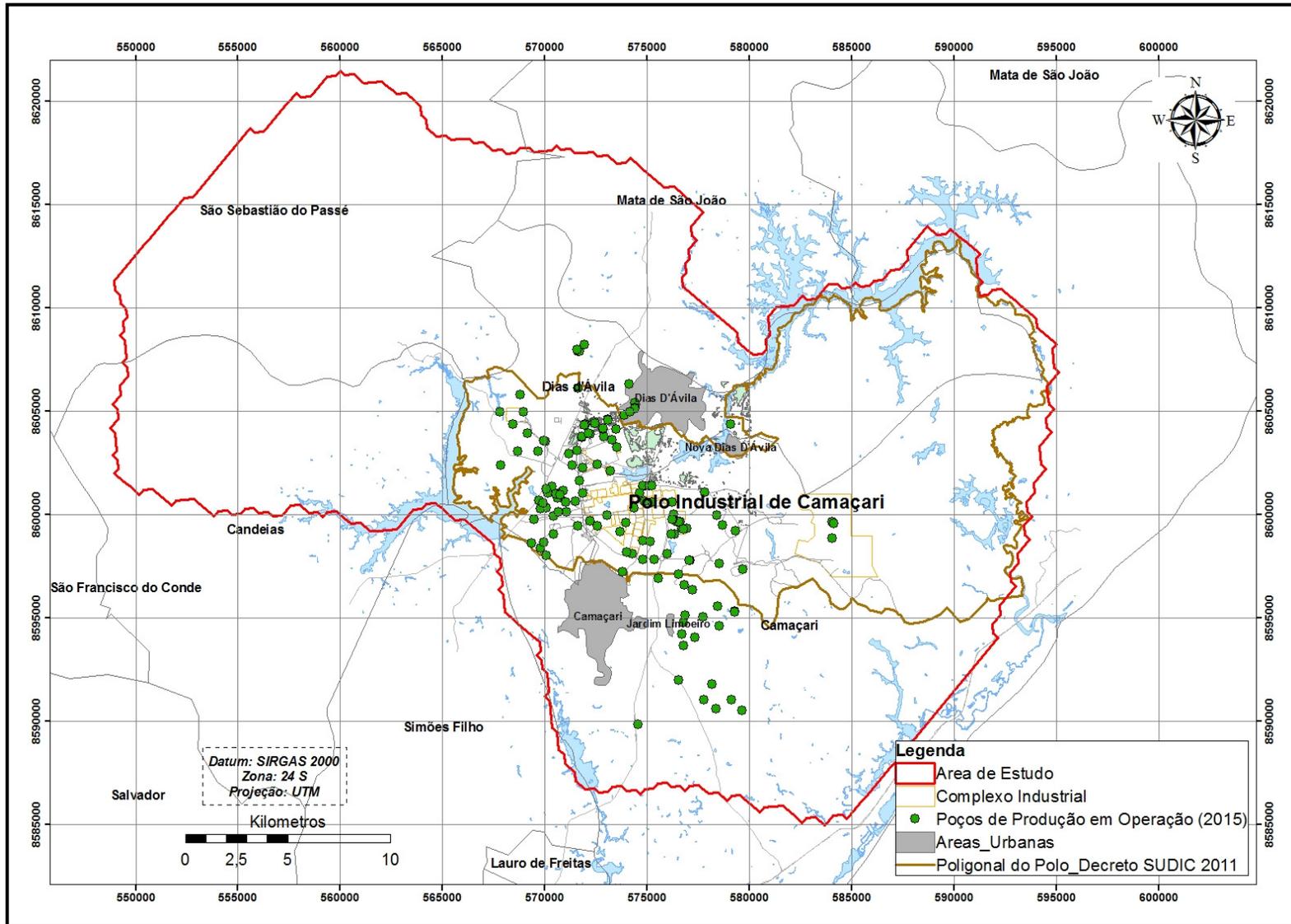


Figura 26 - Localização Poços de Produção em Operação – 2015 (elaborado pela autora).

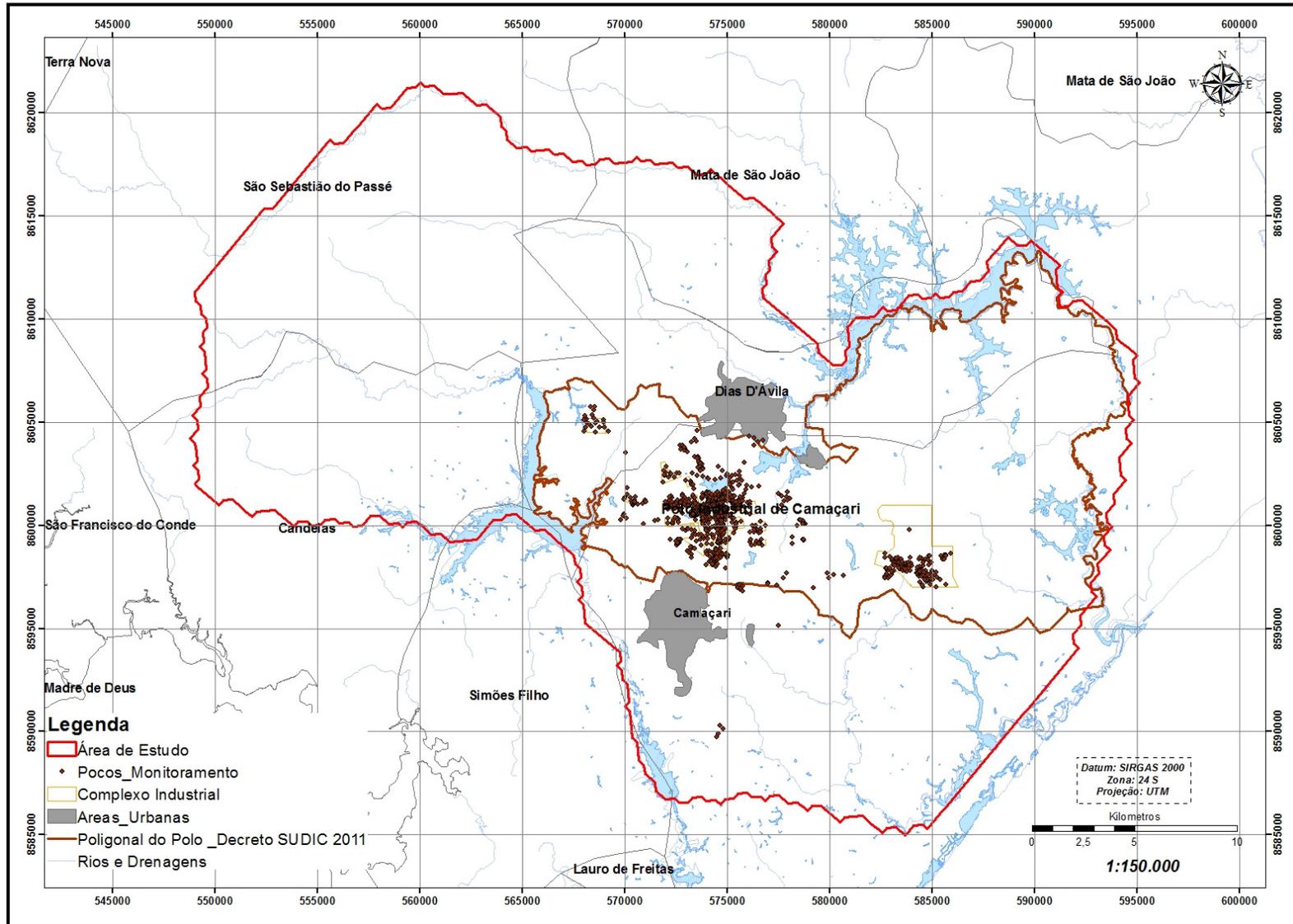


Figura 27 - Localização Poços de Monitoramento (elaborado pela autora).

O Modelo Numérico de Fluxo, atualizado em 2015, buscou incluir as informações de poços em operação e inoperantes mais atuais e os resultados foram um pouco maiores que os valores do monitoramento mensal, visto que o modelo engloba poços de produção mais distantes do pólo, para efeito de calibração. Esses poços, que não fazem parte do escopo de monitoramento mensal devem ser incluídos no monitoramento bianual, buscando refinar as condições observadas no modelo.

Com relação ao Balanço Hídrico atualizado pelo Modelo Numérico de Fluxo em 2015, lembrando-se das condições de contorno abrangente e distante do pólo industrial, os resultados indicaram que:

- Do total da recarga (águas que entram no domínio), aproximadamente 55.066,57 m³/h (91%) são provenientes da recarga direta por precipitação, 4.675,26 m³/h (7,7%) da carga constante e 687,90 m³/h (1,1%) provém da recarga por rios inseridos no domínio.
- Do total de descarga, 50.692,09 m³/h (83,9%) é relativo à descarga de rios e drenagens, 9.620,32 m³/h (15,9%) é relativo à descarga dos poços de extração e 113,89 m³/h (0,2%) é relativo a carga constante ou variável.
- A descarga calculada para os poços de extração (PP+PEs) foi inferior à calculada em 2013, especialmente pela desativação de muitos poços com vazões relevantes na área do Complexo Básico, entretanto com o processo de expansão do pólo dentro da Poligonal essa vazão pode vir a ser aumentada.

A Figura 28 mostra a tendência de redução da vazão total de bombeamento demandada para toda a região, mostrando o efeito da redução dos poços de produção na área do polo, porém não leva em consideração um possível aumento das vazões demandadas em áreas mais distantes, fora da gestão do polo industrial.

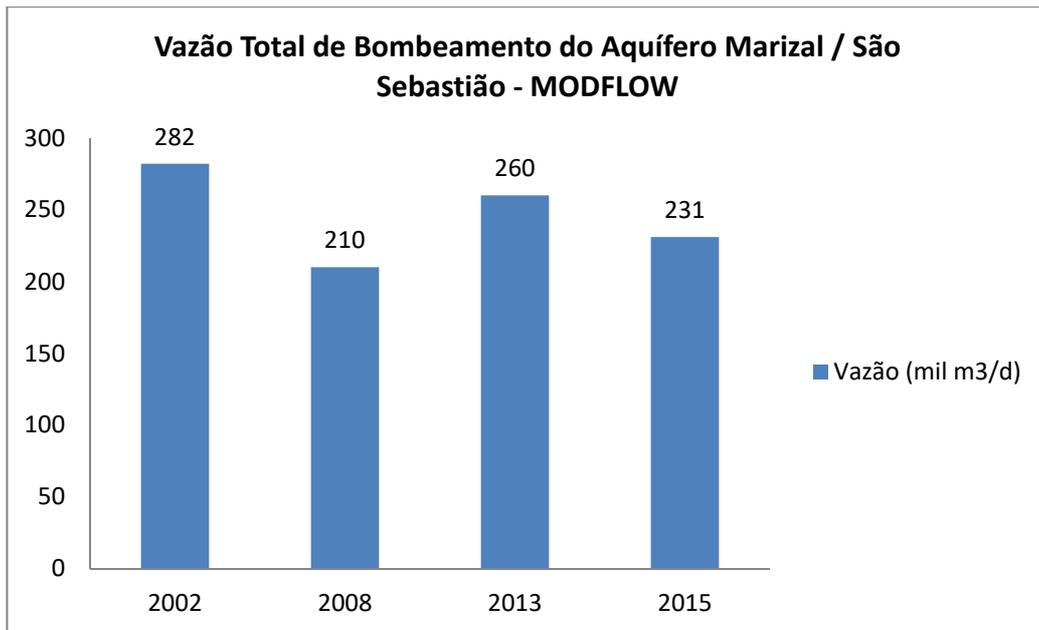


Figura 28 - Vazão de Bombeamento do Sistema Aquífero Marizal / São Sebastião pelo Modelo Numérico de Fluxo (CETREL, 2015).

3 METODOLOGIA

3.1 Pesquisa Bibliográfica e Caracterização da Área de Estudo

A pesquisa bibliográfica se baseou na consulta à dissertações, teses e artigos publicados, livros e material disponível na internet. Os dados relacionados a caracterização da área de estudo, incluiu além de trabalhos acadêmicos publicados, o conteúdo de relatórios internos da CETREL. Os mapas contendo dados de hidrografia, geologia, municípios, dentre outros, foram elaborados utilizando base de dados em shapefile da CPRM, IBGE, INEMA e CETREL, elaborados e compilados pela autora, considerando os objetivos do referido trabalho.

Nessa etapa foi pré-definida a área de abrangência do estudo, a qual é delimitada pelo domínio do Modelo Hidrogeológico da Região.

3.2 Escolha de Critérios Técnicos de Outorga

Para escolha dos critérios técnicos para o desenvolvimento metodológico referente a outorga de águas subterrâneas na região objeto do estudo, considerou-se que para o sistema aquífero do recôncavo (Marizal / São Sebastião) os processos de avaliação de outorga deveriam levar em conta os dados de disponibilidade hídrica, além de critérios que garantam a utilização de vazões sustentáveis, conforme diretrizes gerais previstas na legislação.

Para isso, foi feita a análise crítica dos critérios considerados pelas legislações estaduais no Brasil (Tabela 4) e dos critérios propostos por Campos & Correa (2013) (Tabela 5) que poderiam ser aplicados, desde que avaliadas as especificidades de cada caso estudado.

3.3 Obtenção dos Parâmetros Necessários à Avaliação Técnica da Outorga

Para aplicação e teste dos critérios sugeridos no item precedente, foi necessária a proposição, obtenção / cálculo de parâmetros importantes para o conhecimento da hidrogeologia regional, foram eles:

- ✓ Proposição de Novo Zoneamento Hídrico (delimitação da área de abrangência do estudo);
- ✓ Cálculo de Reservas e Potencialidades da bacia hidrogeológica (limitada à área de abrangência do estudo);
- ✓ Classificação de Zonas Hídricas.

Para a proposição de novo Zoneamento Hídrico, utilizou-se o zoneamento existente proposto pela CETREL e suas premissas, associado às informações de trabalhos acadêmicos sobre a geologia e hidrogeologia local, e estudos de vulnerabilidade conduzidos para a área. O objetivo do zoneamento hídrico é facilitar o processo de gestão e tomada de decisão quanto ao uso dos recursos hídricos.

Após definido o Zoneamento Hídrico agregando o conceito de vulnerabilidade intrínseca do aquífero, uso e ocupação do solo e áreas de risco de contaminação, foram calculadas as disponibilidades hídricas por Zona Hídrica, utilizando os conceitos de Costa (1998), com as devidas adaptações em função das quantidades / qualidade dos dados hídricos / hidráulicos disponíveis. As considerações teóricas sobre as fórmulas utilizadas nesse trabalho já foram abordadas em capítulo anterior (item 2.1.5.).

Os dados de perfis de poços, espessura da camada produtora e parâmetros hidráulicos (K, T, vazões médias, vazões máxima, capacidade específica, dentre outros) foram levantados da biblioteca física e digital da CETREL e devidamente tabelados, resumindo-se as informações por zona hídrica. Pesquisou-se ainda o sistema de informações da CPRM (Siagas), no entanto, em função da qualidade das informações obtidas, optou-se por utilizar apenas os dados da CETREL.

A estimativa das recargas anuais do aquífero é outro parâmetro importante no cálculo das reservas e potencialidades. Para obtenção desse parâmetro foi realizado novo balanço hídrico com dados atualizados de precipitação da região, sendo estimados valores associados ao escoamento superficial e evapotranspiração. Como metodologia para obtenção dos mapas de precipitação, escoamento superficial e evapotranspiração foram utilizados os conceitos de balanço e análise da hidrologia básica, no entanto agregando os mesmos à premissa de separá-los por zona hídrica, uma vez que se objetivou obter as recargas por zona hídrica.

Finalmente, para classificação das zonas hídricas foi proposta condição de favorabilidade quanto à exploração de águas subterrâneas baseado nos seguintes fatores:

- Áreas comprometidas em relação à qualidade da água e riscos de contaminação, como a proximidade com áreas industriais, levando-se em conta a conexão hidráulica existente entre aquíferos livres e confinados;
- Estudos de vulnerabilidade intrínseca do aquífero já realizados por Waterloo (2003) e Santos (2010);

- Densidade de poços existentes por zona e comprometimento da disponibilidade hídrica, esta calculada a partir da reserva reguladora e parte da reserva permanente.

As premissas supracitadas são adotadas pelo Distrito Federal no processo de gestão das águas subterrâneas e pode ser aplicado ao estudo em questão, desde que consideradas as especificidades da área.

Adicionalmente, considerando que o estudo de caso possui um Modelo Numérico de Fluxo Regional (MNFR) já desenvolvido, utilizou-se a ferramenta ZBUD do Visual MODFLOW para realizar um balanço hídrico, considerando as novas condições de recarga e zoneamento hídrico obtidos nesse trabalho. Assim foi possível obter as disponibilidades hídricas provenientes das áreas adjacentes e verificar a proporcionalidade das entradas e saídas, auxiliando desta forma a avaliação qualitativa das condições de favorabilidade quanto à exploração.

Finalmente, considerando os dados hidráulicos e de potencialidades integrados, bem como as condições de favorabilidade quanto à exploração, separados por zona, foi possível desenvolver a metodologia de avaliação dos processos de outorga para a área objeto do estudo.

3.4 Proposição de Metodologia para Avaliação Técnica dos Processos de Outorga de Águas Subterrâneas

De posse do banco de dados disponível e das ferramentas existentes e desenvolvidas em etapas anteriores, a saber, novo zoneamento hídrico, cálculo de reservas e potencialidades e classificação das zonas hídricas, assim como a modelagem matemática, foi proposta uma metodologia para análise técnicas dos processos de outorga de águas subterrâneas na região do Complexo Industrial e entorno.

3.5 Estudo de Caso

Foi utilizado um estudo de caso de um processo já outorgado para aplicação da metodologia de avaliação proposta. O estudo de caso refere-se a uma bateria de poços, com grandes vazões e em região no entorno do Complexo Industrial.

O processo de análise foi conduzido da seguinte maneira:

1. Descrição do caso e critérios e premissas envolvidas.
2. Aplicação da Metodologia de Avaliação de Outorga proposta.

3. Validação do MNFR, com dados reais do poço outorgado.
4. Relacionamento dos critérios definidos no estudo de caso, avaliando criticamente cada item considerado.

O objetivo da validação do MNFR com os dados reais dos poços foi verificar a segurança dos prognósticos no processo de avaliação preliminar das outorgas. Os dados reais dos poços, obtidos a partir dos ensaios de bombeamento, foram utilizados para calibrar simulações desses ensaios em regime transiente no MNFR. Esse modelo está sendo também utilizado como ferramenta dos critérios de avaliação propostos neste trabalho.

Uma solução em estado estacionário, muitas vezes é o suficiente para atender a muitos dos objetivos da modelagem, como por exemplo, analisar padrões de fluxo médio de águas subterrâneas, balanço hídrico, simular direções de fluxo influenciado por bombeamento em longo prazo, etc. Contudo, em muitas situações, um modelo transiente é necessário, especialmente quando se deseja calcular flutuações de nível de água em resposta a mudanças nas taxas diárias ou sazonais de bombeamento (ANDERSON *et al*, 2015).

Previamente, verificou-se as condições de condutividade hidráulica e armazenamento na região em análise, uma vez que é interessante que as condições no modelo estejam o mais próximo possível das condições de campo já conhecidas.

O estudo de caso da empresa 1 (bateria de poços), apresentava dados de ensaios escalonados e/ou dados de recuperação / rebaixamento obtidos de poços de observação, o que permitiu obter dados de transmissividade / armazenamento confiáveis. Para esse cálculo, utilizou-se a solução de recuperação de Theis, através do *software Aquifer Test* (v. 4.6.0.2.), da *Schlumberger Water Services*.

O método acima descrito permite determinar a transmissividade do aquífero (T) independente dos resultados do teste de bombeamento, uma vez que dados do rebaixamento residual (recuperação) podem ser mais confiáveis que os dados de rebaixamento do teste, pois a recuperação ocorre em uma taxa constante, enquanto que durante o bombeamento muitas vezes é difícil atingir uma taxa constante de extração da água. As leituras de recuperação, após cessado o bombeamento são feitas tanto no poço de bombeamento quanto no poço de observação.

No estudo em questão, foram utilizados no *software Aquifer Test* os dados de rebaixamento / recuperação somente do poço de observação.

De acordo com Theis (1935) *apud* Schlumberger & Röhrich (2008), o rebaixamento residual, após cessado o bombeamento, é:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} W(u) - W(u') \quad (48)$$

Onde,

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (49)$$

$$u' = \frac{r^2 S'}{4Tt'} \quad (50)$$

s' = rebaixamento residual

r = distância do poço de bombeamento ao poço de observação

T = transmissividade do aquífero

S e S' = armazenamento durante o bombeamento e recuperação, respectivamente

t e t' = tempo entre início e fim do bombeamento, respectivamente.

Usando a aproximação para a função do poço, $W(u)$, pelo método de Cooper – Jacob, têm-se a equação:

$$s' = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{4Tt}{r^2 S} - \ln \frac{4Tt'}{r^2 S'} \right) \quad (51)$$

Onde S e S' são constantes e T é constante, dessa forma a equação pode ser reduzida a:

$$s' = \frac{2,3Q}{4\pi T} \log\left(\frac{t}{t'}\right) \quad (52)$$

Para análise dos dados, s' é plotado em escala logarítmica no Y e o tempo é plotado linearmente no X, como t/t' (tempo total desde o início do bombeamento pelo tempo desde o final do bombeamento).

Após análise crítica das condições de transmissividade / condutividade hidráulica do MNFR versus ensaios de campo, quando aplicáveis, foram realizados ajustes dentro do

Modelo Numérico de Fluxo, em etapa prévia às simulações dos ensaios de bombeamento em regime transiente.

Finalmente, foi utilizado o modelo matemático para reprodução dos cenários de bombeamento em regime transiente, com variação temporal, para sua verificação com vistas à simulação de um cenário de bombeamento real.

4 DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO E RESULTADOS PRELIMINARES

4.1 Critérios Técnicos para Outorga de Águas Subterrâneas

De forma resumida, buscou-se utilizar critérios compatíveis com a legislação federal e que poderiam ser aplicados à bacia hidrogeológica de interesse para o presente estudo. A Tabela 8 resume os critérios que foram aplicados ao Estudo de Caso, detalhados na forma de metodologia nas próximas etapas do trabalho, os quais são: Potencialidade Hídrica Total e Efetiva; Favorabilidade quanto à exploração; Avaliação Qualitativa dos Parâmetros Hidráulicos; Vazão de Base da Drenagem Superficial; Vazão do Poço e Qualidade da Água.

4.2 Novo Zoneamento Hídrico

Como já discutido, o Zoneamento Hídrico proposto para o Plano Diretor do Polo Petroquímico de Camaçari, em 2013, foi elaborado de forma a coincidir com a área delimitada pela SUDIC como a Poligonal do Polo Industrial, ou seja, a gestão dos recursos hídricos na região estaria limitada a área destinada a uso industrial.

Entretanto, este trabalho propôs um novo Zoneamento Hídrico, excluindo algumas áreas onde não se tinha informações da hidráulica de poços; privilegiando as zonas onde há maior quantidade de dados físicos (poços de produção já instalados e monitorados na rotina do Programa de Monitoramento do PIC); e, estendendo a área para as zonas urbanas (Camaçari e Dias D'Ávila), onde já ocorre substancial exploração de águas subterrâneas que interfere na gestão da exploração dos recursos hídricos pelo PIC.

Para inserção de uma aborgadem hidrogeológica estrutural na proposta de zoneamento, foi elaborado um mapa de compartimentação hidrogeológica (Figura 29) levando-se em conta as falhas geológicas mais profundas do São Sebastião. Foi considerado o prolongamento do sistema de falhas do Mapa Geológico da CPRM (1990), e das falhas Leandrino e Camaçari, detalhadas por LIMA (1999).

O novo Zoneamento Hídrico foi elaborado com o auxílio do software ArcGis, buscando associar as informações estruturais dos compartimentos hidrogeológicos (Figura 29), o zoneamento hídrico proposto em 2013 para o Plano Diretor do PIC (Figura 25 - item 2.5.3.) e o Mapa de Vulnerabilidade Intrínseca do Aquífero na região do PIC e entorno, construído por Santos (2010) (Figura 30).

Tabela 8. Critérios Técnicos para Avaliação de Processos de Outorga de Recursos Hídricos Subterrâneos

Crítérios	Descrição	Aplicabilidade na Área de Estudo
Potencialidade Hídrica Total e Efetiva	Crítério utilizado em vários estados e diretriz básica da Lei Federal 9.433/97 (garantir a sustentabilidade em qualidade e quantidade para usos múltiplos)	Pode ser obtido a partir de estimativas já realizadas ou por novo balanço hídrico aplicado à área de interesse
Favorabilidade quanto à exploração	Crítério adotado no Distrito Federal, e estados de Roraima e Pernambuco, baseado em parâmetros naturais do aquífero e condições de uso e ocupação da superfície	Na área de interesse já há uma classificação por zonas que poderia ser revisada e associada a um fator de favorabilidade
Avaliação Qualitativa dos Parâmetros Hidráulicos	Campos & Correa (2013) sugerem critérios baseados em avaliação qualitativa de informações de poços existentes (vazão média dos poços, capacidade específica,	A construção de banco de dados consistente poderia embasar o uso desse critério na região
Vazão de Base da Drenagem Superficial	Relação entre a descarga de base com potencial do aquífero (CAMPOS & CORREA, 2013). Em áreas onde a interação com as águas superficiais é intensa, como no caso do Urucuia (MAIA & RODRIGUES, 2012) é importante a adoção desse	A ausência de dados históricos de vazão de rios para a região e entorno, bem como as dificuldades técnicas em se estimar as áreas de abrangência para os estudos dificultam o uso desse critério.
Vazão do Poço	Vazão obtida em ensaio de vazão é adotada pela maioria dos estados, inclusive na Bahia, como critério para determinação da vazão outorgável	A definição da vazão do poço deveria ter como premissa a utilização de dados de testes escalonados, em pelo menos três estágios, com medição de nível em poço de observação.
Qualidade da Água	Alguns estados, como em São Paulo, o aspecto da qualidade da água pode ser um fator determinante para condição de uso para fins de potabilidade.	Considerando a presença de indústrias na área de Estudo, cujo subsolo em porções mais rasas está comprometido, esse passa a ser um critério também determinante.

Fonte: Elaborado pela autora.

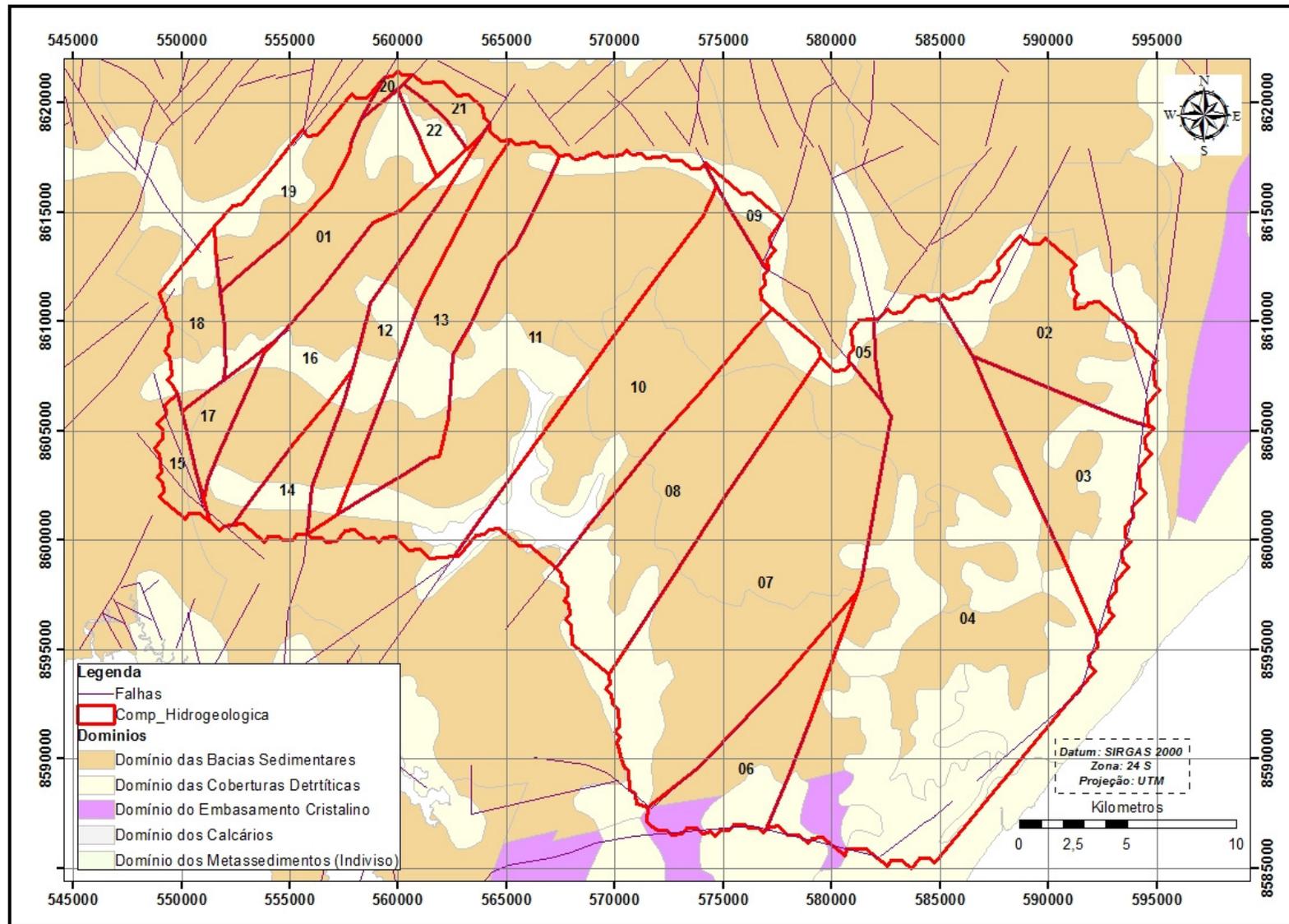


Figura 29 – Proposta de Compartimentação do Sistema Aquífero Recôncavo Norte por Blocos Estruturais para a área de Estudo (elaborado pela autora).

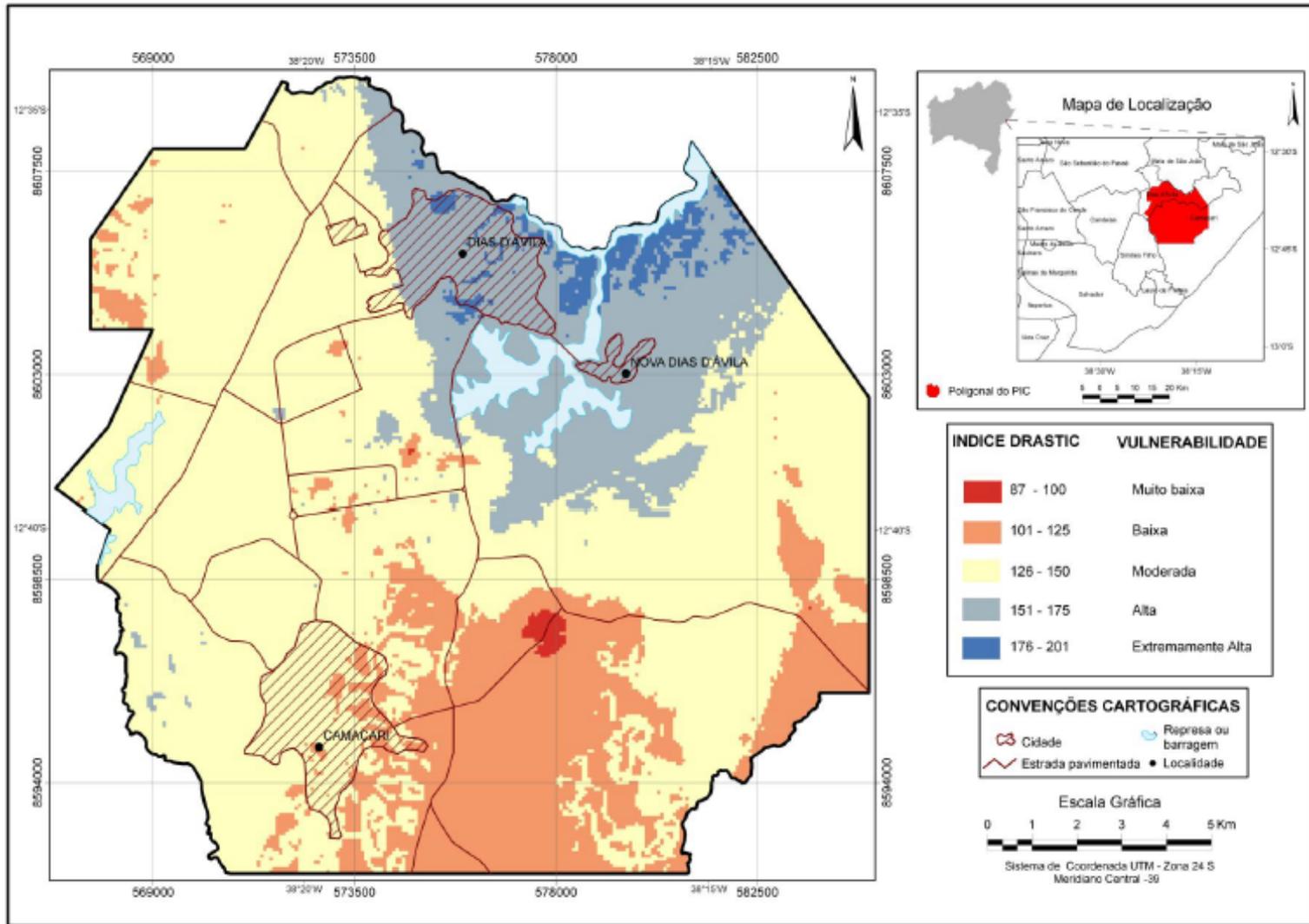


Figura 30 – Mapa de Vulnerabilidade da Região do PIC (Santos, 2010).

No trabalho de Santos (2010), foi feita a integração de sete mapas temáticos para a região do PIC e entorno, com vistas à elaboração de um Mapa de Vulnerabilidade do Aquífero. Foram elaborados os mapas dos parâmetros de variação do nível estático, recarga do aquífero, material predominante no meio aquífero, solos, declividade, material predominante na zona de influência do solo não saturado e condutividade hidráulica, todos posteriormente integrados para obtenção do Mapa de Vulnerabilidade, através do método DRASTIC.

A Figura 31 mostra o zoneamento hídrico proposto para avaliação das disponibilidades hídricas, conforme premissas discutidas anteriormente. Observa-se que a porção noroeste do Mapa foi retirado das avaliações, devido a ausência de dados físicos de poços e de poucos estudos desenvolvidos naquela região.

Tecnicamente, a metodologia proposta para o novo Zoneamento Hídrico da região agrega bem os conceitos discutidos em vários trabalhos para a gestão mais sustentável dos aquíferos (CAMPOS & CORREA, 2013; WATERLOO, 2003; CETREL, 2012; CETREL, 2015).

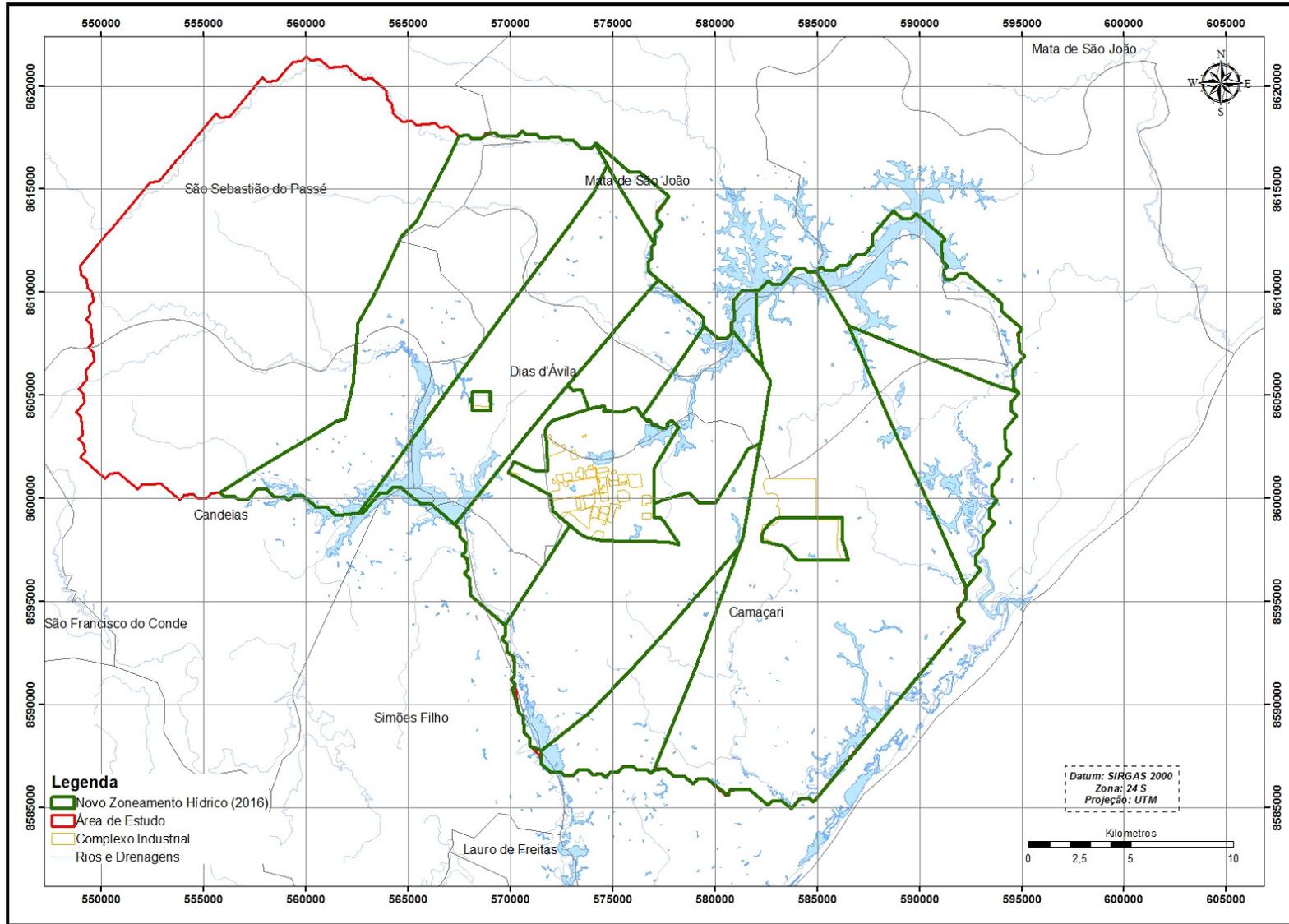


Figura 31 – Novo Zoneamento Hídrico Proposto – 2016 (elaborado pela autora).

4.3 Cálculo das Reservas e Potencialidades

4.3.1 Parâmetros Hidráulicos

A partir do banco de dados da CETREL foram levantados dados operacionais e hidráulicos dos poços de produção existentes na área de interesse. Poços não monitorados pela CETREL não foram considerados no levantamento, visto que haveria dúvidas quanto à efetiva operação do mesmo, bem como a qualidade dos dados coletados. Os valores absolutos e médios dos parâmetros hidráulicos estão apresentados por Zona Hídrica na Tabela 9.

Nessa tabela, além dos dados de vazão operacional obtidos a partir do monitoramento realizado pela CETREL, foram consultados os ensaios de vazão de poços realizados na instalação dos mesmos, existentes na biblioteca da CETREL. Foram utilizados dados de vazão máxima obtida nos ensaios escalonados, rebaixamentos máximos, sendo calculados indiretamente dados de capacidade específica, transmissividade e condutividade hidráulica.

A capacidade específica (C) é um indicador da produtividade de poços para abastecimento (equação 53).

$$\frac{Q}{s} = C \quad (53)$$

Onde,

C é a Capacidade Específica é dada nas dimensões $L^3 / T / L$.

s é o rebaixamento máximo obtido no ensaio de bombeamento

Q é a vazão máxima obtida no ensaio de bombeamento.

Para estimativa da transmissividade (T) a partir da capacidade específica dos poços (C) foi utilizada uma simplificação da expressão de Coper – Jacob, apresentada no item 2.1.4.4. (equação 20), buscando relacionar ambos os parâmetros com o raio de influência do bombeamento, em uma condição pseudo estacionária, onde o tempo é desprezado (CPRM, 2000).

Dessa forma, a expressão (20) pode ser reescrita como:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln \sqrt{\frac{2,25Tt}{S}} \frac{S}{r} \quad (54)$$

A equação (54) pode ser comparada à equação de Thiem (equação 19), resultando na equação (55):

$$\frac{Q}{s} = \frac{4\pi T}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)} \quad (55)$$

Onde,

$\frac{Q}{s}$ = capacidade específica nas dimensões $L^3 / T / L$.

R = Raio de influência, limite do cone de rebaixamento (L)

r = Raio do poço (L)

T = Transmissividade (L^2/T)

Considerando o termo $\frac{4\pi}{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}$ um fator que depende das premissas adotadas para o

raio de influência do poço e que pode variar de 0,9 a 1,5 (WATERLOO, 2003), obtiveram-se valores máximos e mínimos de Transmissividade, de onde se puderam estimar valores de condutividades máximos e mínimos pela expressão (8) já apresentada no item 2.1.3.2.

Tabela 9. Valores Absolutos / Médios dos Parâmetros Hidráulicos dos Poços de Produção por Zona Hídrica

Zona Hídrica	Quant. Poços	Quant. Poços em Operação	Vazão Operacional Total (m ³ /h)	Vazão Média Operacional (m ³ /h)	Quant. Ensaio Escalonados	Média das Vazões Máximas dos Ensaio (m ³ /h)	Média dos Rebaixamentos Máximos no Ensaio (m)	Média da Capacidade Específica (Q/s) – m ³ /h/m	Média da T máx (m ² /s)	Média da T min (m ² /s)	Média da Espessura da Camada Saturada (b) - m	Média do K máx (T*b) - cm/s	Média do K min (T*b) - cm/s
ZH-I	97	26	920,15	43,82	28	86,34	24,50	3,66	1,54E-03	9,26E-04	140,98	1,06E-03	6,36E-04
ZH-II	3	2	8,54	8,54	-	68,63	55,40	1,26	5,25E-04	3,15E-04	93,87	5,05E-04	3,03E-04
ZH-III	12	8	713,58	89,20	-	136,81	32,18	4,44	1,85E-03	1,11E-03	128,30	1,30E-03	7,80E-04
ZH-IV	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZH-V	13	3	456,31	152,10	2	179,82	50,55	4,07	1,69E-03	1,02E-03	205,08	7,63E-04	4,58E-04
ZH-VI	28	20	3.322,80	158,23	5	187,53	35,53	5,53	2,30E-03	1,38E-03	228,75	9,38E-04	5,63E-04
ZH-VII	37	17	2.457,94	153,62	20	173,90	40,47	4,72	1,97E-03	1,18E-03	169,63	1,16E-03	6,98E-04
ZH-VIII	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZH-IX	4	1	5,00	5,00	2	157,92	42,55	3,51	1,46E-03	8,79E-04	232,23	7,22E-04	4,33E-04
ZH-X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZH-XI	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ZH-XII	24	7	514,03	73,43	3	56,98	30,33	1,85	7,73E-04	4,64E-04	108,58	7,40E-04	4,44E-04
ZH-XIII	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Total Soma	222	84	8.398,35		60								

Fonte: Elaborado pela autora

4.3.2 Estimativa da Recarga

São diversas as metodologias conhecidas e aplicadas para quantificação de recargas, dentre elas o balanço hídrico o mais aplicado (SCANLON, 2002). Estudos conduzidos ao longo dos anos para a região apresentam uma variabilidade de métodos e valores obtidos, como verificado na Tabela 10.

Para o sistema aquífero de interesse (Marizal / São Sebastião) o principal contribuinte de recarga é oriundo da precipitação, através da infiltração direta (LIMA, 1999; WATERLOO, 2003; SANTOS, 2010). O conhecimento desse parâmetro é forte atributo na avaliação das potencialidades hídricas na região.

Tabela 10. Quantificação de Recarga do Aquífero Marizal / São Sebastião

Autor	Premissa para determinação de Valores de Recarga	Valor Considerado (mm/ano)
HIDROCONSULT (1990) apud WATERLOO (2003)	Estimada pela vazão de estiagem dos rios Joanes e Jacuípe 40 m ³ /s	675
WATERLOO (2003)	Balanço Hídrico (P-EVT-ES) - aplicado ao modelo	550 (+arenoso) / 350 (+fino)
Para RHAMA, TUCCI (2009)	Vazão média específica das bacias Joanes e Jacuípe 14L/s.km ²	220 a 350
SANTOS (2010)	Três faixas: maior valor (250 mm/ano) ~ média dos valores estimados por TUCCI (2009) / menor valor 100 mm/ano	<100 / 100-250 / >250
PARA CETREL, VILELA (2012)	Média aproximada entre os valores da WATERLOO (2003) e TUCCI (2009)	370

Fonte: Elaborado pela autora.

O balanço hídrico realizado pela Waterloo (2003), por exemplo, considerou dados de precipitação média mensal de um período de 4 anos de apenas uma estação pluviométrica, extrapolando para toda a região. Os dados de evapotranspiração foram obtidos considerando o período de 2 anos de medição nessa mesma estação pluviométrica (SUDIC). Os valores de recarga calculados então pela Waterloo (2003) foram diferenciados em função do material geológico aflorante, atribuindo-se valores de coeficientes para escoamento superficial entre 0,4 (argilas) e 0,3 (areias) e fatores relacionados à declividade entre 0,17 e 0,5.

Tucci (2009) estimou a vazão média específica das bacias hidrográficas da região como sendo 14L/s.km² e converteu esse valor em mm/ano, resultando em um valor de 441 mm/ano. Esse valor equivaleu a uma parcela do escoamento superficial e outra do escoamento subterrâneo, desprezando-se as perdas por evapotranspiração (desde que a vegetação tivesse raízes pouco profundas e que o aquífero é também pouco profundo). Para obtenção da recarga, foi considerada então a parcela do escoamento subterrâneo variando entre 50 a 80 % do escoamento total, chegando a um valor entre 220 e 350 mm/ano.

Santos (2010) de forma conservadora considerou três faixas de recarga, distribuindo pela sua área de estudo em função do material geológico predominante e condições de cobertura. O valor máximo considerado foi a média dos valores obtidos por Rhama (2009).

Para o cálculo de potencialidades do Plano de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos, preparado pela Cetrel (2012), foi considerado então o valor de recarga que trata da média das recargas calculadas pela Waterloo (2003) e Tucci (2009).

Considerando essa variabilidade, optou-se nesse trabalho por agregar informações atualizadas de precipitação, estimar valores de evapotranspiração e escoamento superficial e efetuar um novo balanço hídrico, buscando atribuir um valor de recarga para cada zona hídrica.

Para quantificação da recarga (R), considerando os parâmetros disponíveis, foi utilizado o balanço hídrico, em regime estacionário, onde não há desequilíbrios relacionados ao armazenamento, através da expressão:

$$R = P(\text{precipitação}) - EVT(\text{evapotranspiração}) - ES(\text{escoamento superficial}) \quad (56)$$

Essa expressão é uma simplificação da equação (3), apresentada no item 2.1.1.3. deste trabalho, onde foram desprezadas as contribuições à recarga da água superficial, água que infiltra por irrigação e água subterrânea, sendo assim, considerada a recarga apenas por contribuição da precipitação direta. Foram desprezados ainda os termos relacionados a variação do armazenamento relacionado a contribuição de água de neve, água superficial e zona não saturada do solo, uma vez que também se desprezou a entrada de água no sistema por essas contribuições.

Como o objetivo do trabalho é a obtenção dos parâmetros hídricos e hidráulicos por zona hídrica, todo o desenvolvimento da estimativa da recarga foi realizado utilizando

ferramentas de geoprocessamento (GIS), tendo sido determinada a recarga, assim como os demais parâmetros, por zona hídrica.

Dados de precipitação foram obtidos pelo banco de dados da CETREL, onde são monitoradas oito (08) estações pluviométricas dentro da área de interesse, e banco de dados do INEMA, onde uma (01) estação da EMBASA é monitorada. A estação da EMBASA opera desde 2007 e foi construída em substituição à antiga estação da SUDIC, cujos dados são desde 1992 (Tabela 11).

Tabela 11. Estações Pluviométricas Monitoradas na Área de Interesse

Intervalo Monitorado	Estação	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000	
		X	Y
2006-2015	CETREL ETE	584.637,000	8.590.545,000
2000-2015	EE-COBRE	569.625,837	8.603.622,155
2000-2015	EE-COMPLEXO	575.015,000	8.601.528,000
2013-2015	ESCOLA	578.893,855	8.603.038,153
2007-2015	GRAVATA	572.316,842	8.597.409,142
2010-2015	LAMARAO	565.286,829	8.607.478,162
2011-2015	MACHADINHO	577.672,851	8.589.589,127
1992-2015	SUDIC	569.322,000	8.598.635,000
2007-2015	EMBASA JOANES II	567.804,224	8.598.876,880

Fonte: Elaborado pela autora

Considerando os diferentes períodos monitorados, estações muito antigas (SUDIC) ou estações relativamente novas (ESCOLA), buscou-se utilizar uma série histórica que melhor representasse a condição de chuva anual na região. Como metodologia para geração das isoietas da região de interesse utilizou-se uma série de procedimentos geralmente recomendados em livros de hidrologia básica. No estudo em questão foi consultado o livro texto organizado por Tucci (2001) Hidrologia: Ciência e Aplicação, parte da metodologia aqui aplicada foi abordada no item 2.1.1.1. deste trabalho.

Dessa forma, os dados de precipitação anual das estações foram avaliados, sendo selecionado o período mínimo de 10 anos para obtenção das médias anuais, ficando excluídas as estações SUDIC (dados até 2006 e localização próxima da EMBASA e GRAVATA), MACHADINHO e ESCOLA, as duas últimas por apresentarem vários anos sem informação (Tabela 12).

As estações CETREL ETE, EE-COBRE e EE-COMPLEXO que apresentavam dados preenchidos em todo o período de 10 anos foram utilizados para o preenchimento de falhas

das estações EMBASA JOANES II, GRAVATA E LAMARÃO, pelo método de ponderação regional, visando a homogeneização do período de informações e a análise estatística das precipitações.

Após o preenchimento das séries, foi feita análise de consistência dos dados, de modo a comprovar o grau de homogeneidade dos dados disponíveis nas estações que apresentavam falhas em relação às aquelas sem falhas. Foi utilizado o método de dupla massa, desenvolvido pelo Geological Survey, USA (TUCCI, 2001), onde foram acumulados os dados de precipitação anual das estações a consistir e plotados em gráfico, separadamente para cada estação, onde as abscissas eram representadas pela série de dados de precipitação média de todas as estações, também acumuladas.

Os resultados da análise de consistência foram satisfatórios (Figura 32), gerando a série de dados de precipitação total anual indicados na Tabela 13 para geração das isoietas da área de interesse.

Tabela 12. Estações Pluviométricas Seleccionadas para Geração das Isoetas na Área de Interesse

Estações	CETREL ETE	EE-COBRE	EE-COMPLEXO	EMBASA JOANES II	GRAVATA	LAMARAO
Período Monitorado	Precipitação Total Anual (mm)					
2006	1945	1593	1735	Falha	Falha	Falha
2007	1155	1194	1177	1331	1288	Falha
2008	764	600	1222	1223	1114	Falha
2009	1513	1112	1404	1290	Falha	Falha
2010	1717	1857	1869	1525	Falha	Falha
2011	1701	1594	1683	1703	1259	1268
2012	1166	1165	1089	1069	877	853
2013	1416	1506	1498	1526	1099	1207
2014	1522	1166	1287	1394	1032	1017
2015	1670	925	1546	1619	1093	1929

Fonte: Elaborado pela autora.

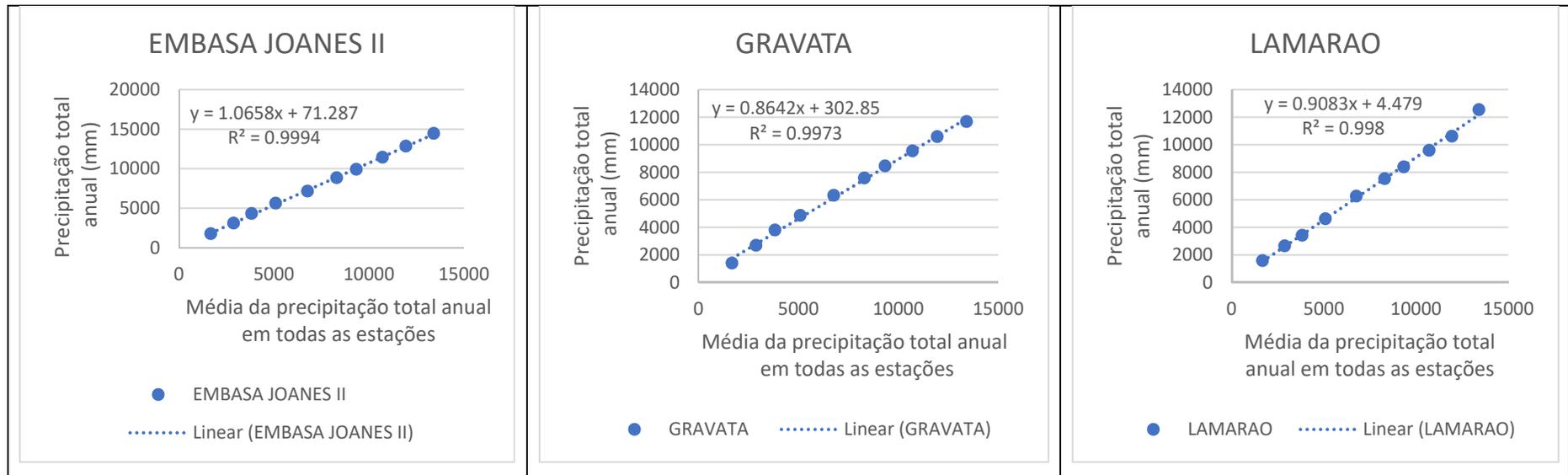


Figura 32 – Análise de Consistência – Precipitação Anual (elaborado pela autora).

Tabela 13. Estações Pluviométricas Utilizadas para Geração das Isoietas

Intervalo Monitorado	Estação	Coordenadas UTM - SIRGAS 2000		Pluviometria média anual (mm)
		X (m)	Y (m)	
2006-2015	CETREL ETE	584.637,000	8.590.545,000	1.457
2006-2015	EE-COBRE	569.625,837	8.603.622,155	1.271
2006-2015	EE-COMPLEXO	575.015,000	8.601.528,000	1.451
2006-2015	EMBASA JOANES II	578.893,855	8.603.038,153	1.446
2006-2015	GRAVATA	572.316,842	8.597.409,142	1.168
2006-2015	LAMARAO	565.286,829	8.607.478,162	1.254

Fonte: Elaborado pela autora.

De posse dos dados de precipitação anual foi construído o mapa de isoietas para a região através de ferramentas de geoprocessamento do ArcGis (Figura 33). Foi utilizado o método de interpolação pelo inverso da distância (IDW), que consiste na interpolação de valores de precipitação das estações, possibilitando criação de isolinhas equidistantes entre as estações.

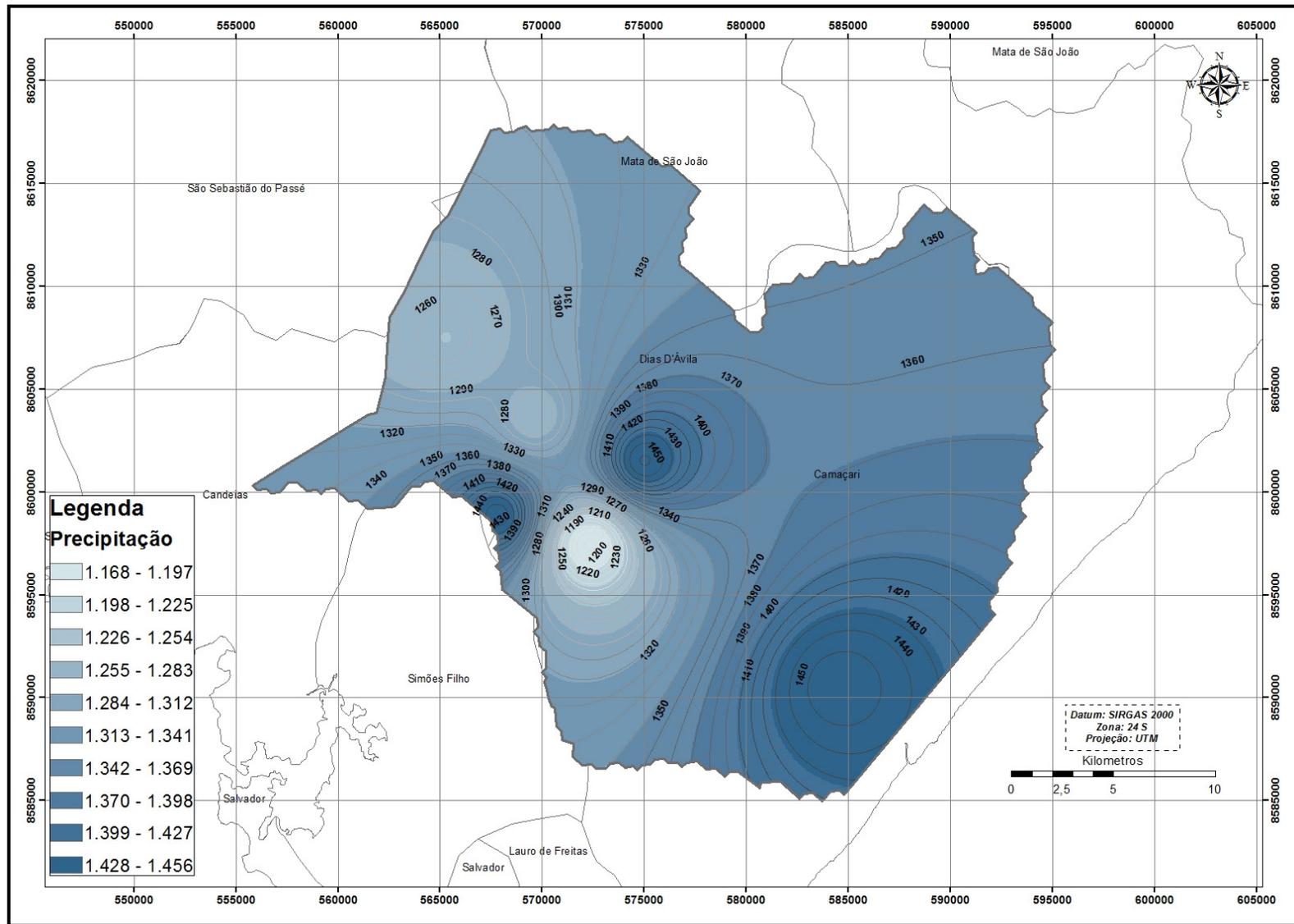


Figura 33 – Precipitação Anual na Área de Interesse (elaborado pela autora).

Os valores de Evapotranspiração não são monitorados na região, porém, em determinado período (1994 e 1996), na Estação da SUDIC, foram medidos valores de evaporação em tanque classe A4, fator de evaporação 0,85, cujos dados foram utilizados pela Waterloo (2003) no seu balanço hídrico. Essa metodologia, no entanto, não é a mais adequada, visto que, conceitualmente, como abordado no item 2.1.1.2. deste trabalho, valores de evaporação não são representativos da evapotranspiração (EVT), por desprezar a parcela de perda de água pelo processo de transpiração das plantas, o que pode ser bem significativo em regiões com vegetação abundante e radiação solar intensa.

Dados de EVT são disponibilizados no site do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para fins de pesquisa, coletados de estações meteorológicas de superfície, juntamente com outros dados meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), no entanto, para a região objeto do atual estudo (Camaçari e municípios adjacentes), não foram identificados dados disponíveis. A estação meteorológica mais próxima da região em estudo é a de Salvador (Estação - 83229), distante da porção central da área em cerca de 45 km, onde são disponibilizados dados históricos consistentes de EVT_{real} , $ETV_{potencial}$ e de Precipitação, dentre outros.

A Tabela 14 mostra alguns dados de evaporação e evapotranspiração medidos de diferentes fontes e em diferentes períodos, para efeito de comparação entre as médias anuais e sua porcentagem em relação aos valores de precipitação do mesmo período.

A estação meteorológica de Salvador está fora da área de abrangência das microbacias do Joanes e Jacuípe, no entanto, os dados de precipitação são similares às médias anuais das estações utilizadas para obtenção das isoietas (Tabela 13), ainda que pouco mais elevados. Com base nas premissas de proximidade da estação de Salvador à área de estudo, bem como condições climáticas de temperatura e umidade similares, optou-se por utilizar a mesma correlação existente entre os valores de precipitação “P” e “ EVT_{real} ” da estação Salvador (Tabela 14) para as estações utilizadas nesse trabalho.

⁴ Tipo de Tanque de Evaporação mais utilizado para tomada de medidas evapotranspiração. Seu funcionamento e aplicação podem ser conferidos com mais detalhes no livro Hidrologia: Ciência e Aplicação, organizado por Carlos E. M. Tucci.

Tabela 14. Dados de Evaporação e Evapotranspiração de Diferentes Fontes de Dados

FONTE DE DADOS		Precipitação "P" (mm/ano)	Evaporação PICHE (mm/ano)	% em relação a "P"	EVT POTENCIAL (mm/ano)	% em relação a "P"	EVT REAL (mm/ano)	% em relação a "P"
DADOS SUDIC (1994 a 1996)	Estação SUDIC (Camaçari)	1870	1085	58%	-		-	
DADOS INMET (2007- 2015)	SALVADOR ONDINA	1704	-		1445	85%	1085	64%

"-" série histórica com falhas ou sem informação.

Fonte: Elaborado pela autora.

Dessa forma, optou-se por admitir como dados de Evapotranspiração da área em estudo, o total de 64% do valor da Precipitação média anual obtida na série histórica de 2006 a 2015. Com a aplicação da ferramenta de álgebra de mapas do arcgis no mapa de precipitação, obteve-se então um Mapa de Evapotranspiração da região em estudo.

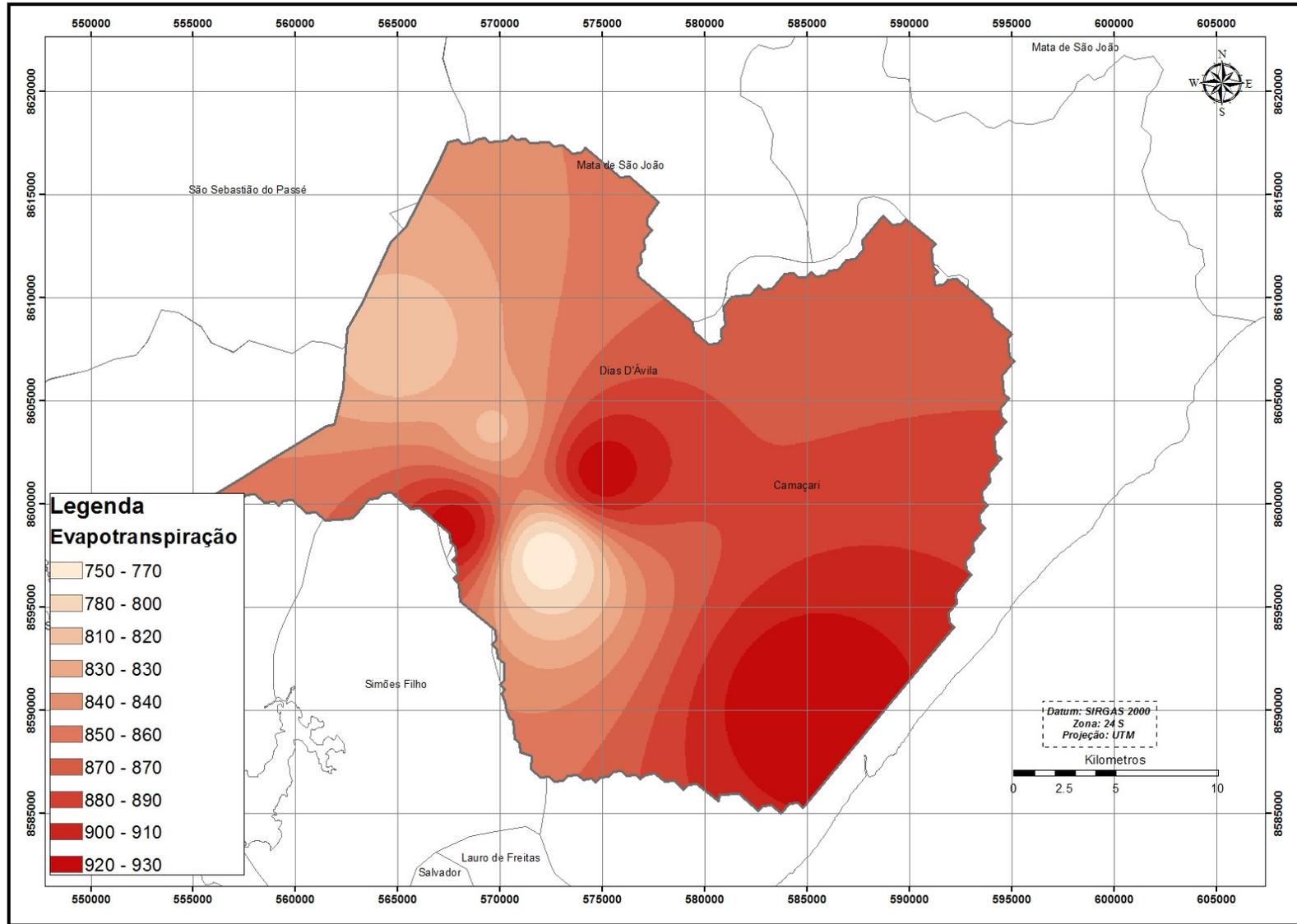


Figura 34 – Evapotranspiração Anual na Área de Interesse (elaborado pela autora).

Para o cálculo do Escoamento Superficial considerou-se que esse volume é diretamente proporcional à intensidade da precipitação e ao coeficiente de escoamento C (adimensional), que depende das condições de cobertura, declividade e tipo de solo, segundo a equação:

$$ES = CxP(\text{precipitação}) \quad (57)$$

Onde,

$$C=1-(C_1+C_2+C_3) \quad (58)$$

C'_1 = coeficiente relacionado à declividade do terreno

C'_2 = coeficiente relacionado ao tipo de solo

C'_3 = coeficiente relacionado ao tipo de cobertura

Para o cálculo dos coeficientes atribuiu-se valores de C' para cada classe de feição dos mapas de vegetação, solo e declividade, obtidos do IBGE e CPRM, nas escalas de 1: 1.000.000, recortados para área de interesse, conforme premissas da Tabela 15.

Tabela 15. Valores de C' para o Cálculo de C, adaptados para a Área de Interesse do Estudo.

Mapa de Declividade (Topografia)	Coeficientes (C') (C'₁)
Plano / Suave / Ondulado (0 a 8%)	0,3
Ondulado / Forte Ondulado (8 a 45%)	0,2
Mapa de Solos (Material Predominante)	Coeficientes (C') (C'₂)
Argilas arenosas	0,3
Areias	0,4
Cobertura (Material Predominante)	Coeficientes (C') (C'₃)
Áreas urbanas	0,05
Áreas cultivadas	0,1
Florestas, reflorestamento	0,2
Cursos d'água, restiga, brejo, lago, açude, represa, mangue, etc.	0,3

Fonte: Adaptado WILLIAMS (1949) *apud* TUCCI (2001).

As Figura 35, Figura 36 e Figura 37 são referentes aos mapas de declividade, solos e vegetação, aos quais se atribuiu os coeficientes da Tabela 15.

Utilizando as ferramentas algébricas de geoprocessamento no GIS, aplicando-se a equação (58) operacionalizaram-se os mapas das Figura 35 aFigura 37 para obtenção do coeficiente de escoamento superficial (C). Assim, o coeficiente C, juntamente com o mapa de precipitação (Figura 33), foi aplicado na equação (57), resultando no mapa do escoamento superficial (Figura 38).

Em uma segunda etapa, utilizando novamente a ferramentas algébricas de geoprocessamento, e aplicando a equação do balanço hídrico (56) aos mapas de precipitação (Figura 33), evapotranspiração (Figura 34) e escoamento superficial (Figura 38) obteve-se o mapa de recarga (Figura 39).

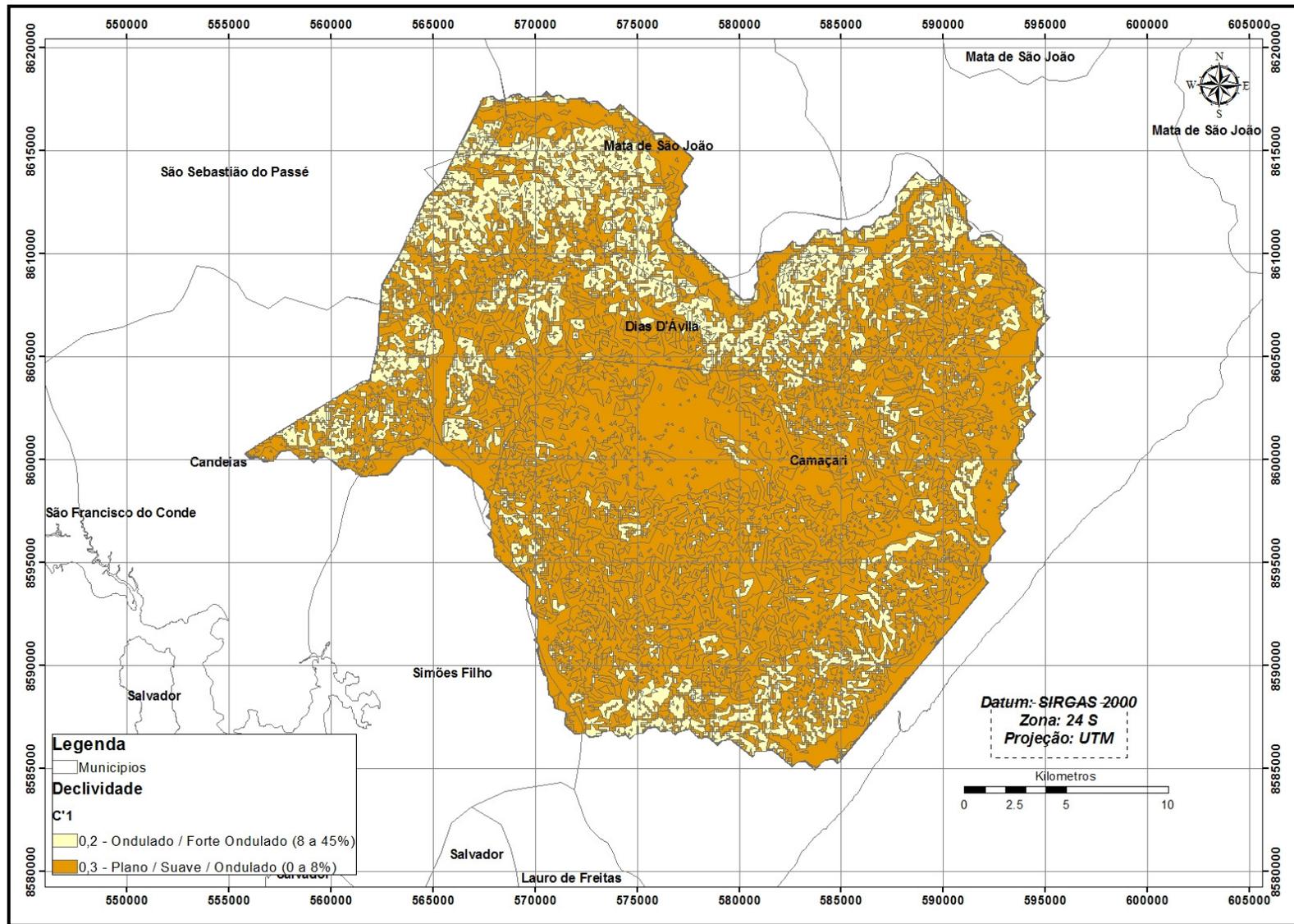


Figura 35 – C' Aplicados ao Mapa de Declividade para Obtenção do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) (adaptado do Mapa de Declividade: CPRM. Escala 1:1.000.000).

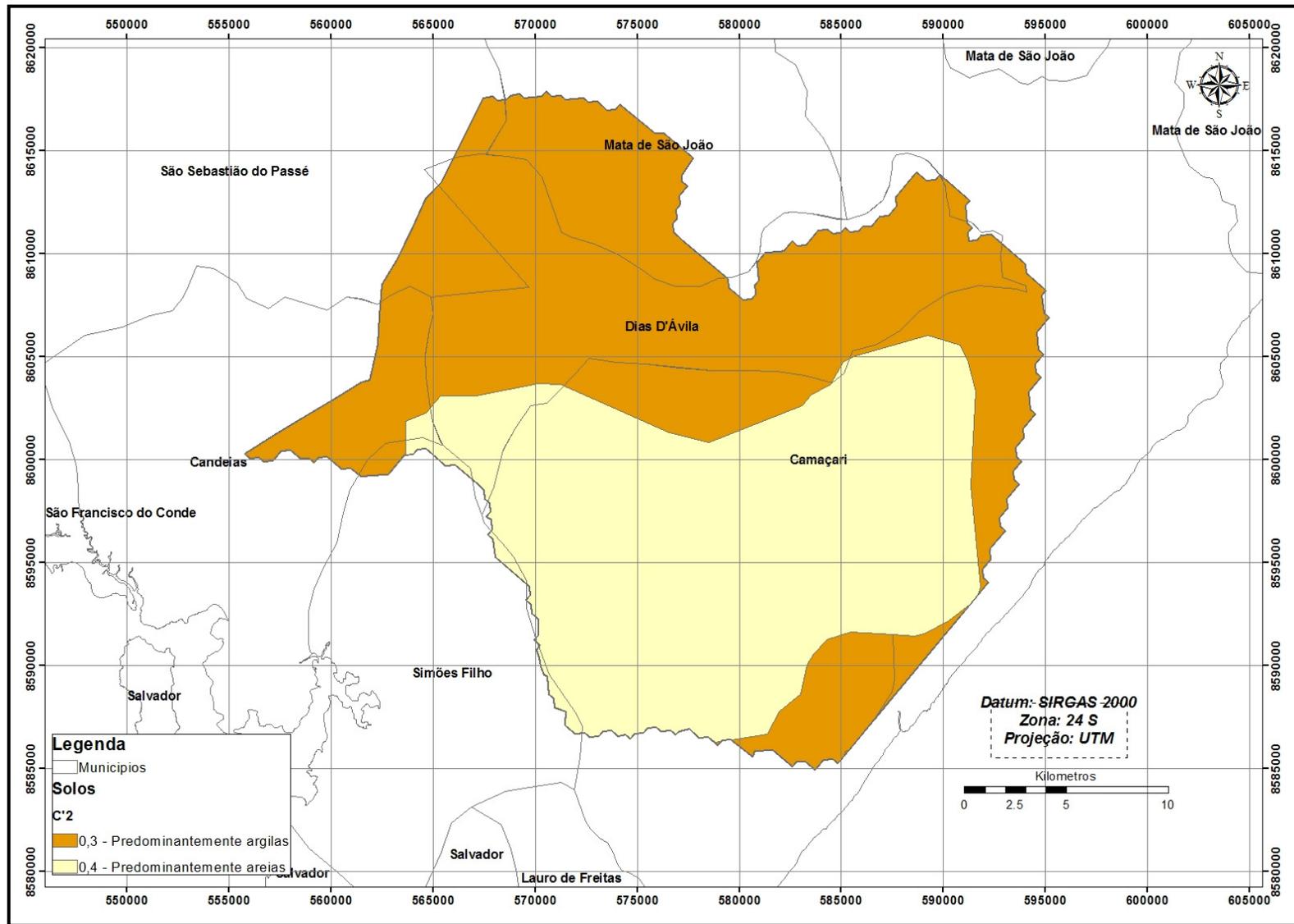


Figura 36 - C' Aplicados ao Mapa de Solos para Obtenção do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) (adaptado do Mapa de Solos: IBGE. Escala 1:1.000.000).

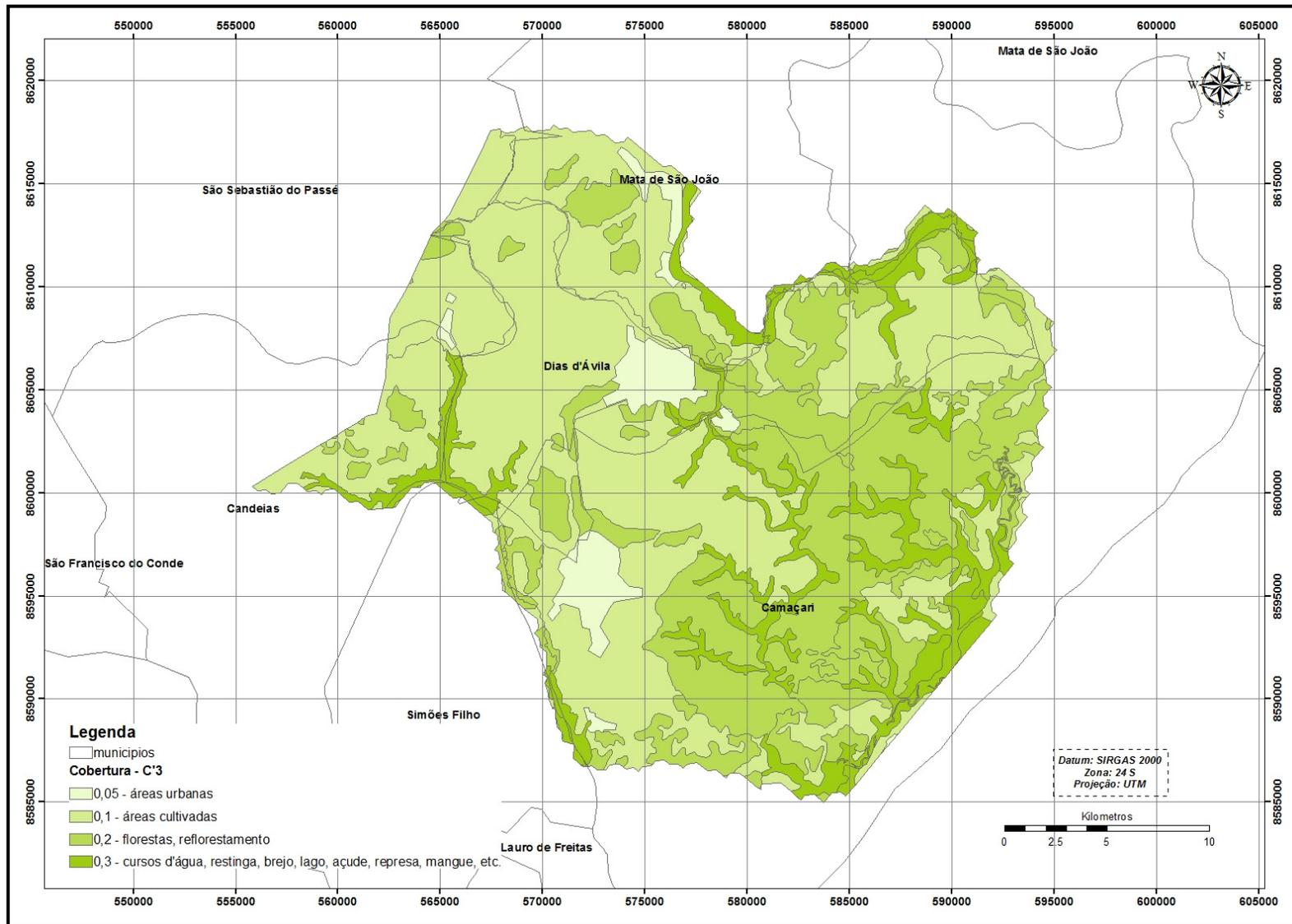


Figura 37 – C' Aplicados ao Mapa de Vegetação para Obtenção do Coeficiente de Escoamento Superficial (C) (adaptado do Mapa de Vegetação: IBGE. Escala 1:1.000.000).

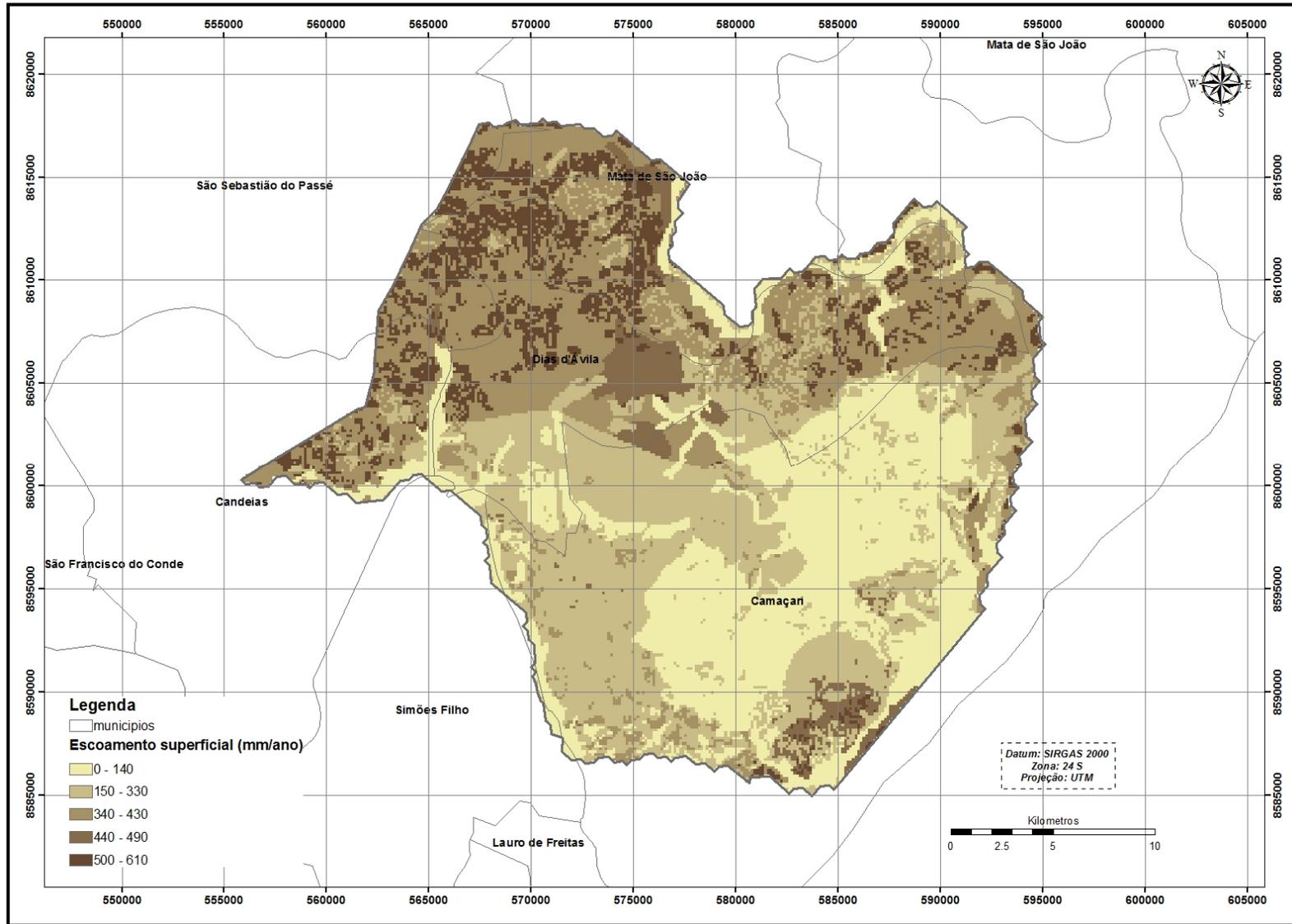


Figura 38 – Mapa Escoamento Superficial na área de Interesse (elaborado pela autora).

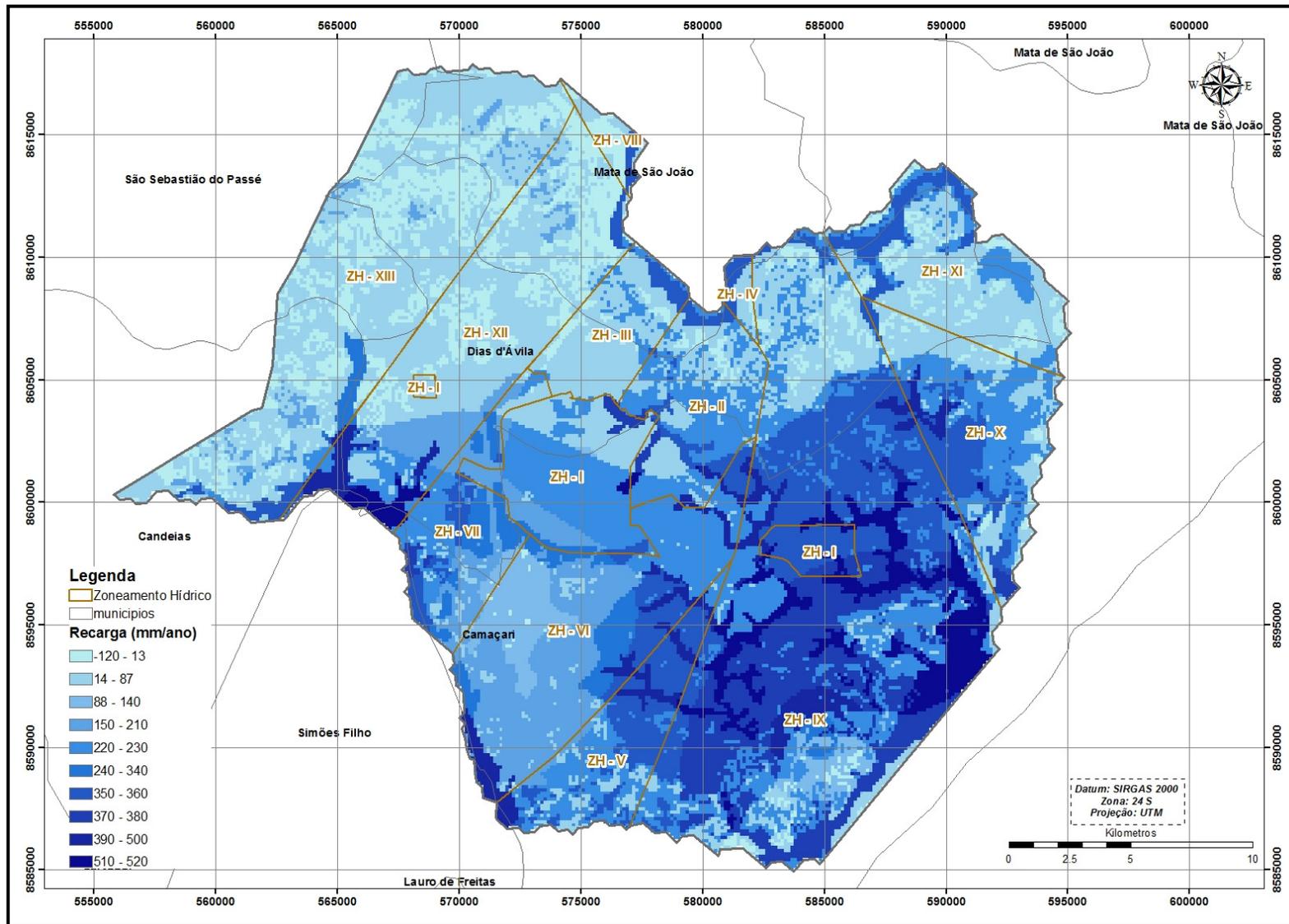


Figura 39 – Mapa de Recarga na área de Interesse (elaborado pela autora).

O mapa de recarga obtido representa as zonas de maior recarga coincidentes com o perfil dos solos arenosos e áreas alagadiças e zonas de vegetação extensa, contudo, o cálculo algébrico dos mapas de extensão raster geraram alguns valores negativos. Esses valores negativos referem-se a valores da soma do fator EVT com o fator ES maiores que a P. Adicionalmente, os valores negativos podem estar associados às estimativas dos valores de evapotranspiração real. A extrapolação da EVT foi feita com base nos dados coletados da Estação Meteorológica de Salvador, onde as taxas de precipitação são maiores que aquelas observadas na região em estudo. Tal premissa, pode ter gerado superestimativas dos valores de EVT para região.

Para aperfeiçoamento dos cálculos de recarga através do método de balanço hídrico seria necessário um estudo experimental de medidas de EVT na região em estudo.

A Tabela 16 apresenta dados estatísticos obtidos a partir do Mapa de Recarga gerado. Esses dados foram calculados utilizando a ferramenta “*zonal statistics*”, da extensão “*Spatial Analyst*” do arcgis, versão 10.4.

Tabela 16. Recargas Calculadas por Zona Hídrica

Zonas Hídricas	Recarga (mm) / ano				
	Máxima	Mínima	Média	Mediana	DP (desvio padrão) ⁵
ZH - I	510	-51	226	220	102.87
ZH - II	362	-123	78	80	113.51
ZH - III	508	-55	184	219	104.66
ZH - IV	352	-54	190	81	143.47
ZH - V	496	13	281	346	113.38
ZH - VI	494	12	240	211	100.05
ZH - VII	520	-53	243	219	90.59
ZH - VIII	346	-119	90	13	131.02
ZH - IX	520	-58	296	356	144.24
ZH - X	498	-56	212	219	129.00
ZH - XI	352	-54	122	81	122.01
ZH - XII	519	-119	107	79	149.12
ZH - XIII	485	-119	53	77	95.40

Fonte: Elaborado pela autora.

⁵ O desvio padrão em cada zona é atribuído a todas as células dessa zona. A fórmula utilizada foi $Std = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (xi - x)^2}$. Observe que o desvio padrão é calculado em toda a população (o método "N"), não estimado com base em uma amostra (o método "N-1"). Para comparação, o cálculo do desvio padrão é equivalente ao método STDEVP, não STDEV, no Microsoft Excel.

Os dados médios e medianas de recarga obtidos por zona hídrica se aproximaram bastante dos valores calculados por outros autores (Tabela 10), entretanto, em função dos elevados valores obtidos para o desvio padrão, para efeito de valores médios de recarga por zona hídrica, serão considerados os valores das medianas, representando um resultado mais consistente em escala local (Tabela 16).

4.3.3 Reservas e Potencialidades

Para o cálculo das **reservas permanentes** considerou-se a equação 22, $R_{p1} = (A_1 h S) + (A_1 b \eta_{ef})$, indicada para aquíferos livres e aquíferos confinados. Nessa expressão, o R_{p1} é a reserva permanente no aquífero intersticial de bacia sedimentar (m^3), A_1 é a área de ocorrência do aquífero (m^2), b a espessura saturada do aquífero (m), desprezando-se os volumes armazenados nas argilas e η_{ef} a porosidade eficaz do aquífero (adimensional).

O primeiro termo está associado ao parâmetro de carga potenciométrica do aquífero confinado h e ao coeficiente de armazenamento S (adimensional). A carga potenciométrica foi obtida subtraindo-se a cota topográfica dos poços de produção pelo nível estático medido na época de instalação do mesmo. Para o cálculo por zona hídrica, foram calculadas as médias das cotas potenciométricas para cada zona. O valor utilizado para S foi a média obtida por meio de modelagem numérica pela Waterloo (2003) na época de construção e calibração do MNFR, média entre $1E-5$ e $1E-4$.

Em função dos valores de armazenamento específico estimados serem bem menores que o termo " $b\eta_{ef}$ ", o primeiro termo da equação 22 torna-se praticamente desprezível na obtenção do volume total, no entanto, foi considerado no cálculo.

O cálculo das reservas permanentes aqui proposto levou em consideração as profundidades máximas dos poços instalados em cada zona hídrica e desprezou o volume de água armazenado nas argilas. Essas restrições se baseiam no conservadorismo para preservação do sistema e na dificuldade de cálculo do volume de água armazenado nas argilas.

O valor de porosidade efetiva utilizado foi de $\eta_{ef} = 0,21$, média considerada para sedimentos finos arenosos por Johnson (1967) *apud* Fetter (1994).

O cálculo das **reservas reguladoras** foi realizado com base na determinação das recargas anuais do aquífero, por zona hídrica. Com base na equação 27 ($R_{r1} = A_3 \Delta s \eta_{ef}$) o termo $\Delta s \eta_{ef}$ foi substituído pela recarga anual do aquífero, resultando na equação 59:

$$R_{r1} = A_3 \Delta R \quad (L^3/T) \quad (59)$$

Onde, R_{r1} é a reserva reguladora no aquífero intersticial de bacia sedimentar (m^3/ano), A_3 é a área de ocorrência do aquífero (m^2) e ΔR (m/ano) a recarga anual obtida através de balanço hídrico.

Os dados de recarga anuais utilizados foram àqueles obtidos através da expressão do balanço hídrico, com dados atualizados de pluviometria e dados estimados de evapotranspiração e escoamento superficial (item 4.3.2.). Como contribuição à recarga, considerou-se apenas as entradas por precipitação, sem levar em conta as contribuições inferiores e horizontais do próprio aquífero.

Para obtenção das reservas reguladora e potencialidades, por zona hídrica, utilizou-se os dados de medianas das recargas calculadas por zona hídrica, cujo range foi de 13 a 356 mm/ano (Tabela 16).

Para o cálculo da **Potencialidade Hídrica (Po)**, considerando que não há indícios de superexploração do aquífero na região, na atualidade, e que a espessura estimada do aquífero São Sebastião é de cerca de 1.000 m (LIMA, 1999), em uma área bastante superior à área de estudo, optou-se por utilizar o volume da reserva reguladora mais uma porcentagem da reserva permanente, equivalente a 30% dessa reserva em 50 anos (CETREL, 2012). A premissa dessa porcentagem da reserva permanente no cálculo da potencialidade hídrica é algo que suscita discussão no meio técnico, portanto, é recomendado que o presente trabalho seja atualizado futuramente, à medida que os parâmetros utilizados sofram processo de aprimoramento.

A Tabela 17 resume os resultados obtidos para os parâmetros Reserva Permanente, Reserva Reguladora e Potencialidade Hídrica por zona hídrica, cujos valores totais para todas as zonas estão na mesma ordem de grandeza dos cálculos apresentados por Lima (1999) e ANA (2005), obtidos através das mesmas expressões teóricas, mas por metodologias diferentes.

Neste trabalho foi considerado que os volumes de contribuição de zonas limítrofes, por terem a função de garantir a manutenção do equilíbrio dos volumes que entram e saem

de uma determinada zona, não devem estar inclusas no valor calculado para a Potencialidade Hídrica. Devido às limitações de metodologia utilizadas para obtenção das reservas permanentes e reguladoras, pode-se considerar a potencialidade hídrica calculada como a mínima para manutenção do equilíbrio do sistema.

Tabela 17. Reservas e Potencialidades por Zona Hídrica

Zona Hídrica	Área (m ²)	Reserva Permanente (m ³)	Reserva Reguladora (m ³ /ano)	Potencialidade (Po) (m ³ /ano)
ZH - I	4,16E+07	1,23E+09	9,15E+06	1,65E+07
ZH - II	2,21E+07	4,35E+08	1,77E+06	4,38E+06
ZH - III	3,39E+07	9,14E+08	7,43E+06	1,29E+07
ZH - IV	3,21E+06	SI	2,60E+05	2,60E+05
ZH - V	3,19E+07	1,37E+09	1,10E+07	1,93E+07
ZH - VI	7,49E+07	3,60E+09	1,58E+07	3,74E+07
ZH - VII	2,95E+07	1,05E+09	6,46E+06	1,28E+07
ZH - VIII	4,73E+06	SI	6,15E+04	6,15E+04
ZH - IX	2,02E+08	9,85E+09	7,19E+07	1,31E+08
ZH - X	4,44E+07	SI	9,72E+06	9,72E+06
ZH - XI	4,32E+07	SI	3,50E+06	3,50E+06
ZH - XII	7,83E+07	1,79E+09	6,19E+06	1,69E+07
ZH - XIII	1,15E+08	SI	8,89E+06	8,89E+06
TOTAL	7,25E+08	2,02E+10	1,52E+08	2,74E+08
Lima (1999)	Estimada aquífero SS-Marizal	6E+11	5E+08	5E+08
ANA (2005)	Estimada aquífero SS-Marizal		2,49E+09	4,9E+09

Fonte: Elaborado pela autora. Nota: SI = sem informação.

Para as zonas hídricas ZH-IV, VIII, X, XI e XIII as reservas permanentes não foram calculadas por não haver informações de poços de produção para estimativa da espessura saturada do aquífero.

Um critério de maior importância para o gestor que controla as condições de outorga é acompanhar a potencialidade efetiva da zona hídrica, descontando-se as vazões já comprometidas com as outorgas previamente emitidas.

Dessa forma, a **Potencialidade Hídrica Efetiva (Po_{efetiva})**, leva em consideração o volume que já está sendo explorado pelos usuários. A Tabela 18 mostra a Potencialidade Hídrica Efetiva para as condições de poços outorgados até o ano de 2015, considerando o banco de dados da CETREL. A proposta para uma gestão consistente dos recursos hídricos subterrâneos é que esse parâmetro deva ser controlado na avaliação das outorgas solicitados, ou seja, a vazão a ser descontada para obtenção da Po_{Efetiva} será àquela já outorgada, não necessariamente a efetivamente explorada, garantindo assim a disponibilidade dos volumes já outorgados.

Tabela 18. Potencialidade Efetiva por Zona Hídrica

Zona Hídrica	Potencialidade (Po) (m ³ /ano)	Quan. Poços em Operação	Q média comprometida (m ³ /ano)	Potencialidade Efetiva (Po _{efetiva}) Atual - 2015 (m ³ /ano)
ZH - I	16.538.062	26	8.060.514	8.477.548
ZH - II	4.379.887	2	74.810	4.305.077
ZH - III	12.917.828	8	6.250.961	6.666.867
ZH - IV	260.091	-	-	260.091
ZH - V	19.284.970	3	3.997.276	15.287.695
ZH - VI	37.367.118	20	29.107.728	8.259.390
ZH - VII	12.761.479	17	21.531.554	-8.770.075
ZH - VIII	61.516	-	-	61.516
ZH - IX	130.958.004	1	43.800	130.914.204
ZH - X	9.719.089	-	-	9.719.089
ZH - XI	3.497.540	-	-	3.497.540
ZH - XII	16.909.162	7	4.502.903	12.406.259
ZH - XIII	8.890.482	-	-	8.890.482

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados da Tabela 18 para a Potencialidade Efetiva mostram que para a ZH-VII já não havia água disponível para exploração, entretanto, para as zonas vizinhas ZH-I, ZH-III e ZH-XII, os valores obtidos indicam sobra de água, o que mostra que de maneira geral, a região apresenta excelente potencial hídrico para exploração de águas subterrâneas. Assim sendo, a exploração na ZH-VII merece maior atenção e controle, especialmente no que concerne a exploração em longo prazo.

4.4 Classificação das Zonas Hídricas

Considerando as limitações da metodologia utilizada para o cálculo das reservas permanentes e reguladoras e visto que não se considerou os volumes de recarga de zonas limítrofes ou do aquífero inferior, a realização de um balanço hídrico entre as zonas, utilizando o MNFR existente, é uma ferramenta excelente para entender as relações de carga / descarga entre zonas e auxiliar na classificação das zonas hídricas quanto ao potencial de exploração.

No MNFR existente, a condição de recarga adotada para todo o domínio, após a última calibração realizada em 2013, foi de 505 mm/ano, um pouco menor que a recarga original de 2003 (550 mm/ano), mas ainda bem acima da média obtida por Tucci (2009), Santos (2010)

e Vilela (2012), com valor máximo de 370 mm/ano (Tabela 10). Para o estudo de caso atual, considerando um novo balanço hídrico, foi elaborada uma distribuição de recarga por zona hídrica, sendo que a média obtida para toda a área de estudo foi de 179 mm/ano, valor menor que os anteriores, portanto, mais conservador quanto aos volumes disponíveis no aquífero.

Na simulação do balanço hídrico pelo MNFR, para as zonas hídricas propostas neste trabalho, foi preciso realizar um ajuste da condição de contorno da recarga, atribuída sempre a primeira camada. Esse ajuste foi feito de modo a não alterar significativamente as condições de calibração e estabilidade do MNFR, uma vez que não é objeto desse estudo uma nova calibração e análise de sensibilidade do modelo existente. Assim, o melhor ajuste da recarga que não causou instabilidade no MNFR e manteve o RMS⁶ inferior a 10% foi de 360 mm/ano, atribuída a toda área do modelo. Esse valor se aproxima das médias de Tucci (2009) e Vilela (2012), ainda que superestimada em relação ao valor médio da recarga (179 mm/ano), calculada no balanço hídrico elaborado neste trabalho.

A Tabela 19 apresenta as disponibilidades hídricas por zona hídrica, obtidas do balanço hídrico do MODFLOW, Recarga Direta Modflow (RDM), e os valores calculados para Reserva Reguladora (RR) neste trabalho.

Comparando os valores RDM com os valores RR, vê-se que para algumas zonas, especialmente para àquelas associadas a recargas pequenas, que a razão (RDM/RR) dá valores discrepantes, tendo o modelo atribuído volumes por recarga direta bem mais elevados. Isso resulta das premissas de maior recarga da condição de contorno do modelo MNFR que foi atribuída a toda a área de estudo, enquanto o cálculo da reserva reguladora deste trabalho utilizou recargas associadas a cada ZH, em valores menores que a média utilizada no MNFR. Os valores de RR por zona hídrica, inferiores ao valor único atualmente em uso do MNFR (360 mm), são mais conservadores para serem utilizados como ferramenta qualitativa na determinação do potencial de exploração de cada ZH, uma vez que considera os aspectos físicos inerentes a cada zona como tipo de solo, vegetação, uso e ocupação e declividade do terreno.

⁶ RMS – *Normalized Root Mean Squared*, representa o desvio padrão entre os valores medidos e os valores calculados pelo modelo, no Visual Modflow é um indicador do grau de calibração de um modelo, recomendados valores < 10%

Tabela 19. Disponibilidades Hídricas por Recarga Direta

Zonas Hídricas	Recarga Direta Modflow (m³/ano)	Reserva Reguladora * (m³/ano)	Razão RDM/RR
ZH-I	15.473.628	9.149.998	1,69
ZH-II	12.116.175	1.767.064	6,86
ZH-III	7.694.930	7.431.809	1,04
ZH-IV	1.089.014	260.091	4,19
ZH-V	11.686.570	11.039.891	1,06
ZH-VI	26.293.505	15.793.371	1,66
ZH-VII	10.307.235	6.458.420	1,60
ZH-VIII	1.444.999	61.516	23,49
ZH-IX	67.817.000	71.877.931	0,94
ZH-X	16.137.015	9.719.089	1,66
ZH-XI	14.444.875	3.497.540	4,13
ZH-XII	26.807.790	6.189.524	4,33
ZH-XIII	31.070.625	8.890.482	3,49

Fonte: Elaborado pela autora.

Na Tabela 20 estão resumidos os dados do balanço hídrico por zona hídrica, as quais estão apresentadas na Figura 40. Os dados do balanço hídrico são comparados aos valores de disponibilidade por recarga direta (Reserva Reguladora = $Rr1$), Potencialidade Hídrica ($Po = Rr1 + 0.006 * Rp1$: 30% de $Rp1$ em 50 anos) e Potencialidade Hídrica Efetiva ($Po_{efetiva} = Po - Descarga Poços$). O potencial de exploração indicado por zona, se refere apenas ao fator quantitativo de disponibilidade, sem considerar parâmetros de qualidade e vulnerabilidade intrínseca do aquífero.

A Figura 40 mostra os resultados do Balanço Hídrico por Zona Hídrica, simulado no Visual MODFLOW, considerando a distribuição das disponibilidades por Recarga Direta, Rios e Drenagens e Zonas do Entorno + área externa ao modelo.

Tabela 20. Avaliação do Potencial de Exploração com Base em Dados de Disponibilidade Hídrica

Zonas Hídricas	Vazão de entrada/saída (m ³ /ano)	Recarga (m ³ /ano)			Descarga (m ³ /ano)			Reserva Reguladora (m ³ /ano)	Potencialidade (Po) (m ³ /ano)	Potencialidade Efetiva (Po _{efetiva}) (m ³ /ano)	Potencial de Exploração*
		Recarga Direta	Rios / Drenagens	Zonas do Entorno + área externa	Poços	Rios / Drenagens	Zonas do Entorno + área externa				
ZH-I	34.787.055	44%	0%	56%	27%	16%	57%	9.149.998	16.538.062	8.477.548	Alto
ZH-II	16.118.765	75%	0%	25%	9%	38%	53%	1.767.064	4.379.887	4.305.077	Alto
ZH-III	14.277.340	54%	0%	46%	17%	41%	42%	7.431.809	12.917.828	6.666.867	Médio
ZH-IV	1.597.240	68%	0%	32%	0%	62%	38%	260.091	260.091	260.091	Médio
ZH-V	19.697.955	59%	0%	41%	55%	19%	26%	11.039.891	19.284.970	15.287.695	Baixo
ZH-VI	45.654.200	58%	0%	42%	64%	15%	21%	15.793.371	37.367.118	8.259.390	Baixo
ZH-VII	36.386.120	28%	0%	71%	54%	25%	21%	6.458.420	12.761.479	-8.770.075	Baixo
ZH-VIII	7.193.055	20%	0%	80%	0%	100%	0%	61.516	61.516	61.516	Médio
ZH-IX	79.091.850	86%	0%	14%	0%	71%	29%	71.877.931	130.958.004	130.914.204	Alto
ZH-X	27.450.920	59%	0%	41%	3%	82%	15%	9.719.089	9.719.089	9.719.089	Alto
ZH-XI	19.397.195	74%	0%	26%	9%	75%	16%	3.497.540	3.497.540	3.497.540	Alto
ZH-XII	57.053.150	47%	1%	52%	9%	30%	61%	6.189.524	16.909.162	12.406.259	Alto
ZH-XIII	55.775.650	56%	0%	44%	0%	49%	51%	8.890.482	8.890.482	8.890.482	Alto

Fonte: Elaborado pela autora.

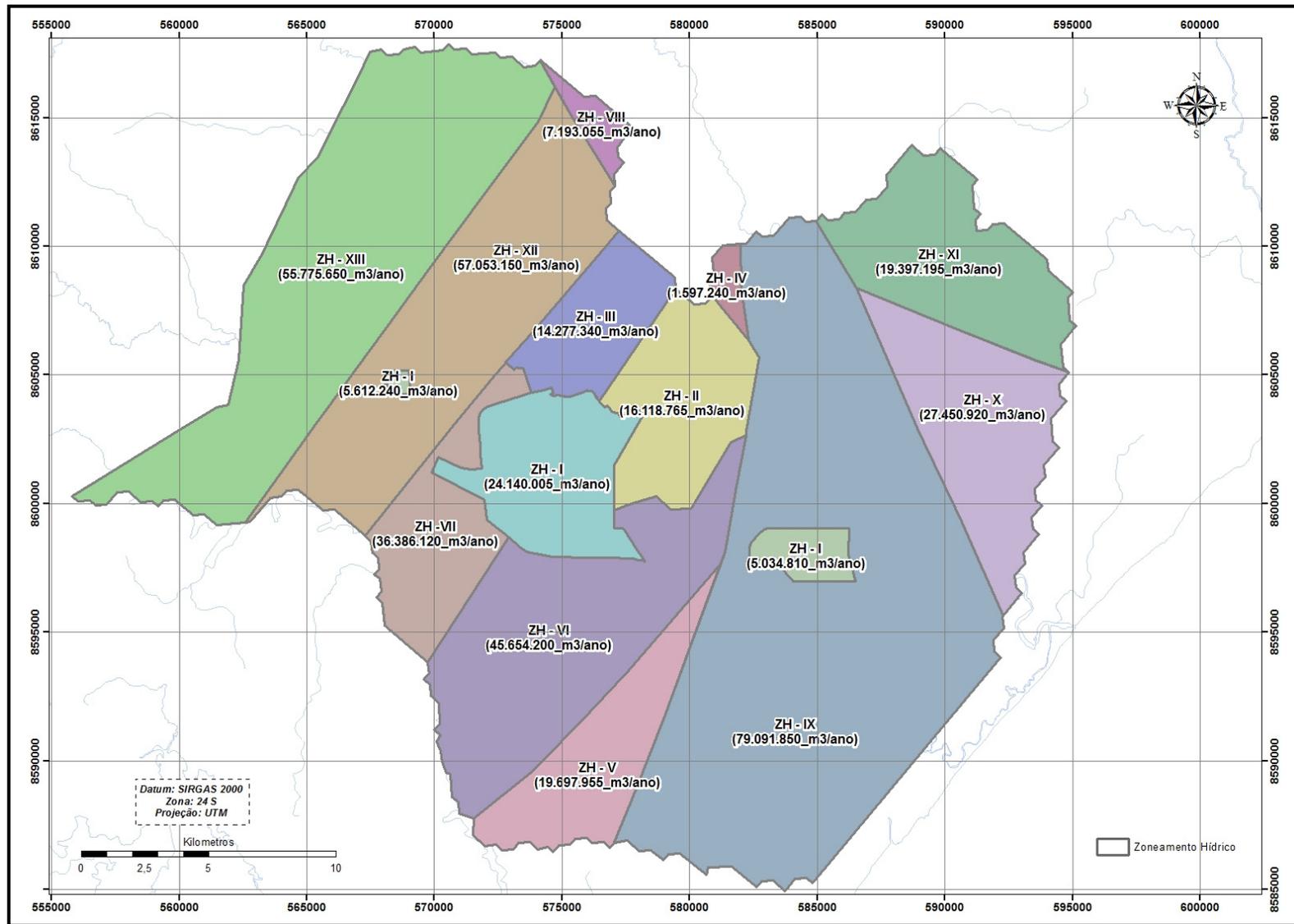


Figura 40 – Resultados do Balanço Hídrico por ZH_ MODFLOW (elaborado pela autora).

Com base na Tabela 20, segue a descrição de cada zona hídrica apresentada na Figura 40.

Para a zona hídrica ZH-I, que representa as áreas ocupadas por unidades industriais dos ramos químico e petroquímico, verificou-se bom potencial de exploração, com mais de 50% de suas descargas para zonas hídricas adjacentes. Contudo, historicamente há registro de superexploração e de contaminação do aquífero em níveis mais profundos, tendo sido recomendada a paralisação de uma série de poços nessa região. Dessa forma, a ZH-I foi considerada não favorável à exploração de recursos hídricos subterrâneos. Como nessa área ainda está em operação 24 poços, recomenda-se que no processo de renovação de outorga, estes poços sejam reavaliados, considerando os critérios locais de risco por contaminação.

Analogamente, a ZH-II apresenta bom potencial de exploração, com mais de 50% de suas descargas para zonas hídricas adjacentes, contudo trata-se de uma área identificada como de alta vulnerabilidade intrínseca para o aquífero, sendo desta forma pouco favorável à exploração.

A zona hídrica ZH-III, tem potencialidade efetiva relativamente baixa, entretanto, boa parte da descarga se dirige a rios e drenagens (~41%) e zonas adjacentes (~42%). Essa zona pode ser considerada como pouco favorável à exploração, mais ainda passível de ampliação.

As zonas hídricas ZH-V, VI e VII têm a maior parte de sua descarga realizada por poços (> 50%), sendo classificadas como áreas para controle / redução de exploração. Além disso, o cálculo de potencialidade hídrica efetiva para a ZH-VII indicou disponibilidade de reserva extrapolada, pois parte dos recursos explorados nessa área provém de outras zonas, o que a classifica como não favorável à exploração futura, com recomendação para redução ou controle da vazão explorada.

O balanço hídrico conduzido pelo MNFR, ainda que em condições de contorno de recarga direta superestimadas, indica que 70% da recarga da ZH-VII advém de zonas hídricas vizinhas (Tabela 20), ou seja, boa parte do recurso está sendo disponibilizado por zonas vizinhas ou pelas porções inferiores do aquífero. Assim, do ponto de vista da gestão dos processos de outorga, derivada da metodologia aqui proposta, seria recomendado, a não autorização para perfuração de novos poços e a não renovação de processos de outorga antigos, ou pelo menos, a redução de vazões já outorgadas, para que se utilize de forma sustentável as disponibilidades hídricas calculadas para a ZH-VII.

Ainda em relação à ZH-VII, levando em consideração apenas dados de entrada por precipitação e parte do volume armazenado no aquífero, verifica-se a disponibilidade hídrica efetiva comprometida, sendo essa zona alimentada pelas entradas de zonas vizinhas, em especial a ZH-XII, e beneficiada pela boa transmissividade do aquífero.

As zonas hídricas ZH-IX, X, XI, XII e XIII, as maiores em termos de extensão, representam cerca de 80% da potencialidade total efetiva da região, ou seja, uma excelente reserva hídrica passível de ampliação para futuros empreendimentos. Enquanto, ZH-IX, X, XI, têm boa parte da descarga indo para rios e drenos, ou áreas alagadas, as zonas ZH-XII e XIII têm maior parte da descarga indo para as ZHs adjacentes (>50%).

As zonas hídricas ZH-IV e VIII são as menores em termos de extensão, da quantidade de água disponível, além de seus falhamentos geológicos poderem representar instabilidade estrutural. Assim, ambas as áreas têm pouca relevância em termos de disponibilidade e reserva hídrica para a região. A ZH-IV está localizada em uma região de alta vulnerabilidade, sendo considerada como pouco favorável à exploração.

Finalmente, para as zonas classificadas como não favoráveis (ZH-I e VII) por apresentarem riscos potenciais de contaminação por atividades industriais ou potencialidade hídrica comprometida, a proposta deste trabalho é que novas outorgas sejam automaticamente indeferidas.

De forma resumida, a Tabela 21 descreve cada zona hídrica quanto a favorabilidade considerando tanto o potencial de exploração, como fatores ambientais de qualidade e vulnerabilidade.

Para as zonas classificadas como favoráveis propõe-se que vazões máximas outorgáveis sejam uma fração da vazão nominal esperada para aquela zona, relativa ao grau de favorabilidade quanto à exploração a que o poço está submetido. Nesse sentido, a metodologia apresentada é similar àquela aplicada no Distrito Federal pela ADASA (2006).

Os fatores de favorabilidade propostos para classificar as zonas hídricas são o seguinte: pouco favorável (60% da vazão nominal do poço); favorável (80% da vazão nominal do poço); e, muito favorável (90% da vazão nominal do poço). Esses fatores são definidos considerando a premissa de sustentabilidade em se explorar menores volumes que a capacidade de exploração do aquífero (Tabela 22).

Tabela 21. Classificação de Favorabilidade quanto à Exploração por Zona Hídrica

Zona Hídrica	Descrição	Classificação de Favorabilidade
ZH - I	Não passível de exploração por riscos de contaminação por processos industriais.	Não favorável
ZH - II	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável
ZH - III	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável
ZH - IV	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável
ZH - V	Zona passível de exploração, com recomendação de controle da disponibilidade	Pouco favorável
ZH - VI	Zona passível de exploração parcial, alta densidade de poços, com recomendação de controle da disponibilidade	Pouco favorável
ZH - VII	Não passível de exploração, disponibilidade por recarga direta comprometida, recomenda-se redução da vazão	Não favorável
ZH - VIII	Zona passível de exploração, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Favorável
ZH - IX	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação	Muito favorável
ZH - X	Zona passível de exploração, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Favorável
ZH - XI	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade moderada	Favorável
ZH - XII	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação	Muito favorável
ZH - XIII	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Muito favorável

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 22. Fator de Favorabilidade quanto à Exploração por Zona Hídrica

Zona Hídrica	Classificação de Favorabilidade	Fator de Favorabilidade (%)
ZH - I	Não favorável	Não favorável
ZH - II	Pouco favorável	60
ZH - III	Pouco favorável	60
ZH - IV	Pouco favorável	60
ZH - V	Pouco favorável	60
ZH - VI	Pouco favorável	60
ZH - VII	Não favorável	Não favorável
ZH - VIII	Favorável	80
ZH - IX	Muito favorável	90
ZH - X	Favorável	80
ZH - XI	Favorável	80
ZH - XII	Muito favorável	90
ZH - XIII	Muito favorável	90

Fonte: Elaborado pela autora

4.5 Metodologia para Avaliação Técnica dos Processos de Outorga de Águas Subterrâneas

Uma vez estabelecidas as ferramentas para aplicação dos critérios técnicos apresentados nos tópicos 4.1. a 4.4. (critérios técnicos, novo zoneamento hídrico, reservas e potencialidades e classificação das zonas hídricas), neste tópico serão apresentadas as etapas práticas para aplicação da metodologia desenvolvida.

Essa metodologia tem duas etapas: a primeira etapa deve preceder a autorização de perfuração de poços com a finalidade de abastecimento humano ou industrial (concedida pelo órgão ambiental INEMA). Assim, somente após a **avaliação prévia da outorga** deverá ser concedida a autorização para perfuração de poços.

Nessa primeira etapa, ou avaliação prévia da outorga, devem ser avaliados os seguintes condicionantes: localização proposta, demandas e disponibilidade hídrica, favorabilidade quanto à exploração, possíveis interações com as águas superficiais, restrições em relação a riscos ambientais; além de ser feita a simulação de captura e rebaixamento utilizando o MNFR. Nessa etapa, é necessário utilizar as informações básicas de hidrogeologia e potencialidade de aquífero para cada zona hídrica da região objeto do estudo (Tabela 23, a seguir), em conjunto com ferramentas SIG.

Na segunda etapa, **avaliação pós instalação do poço**, o presente trabalho propõe que o requerente da outorga apresente os seguintes elementos: perfil construtivo final do poço; testes de vazão escalonados de 72 horas, com um ou mais poços de observação, para validar a vazão requerida e avaliada previamente. Uma vez avaliadas essas informações, pode-se determinar a vazão final a ser outorgada para o requerente.

O fluxograma apresentado na Figura 41 resume a metodologia de avaliação de processos de outorga proposta nesse trabalho e os itens 4.5.1. e 4.5.2. detalha cada etapa da avaliação da outorga.

Tabela 23. Condicionantes para Avaliação de Outorga para Águas Subterrâneas na Área de Estudo

Zona Hídrica	Descrição	Classificação de Favorabilidade	Fator de Favorabilidade (%)	Área (m ²)	Potencialidade (Po) (m ³ /ano)	Quan. Poços em Operação	Q média comprometida (m ³ /ano)	Potencialidade Efetiva (Po _{efetiva}) Atual (m ³ /ano)
ZH - I	Não passível de exploração por riscos de contaminação por processos industriais.	Não favorável	Não favorável	41.590.900,00	16.538.062	26	8.060.514	8.477.548
ZH - II	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável	60	22.088.300,00	4.379.887	2	74.810	4.305.077
ZH - III	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável	60	33.935.200,00	12.917.828	8	6.250.961	6.666.867
ZH - IV	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável	60	3.211.000,00	260.091	-	0	260.091
ZH - V	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação	Favorável	80	31.907.200,00	19.284.970	3	3.997.276	15.287.695
ZH - VI	Zona passível de exploração parcial, alta densidade de poços, porém com potencial de ampliação	Favorável	80	74.850.100,00	37.367.118	20	29.107.728	8.259.390
ZH - VII	Não passível de exploração, disponibilidade comprometida, recomenda-se redução da vazão	Não favorável	Não favorável	29.490.500,00	12.761.479	17	21.531.554	-8.770.075
ZH - VIII	Zona passível de exploração, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Favorável	80	4.732.000,00	61.516	-	0	61.516
ZH - IX	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação	Muito favorável	90	201.904.300,00	130.958.004	1	43.800	130.914.204
ZH - X	Zona passível de exploração, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Favorável	80	44.379.400,00	9.719.089	-	0	9.719.089
ZH - XI	Zona passível de exploração parcial, vulnerabilidade alta	Pouco favorável	60	43.179.500,00	3.497.540	-	0	3.497.540
ZH - XII	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação	Muito favorável	90	78.348.400,00	16.909.162	7	4.502.903	12.406.259
ZH - XIII	Zona passível de exploração, com potencial de ampliação, necessita de estudos adicionais para cálculo de reservas	Favorável	80	115.460.800,00	8.890.482	-	0	8.890.482

Fonte: Elaborado pela autora.

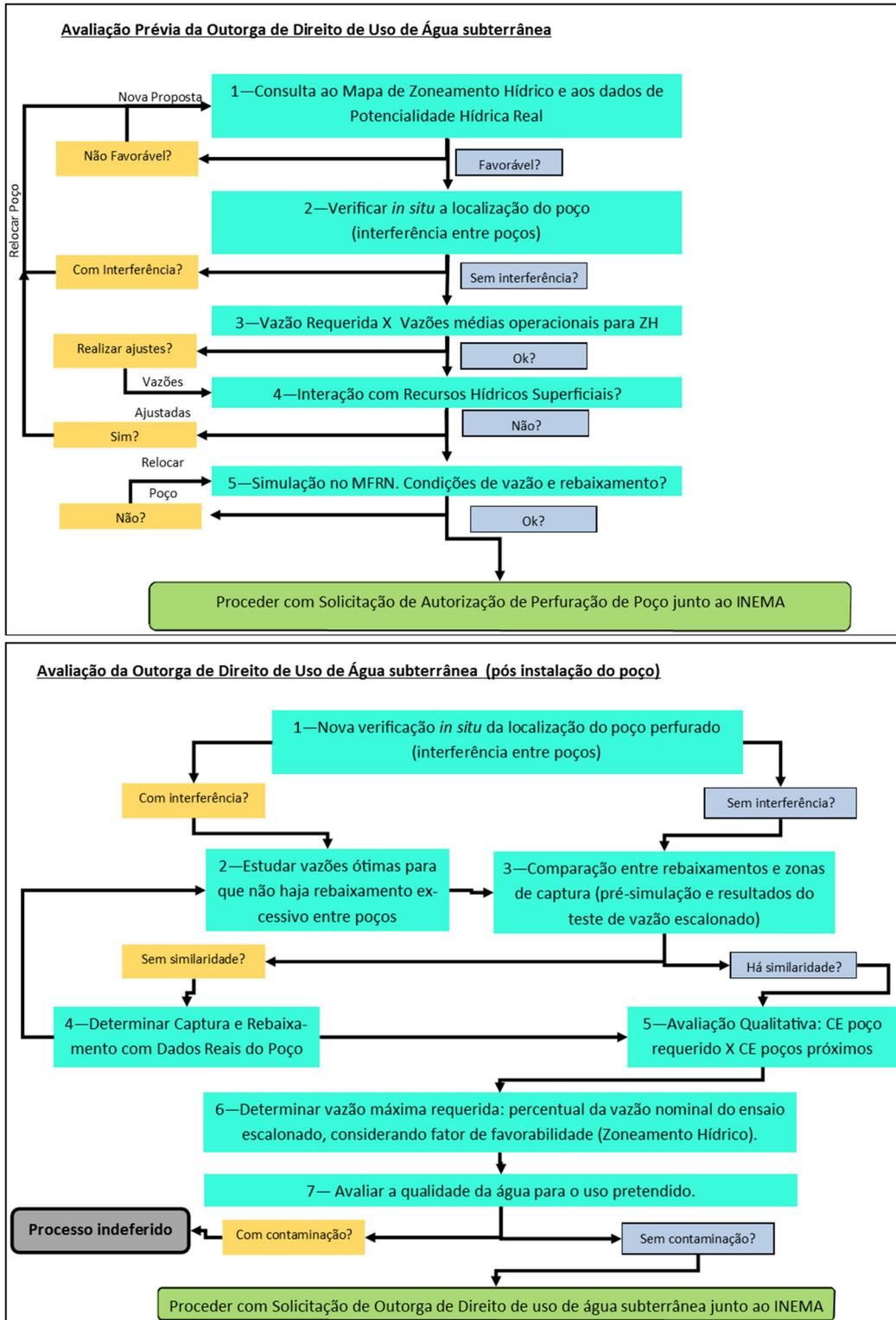


Figura 41 – Critérios para Avaliação de Técnica de Outorga de Águas Subterrâneas (elaborado pela autora).

4.5.1 Metodologia para Avaliação Prévia da Outorga

Este item detalha o que está proposto no fluxograma da Figura 41.

Na avaliação prévia da outorga de poços de produção para área de estudo, deve-se considerar as informações contidas nas Tabela 9 (resumo dos parâmetros hidráulicos por zona hídrica) e Tabela 23 (condicionantes para avaliação prévia da outorga). A pré-avaliação da outorga, antes da instalação do poço, deve ser composta por 7 etapas:

1. Verificação da condição de localização proposta para perfuração do poço quanto à: favorabilidade (Zoneamento Hídrico) e potencialidade hídrica (Tabela 23), utilizando ferramentas SIG.

Se **parecer não favorável**, considerar nova proposta de relocação de poço.

2. Verificação *in situ* da localização do poço para certificação da ocorrência, ou não, de interferência entre poços próximos. Alternativamente, avaliar poços já cadastrados em SIG.

Se **houver interferência**, considerar relocação de poço.

3. Comparação da vazão requerida com as vazões médias operacionais e vazões máximas obtidas em testes de vazão dos poços existentes na zona hídrica de interesse (Tabela 9).

Se **vazão requerida for muito maior** que vazões estimadas reais, realizar ajustes.

4. Avaliação da possível interação com recursos hídricos superficiais, através de estudos adicionais. Critério a ser descartado caso inexista interação.

Se **houver interação**, proceder com relocação de poço.

5. Simulação da vazão requerida com o Modelo Numérico de Fluxo Regional (MNFR), incluindo refinamento dos dados (caso seja possível), para previsão da zona de captura e rebaixamento.

Se **houver interferência** entre poços, deve-se avaliar possibilidade de relocação do poço ainda na etapa de simulação prévia utilizando o Modelo Numérico de Fluxo Regional (MNFR).

Em caso de parecer favorável, é sugerido como condicionante mínimo, que após a perfuração do poço o requerente execute o teste escalonado, de 72 horas, em pelo menos três estágios, com medição de nível em poços de observação, preferencialmente com menor período nos dois primeiros estágios e mais longo no terceiro (ex. 12 h → 12 h → 48 h). Os dados obtidos no teste escalonado de vazão do poço fornecerão informações importantes para o melhor conhecimento do aquífero, com dados de transmissividade, condutividade hidráulica, coeficiente de armazenamento e rebaixamentos máximos, o que poderá não apenas melhorar o nível de informações do banco de dados, como também fornecer uma melhor caracterização técnica da capacidade de produção do poço, indicando se a avaliação prévia foi pouco ou muito conservadora.

4.5.2 Metodologia para Avaliação da Outorga Após Instalação do Poço

Nessa etapa, os dados de campo obtidos no teste escalonado serão comparados com os dados armazenados (Tabela 9), especialmente com a capacidade específica de outros poços situados em um mesmo compartimento hidrogeológico ou zona hídrica.

Com vista a melhor gestão do aquífero na área de estudo, caso os resultados do teste escalonado não coincidam com as premissas do MNFR, sugere-se refinar as informações para novas simulações de captura e rebaixamento, de modo a verificar a possibilidade de interferência entre poços.

As etapas da avaliação final da outorga, como descritas no fluxograma da Figura 41, estão assim propostas:

1. Nova verificação *in situ* da localização do poço já perfurado para certificação da ocorrência, ou não, de interferência entre poços próximos.

Se **houver interferência**, prosseguir para 2.

Se **não houver interferência**, prosseguir para 3.

2. Caso se verifique interferência entre poços, estudar vazões ótimas para que não haja rebaixamento excessivo entre os poços.

Nessa etapa, pode ser necessária a realização de testes de bombeamento entre os poços em operação e poços de monitoramento (caso existentes) para determinação de vazões ótimas de operação para ambos.

3. Comparação entre os rebaixamentos e zonas de captura obtidos na pré-simulação com os resultados do teste escalonado.

Se **não houver similaridade**, prosseguir para 4.

Se **houver similaridade**, prosseguir para 5.

4. Determinar captura e rebaixamento com os dados reais do poço, obtidos a partir das leituras de nível em poços de observação, durante o ensaio escalonado. O MNFR poderá ser uma ferramenta auxiliar nesse processo. Adicionalmente, pode-se utilizar *softwares* específicos para os ensaios de bombeamento, como o *Aquifer Test*.
5. Avaliação qualitativa da capacidade específica do poço com a capacidade específica dos poços situados na mesma zona hídrica para determinação da vazão que poderá ser efetivamente outorgada. Recomenda-se que poços com a capacidade específica muito baixas devem ser outorgados em vazão inferior a vazão máxima obtida em teste de vazão.
6. A vazão máxima final que poderá ser outorgada para o requerente corresponderá a um percentual da vazão calculada para o poço, considerando o fator de favorabilidade indicado para a zona hídrica, conforme Tabela 23.
7. Avaliação da qualidade da água, considerando os resultados obtidos no ensaio de laboratório.

Se houver **suspeita de contaminação** por compostos orgânicos hidrocarbonetos ou organoclorados, o poço deverá ser isolado e o processo de **outorga negado**.

4.5.3 *Discussão da Metodologia Proposta*

Neste trabalho, assumiu-se como premissa, que o outorgante não deva explorar volumes superiores aos valores calculados para potencialidade hídrica efetiva ($P_{o\text{efetiva}} = Rr1 + 0.006 \cdot Rp1$ “30% de Rp1 em 50 anos”). Também é proposto que a potencialidade hídrica efetiva não deva considerar os volumes de contribuição de zonas limítrofes ou das porções mais inferiores do aquífero.

Dentre os critérios técnicos de avaliação da outorga propostos, destaca-se o critério das reservas e potencialidades por zona hídrica, cujo objetivo é delimitar as vazões de segurança (vazões máximas exploráveis) que podem ser outorgadas para determinada zona.

Foi proposto ainda um novo zoneamento hídrico com o objetivo de integrar a gestão da água subterrânea das áreas industriais (poligonal do polo) com a circunvizinhança dos municípios de Dias D’Ávila e Camaçari, cujo crescimento populacional têm aumentado a demanda por água subterrânea, cada vez mais próximas às atividades industriais do polo.

Também o zoneamento proposto buscou integrar os estudos de vulnerabilidade intrínseca realizados por Santos (2010) com o zoneamento das áreas de risco por contaminação associada às atividades industriais.

Destaca-se ainda a inclusão da ferramenta do MNFR existente num processo metodológico de análise mais consistente. Na proposta desse trabalho busca-se agregar novas informações hidráulicas / hidrogeológicas obtidas em campo às premissas de simulação das condições de rebaixamento e zonas de captura dentro do MNFR. A utilização mais consistente do MNFR conduz à locação mais adequada de futuros poços, reduzindo o risco de interferência entre os mesmos.

Para continuidade de uma gestão consistente, é recomendada a constante atualização do banco de dados com novas informações que possam contribuir com as avaliações técnicas exigidas para outorga.

5 ESTUDOS DE CASO E RESULTADOS FINAIS

5.1 Procedimento de Outorga da CETREL: Estudo de Caso, Empresa 01

5.1.1 Breve Resumo do Caso

No ano de 2004 a Empresa 1 já possuía um sistema de bombeamento composto por 8 poços de produção. A localização desses poços está representada pela Figura 42.

O volume total de exploração dos 8 poços era de 606 m³/h (14.544 m³/d). Entretanto, a outorga vigente para a empresa na época era de 27.000 m³/d e a empresa pretendia solicitar a ampliação para 50.400 m³/d.

Na Tabela 24 estão indicadas as características da bateria de poços existente em 2004.

Tabela 24. Características dos Poços Instalados Anteriormente à Ampliação da Outorga

Poço	Prof. (m)	Vazão Máxima do Ensaio (m ³ /h)	NE (m)	ND (m)	Rebaixamento Máximo do Ensaio (m)	Capacidade Específica (Q/s) – m ³ /h/m	Vazão Média Operacional - m ³ /h	Vazão Outorgada - m ³ /h
PP-B/001	249,0	138,6	2,7	31,2	28,5	4,86	-	-
PP-B/002	270,0	139,0	4,3	22,1	17,9	7,78	-	-
PP-B/003	252,0	138,0	8,3	31,7	23,4	5,90	-	-
PP-B/004	259,0	105,0	20,0	36,0	16,0	6,56	-	-
PP-B/005	252,0	146,7	9,9	27,2	17,4	8,45	-	-
PP-B/006	268,0	145,0	5,9	27,6	21,7	6,69	-	-
PP-B/007	257,0	120,0	11,3	29,4	18,1	6,63	-	-
PP-B/008	450,0	204,0	46,6	86,8	40,2	5,07	-	-
Total		1.136,30					606,00	1.125,00

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se que a outorga total vigente na época (1.125 m³/h ou 27.000 m³/d) para a Empresa 1 era bem próxima da vazão total nominal obtida dos ensaios de vazão realizados (1.136 m³/h ou 27.264 m³/d). Operacionalmente, no entanto, os poços só produziam 50 % do valor outorgado / ensaiado (~606 m³/h ou 14.544 m³/d).

Para ampliação da outorga, a empresa pretendia a reinstalação dos 8 poços, em localizações próximas aos poços existentes, contudo com projetos que permitissem a ampliação da vazão operacional, bem como a implantação de 3 poços adicionais.

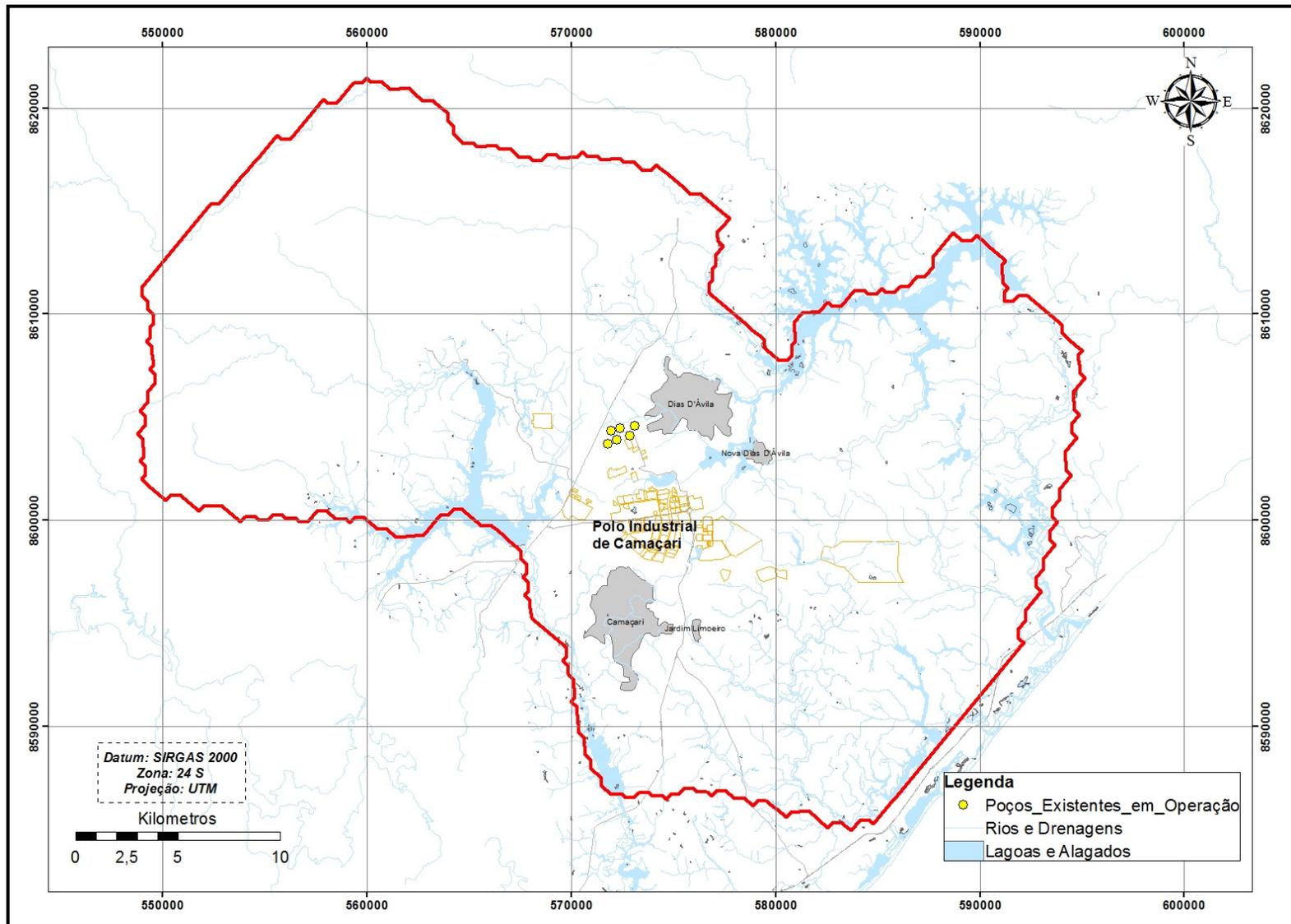


Figura 42 – Poços Existentes em Operação _ Empresa 1 (elaborado pela autora)

Dentre os principais argumentos apresentados pelo estudo hidrogeológico para a ampliação, estavam a boa capacidade específica apresentada por bateria de poços existentes no entorno, e as características da hidrogeologia local, que permitiam estabelecer expectativas de vazão da ordem de 200/220 m³/h. Adicionalmente, a localização proposta a montante da área do Complexo Básico seria estratégica, e permitia uma posição de conforto em relação a vulnerabilidades quanto a poluição industrial.

Seguindo o fluxograma vigente de avaliação da outorga, indicado na Figura 7, foi realizada uma simulação preliminar no MNFR, considerando os dados iniciais do projeto do poço.

As seções filtrantes do poço-tipo (projeto) foram inseridas entre as camadas 5 e 8, dentro do MNFR e a Tabela 25 mostra a distribuição das condutividades hidráulicas por camada para cada poço.

Para as camadas produtoras no projeto, dentro do MNFR, são verificadas algumas camadas mais argilosas, compatíveis com as condutividades menores (1E-6 / 1E-7 cm/s), porém a maior parte está inserida em camadas arenosas, isotrópicas e homogêneas.

Vale ressaltar que o MNFR, construído em escala regional, buscou representar a anisotropia característica do aquífero São Sebastião através da diferença de condutividades hidráulicas de suas camadas confinantes. Porém, de forma a simplificar o modelo, em camadas onde os níveis arenosos são predominantes, levando-se em conta que as trocas de fluxo entre os vários níveis arenosos ocorrem dentro de um aquífero principal, foram desprezadas as variações de permeabilidades, assumindo permeabilidade na faixa de 1E-5 cm/s.

Tabela 25. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços -Tipo
Simulação Preliminar no MNFR

Poço	Poço Tipo_simulado 2004			
	Camada MNFR	Kx (cm/s)	Ky (cm/s)	Kz (cm/s)
PP-B/009	6	3,01E-05	3,01E-05	3,01E-05
	7	3,01E-05	3,01E-05	3,01E-05
	8	3,01E-05	3,01E-05	3,01E-05
PP-B/010	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	8	4,38E-05	4,38E-05	4,38E-05
PP-B/011	6	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	7	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	8	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
PP-B/012	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	3,20E-05	3,20E-05	3,20E-05
	7	3,20E-05	3,20E-05	3,20E-05
	8	3,20E-05	3,20E-05	3,20E-05
PP-B/013	5	7,46E-05	7,46E-05	7,46E-05
	6	2,64E-05	2,64E-05	2,64E-05
	8	2,64E-05	2,64E-05	2,64E-05
PP-B/014	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	8	2,65E-05	2,65E-05	2,65E-02
PP-B/015	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	8	2,38E-05	2,38E-05	2,38E-05
	6	3,98E-05	3,98E-05	3,98E-05
	8	3,98E-05	3,98E-05	3,98E-05
PP-B/017	5	4,24E-05	4,24E-05	4,24E-05
	6	4,24E-05	4,24E-05	4,24E-05
	8	4,24E-05	4,24E-05	4,24E-05
PP-B/018	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	3,94E-05	3,94E-05	3,94E-05
	8	3,94E-05	3,94E-05	3,94E-05
PP-B/019	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	8	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05

Fonte: Elaborado pela autora.

Como discutido no item 4.3.1. (Parâmetros Hidráulicos), dados de condutividade hidráulicas foram estimados a partir dos ensaios de vazão realizados em poços de produção já instalados. A Tabela 26 apresenta os dados máximos e mínimos de condutividade para os poços pré-existent na área (PP-B/01 a 08), o que fornece uma idéia das condutividades

esperadas para aquele local, que são um pouco maiores que a estimativa do aquífero regional.

Entretanto, os poços pré-existentes (PP-B/01 a 08) são caracteristicamente mais rasos e suas seções filtrantes estão, em sua maioria, entre as camadas 3, 5 e 6, (valor mínimo médio igual a $1E-04$) enquanto que os poços-tipo têm suas seções filtrantes posicionadas, dentro do MNFR, entre as camadas 5, 6, 7 e 8. Dessa forma, optou-se por manter as considerações do MNFR de condutividades hidráulicas médias na faixa de $1E-5$ cm/s, de forma que as simulações no MNFR fossem mais conservadoras quanto a cenários futuros de exploração.

Tabela 26. Condutividades Hidráulicas nos Poços Existentes obtidas a partir dos Ensaio de Vazão

POÇO	K máx (cm/s)	K mín (cm/s)
PP-B/001	1,03E-03	6,16E-04
PP-B/002	1,72E-03	1,03E-03
PP-B/003	1,31E-03	7,85E-04
PP-B/004	1,81E-03	1,09E-03
PP-B/005	2,24E-03	1,34E-03
PP-B/006	1,66E-03	9,94E-04
PP-B/007	1,68E-03	1,01E-03
PP-B/008	8,25E-04	4,95E-04

Fonte: Elaborado pela autora.

Para simulação preliminar (versão do MNFR de 2004), considerou-se a vazão de 4.600 m³/d para cada poço, totalizando 50.600 m³/d, um pouco acima da vazão requerida para outorga (50.400 m³/d). Como resultado, estão apresentadas nas Figura 43 e Figura 44 as capturas para a bateria de poços para tempo de trânsito de 15 anos e 30 anos e na Figura 45 os rebaixamentos observados no aquífero para as camadas produtoras (5, 6, 7 e 8).

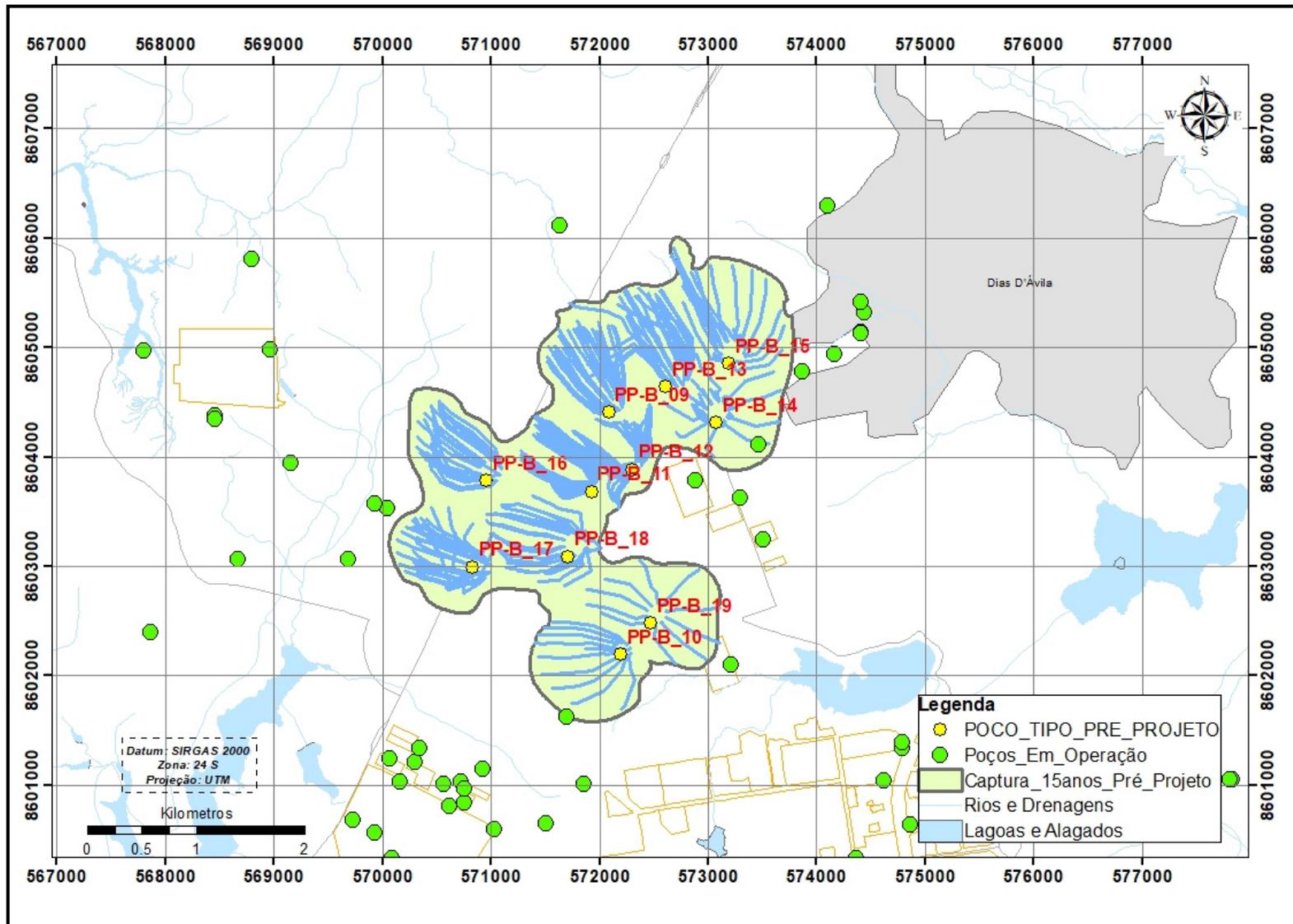


Figura 43 – Simulação Preliminar _Captura para TT 15 anos (elaborado pela autora).

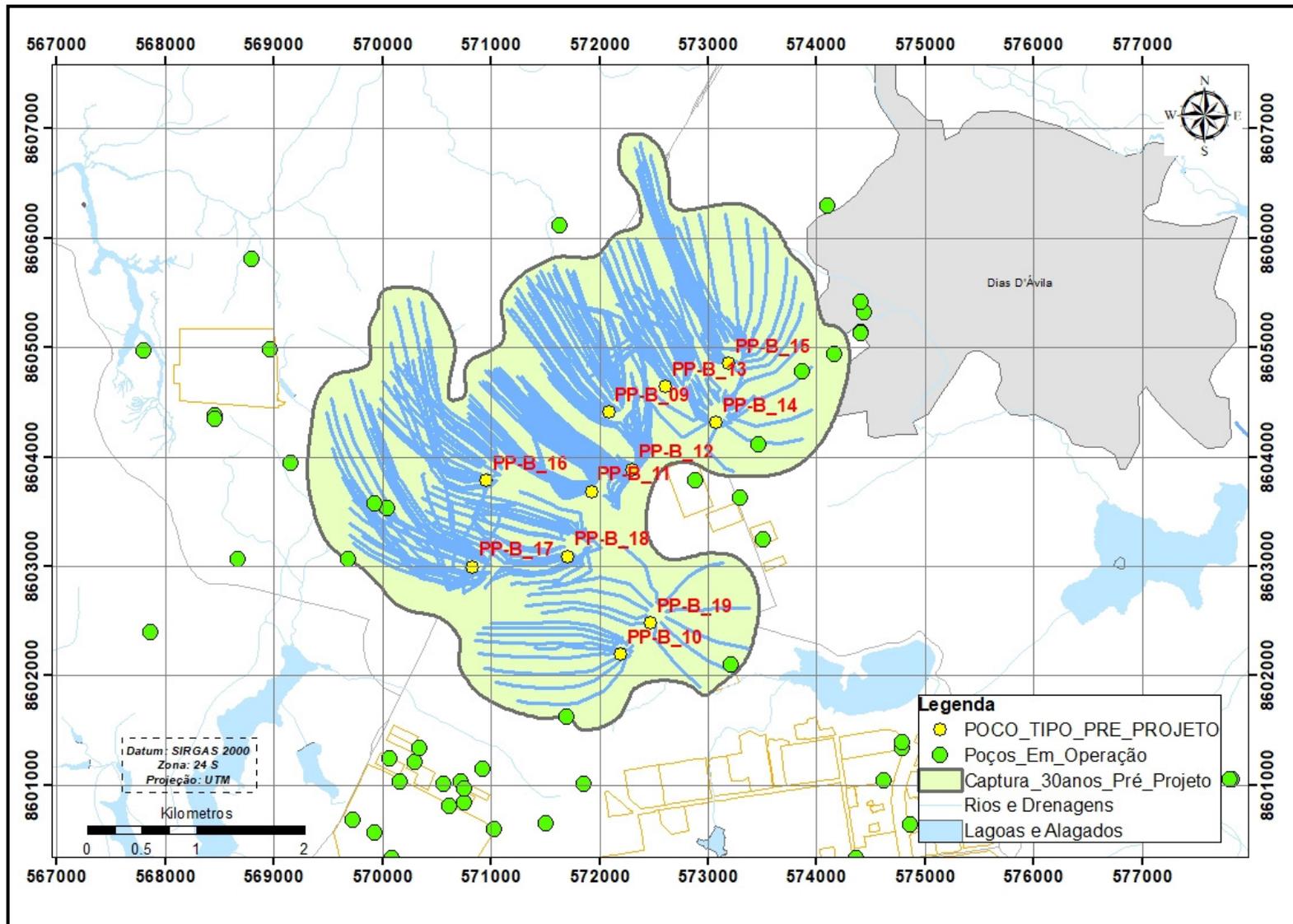


Figura 44 – Simulação Preliminar _Captura para TT 30 anos (elaborado pela autora).

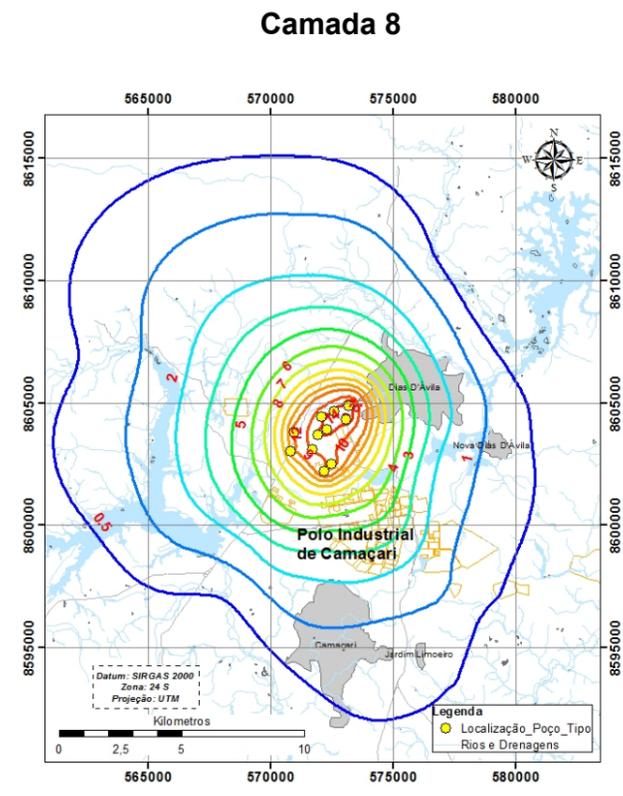
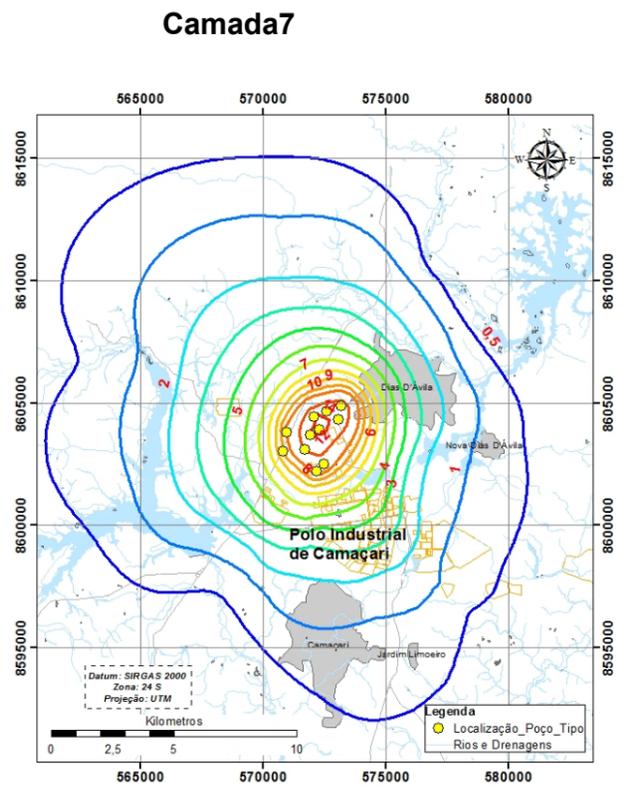
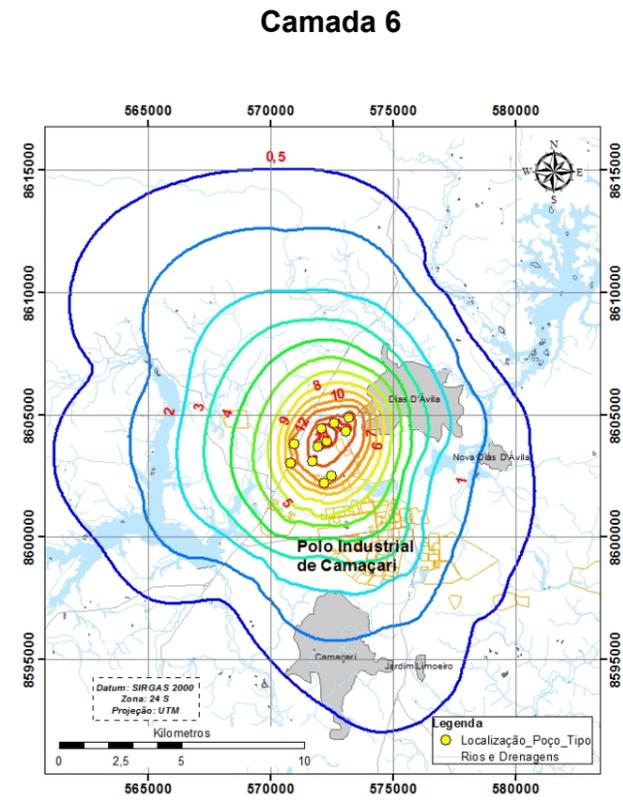
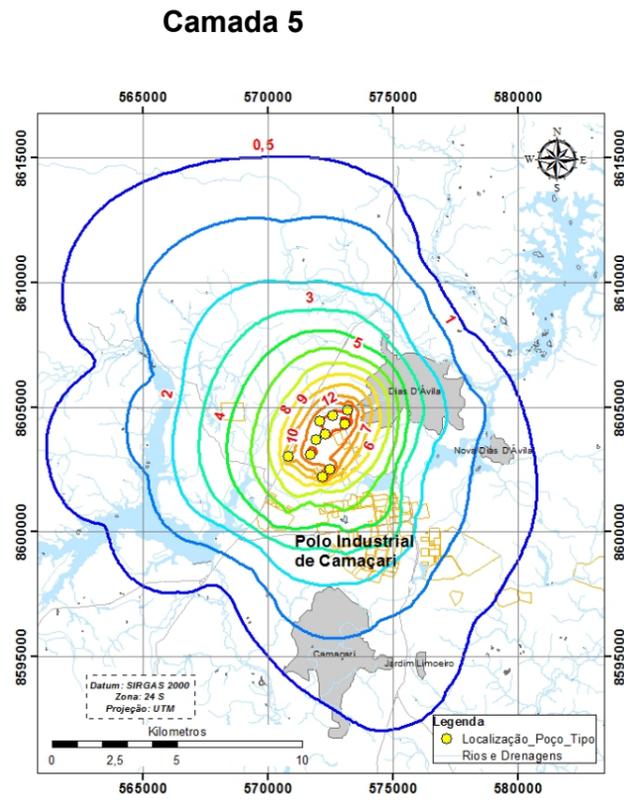


Figura 45 – Simulação Preliminar _ Rebaixamentos Máximos nas Camadas Produtoras (MNFR) (elaborado pela autora).

Na simulação preliminar, a captura da bateria de poços provém, basicamente, da porção noroeste da área (Figura 43 e Figura 44), o que é favorável em termos de vulnerabilidade do aquífero (não há atividades industriais nessa região, e o Complexo Básico, zona sensível à poluição está a jusante da bateria de poços).

Por outro lado, verificou-se que para o tempo de trânsito de 15 anos, a captura deverá interferir na operação de dois ou mais poços, situação que se agrava para um tempo de trânsito de 30 anos (8 poços), podendo resultar num déficit hídrico para os usuários do entorno em médio e longo prazo.

Os rebaixamentos máximos indicados pela simulação no MNFR (Figura 45) para as camadas produtoras (5, 6, 7 e 8) estiveram entre 16 e 18 metros, com raio de influência de até 9 Km. Esses valores de rebaixamento indicados pelo modelo refletem o comportamento do aquífero como um todo. Os rebaixamentos simulados pelo modelo devem ser comparados a medidas tomadas em poços de observação, de perfil construtivo similar aos poços de produção, instalados a certa distância dos mesmos.

De forma conservadora, o resultado preliminar da avaliação conduzida em 2004 foi recomendar a instalação dos poços, porém em uma configuração mais espaçada, de forma a reduzir a interferência entre as zonas de captura e reduzir os efeitos locais do rebaixamento do aquífero causado pela operação da bateria.

5.1.2 Condições Operacionais Pós-Outorga (2009 a 2015)

A Figura 46 mostra a localização da bateria de poços de produção instalados em relação às localizações de projeto. O projeto final manteve a condição original de substituição dos 8 poços, em profundidades maiores e instalação de 3 poços adicionais, entretanto ocorreram pequenos desvios quanto às locações de projeto, bem como não foram atendidas as recomendações de configuração mais espaçada para reduzir as interferências entre poços.

Após instalação, os ensaios de bombeamento realizados indicaram o atendimento à demanda da empresa, com folga, representando uma vazão total de 52.424 m³/d, num regime de bombeamento de 20 h (Tabela 27).

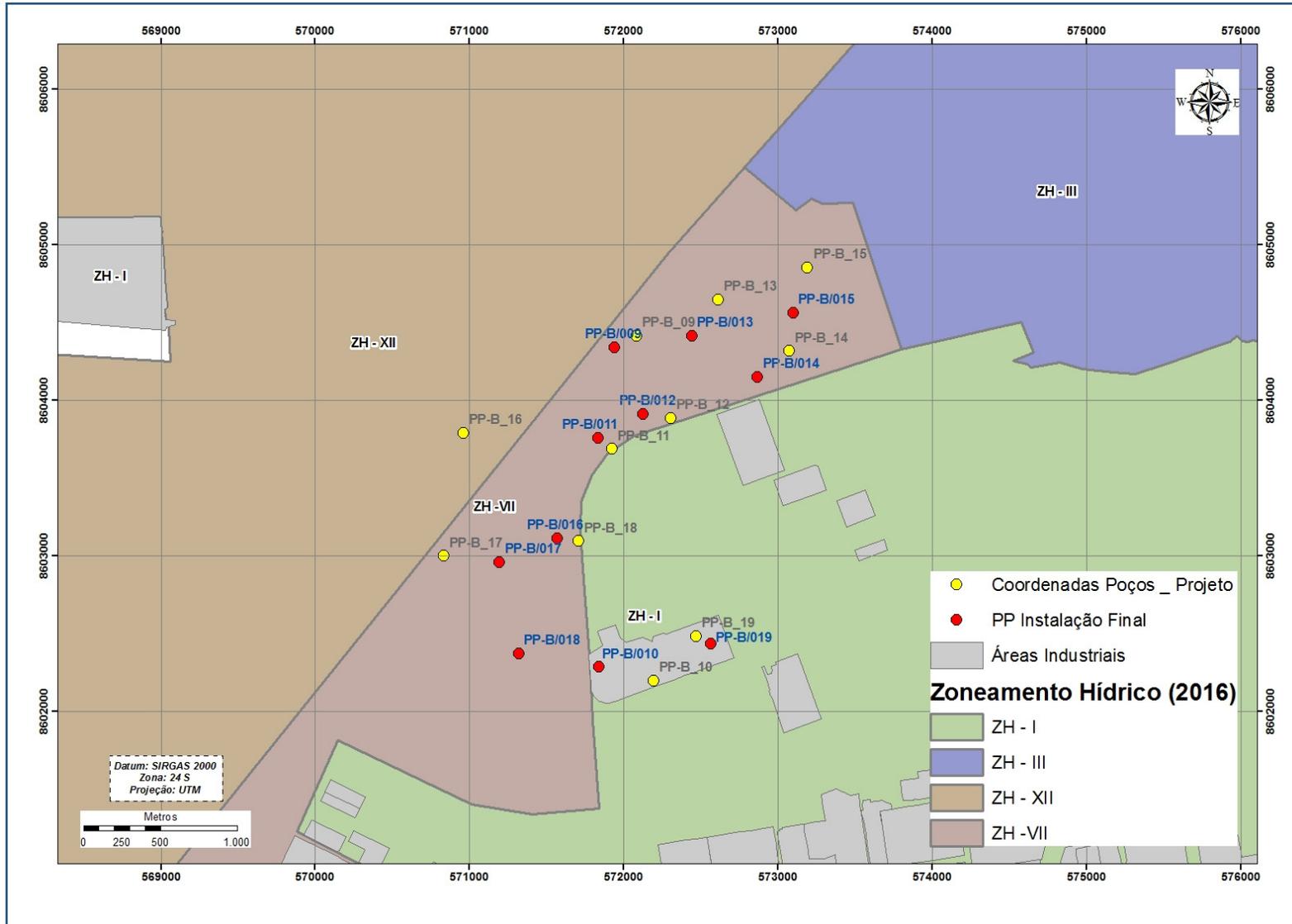


Figura 46 – Localização da Bateria de Poços - Projeto X Instalação Final (elaborado pela autora).

Tabela 27. Características dos Poços Instalados após Ampliação da Outorga

Poço	Prof. (m)	Vazão Máxima (m ³ /h)	NE (m)	ND (m)	Rebaixamento Máximo do Ensaio (m)	Capacidade específica (Q/s) – m ³ /h/m
PP-B/009	450,8	222,0	47,5	86,6	39,1	5,68
PP-B/010	450,00	129,2	43,5	65,7	22,2	5,82
PP-B/011	480,00	270,0	50,0	82,2	32,2	8,39
PP-B/012	453,81	250,0	55,3	90,9	35,7	7,01
PP-B/013	450,02	250,0	40,9	76,3	35,4	7,07
PP-B/014	449,44	250,0	38,2	90,0	51,9	4,82
PP-B/015	450,08	250,0	27,9	62,3	34,4	7,27
PP-B/016	450,08	250,0	60,2	93,3	33,1	6,91
PP-B/017	447,57	250,0	63,6	91,0	27,4	8,76
PP-B/018	450,78	250,0	52,3	92,3	40,0	5,92
PP-B/019	449,48	250,0	44,9	83,5	38,6	6,48
Total (m ³ /d) – regime 20 h/d		52.424,0				

Fonte: Elaborado pela autora.

Os poços antigos (PP-B/002 a 007) foram utilizados como poços de observação para o monitoramento do rebaixamento nas imediações dos poços de produção, os poços PP-B/001 e PP-B/008 foram cimentados. Os pares de poços de observação versus produção ficaram assim: PP-B/002 _ PP-B/011; PP-B/003 _ PP-B/009; PP-B/004 _ PP-B/012; PP-B/005 _ PP-B/013; PP-B/006 _ PP-B/014; PP-B/007 _ PP-B/015.

Com as descrições litológicas obtidas em campo na instalação dos poços novos foram construídas duas seções litoestratigráficas, em nível local (Figura 47 e Figura 48). As primeiras seções filtrantes dos poços foram instaladas a partir da primeira camada de arenito confinada por uma camada de folhelho de espessura aproximada de 80 metros.

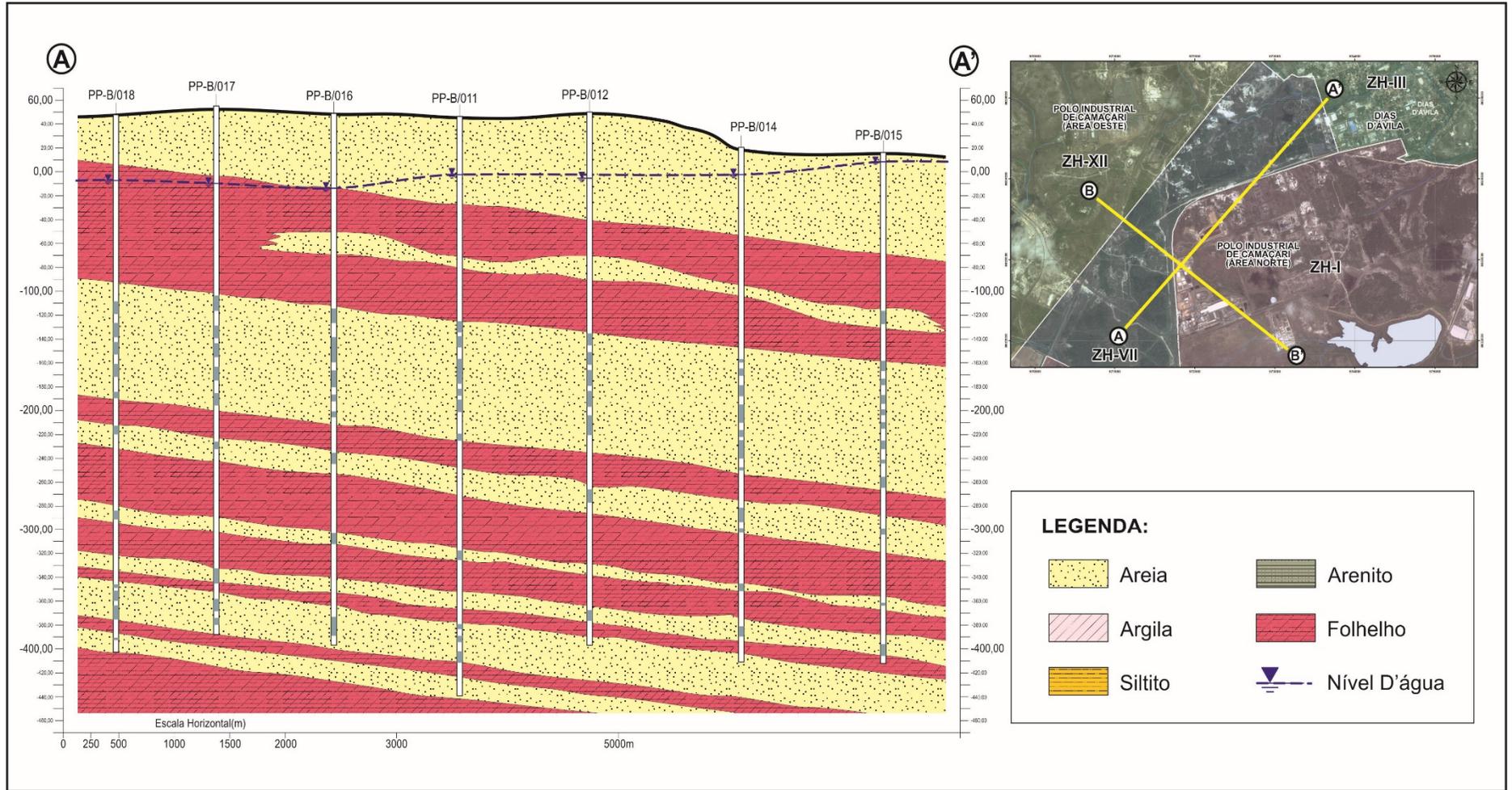


Figura 47 – Seção Esquemática da Hidrogeologia Local A- A' – Empresa 1 (elaborado pela autora).

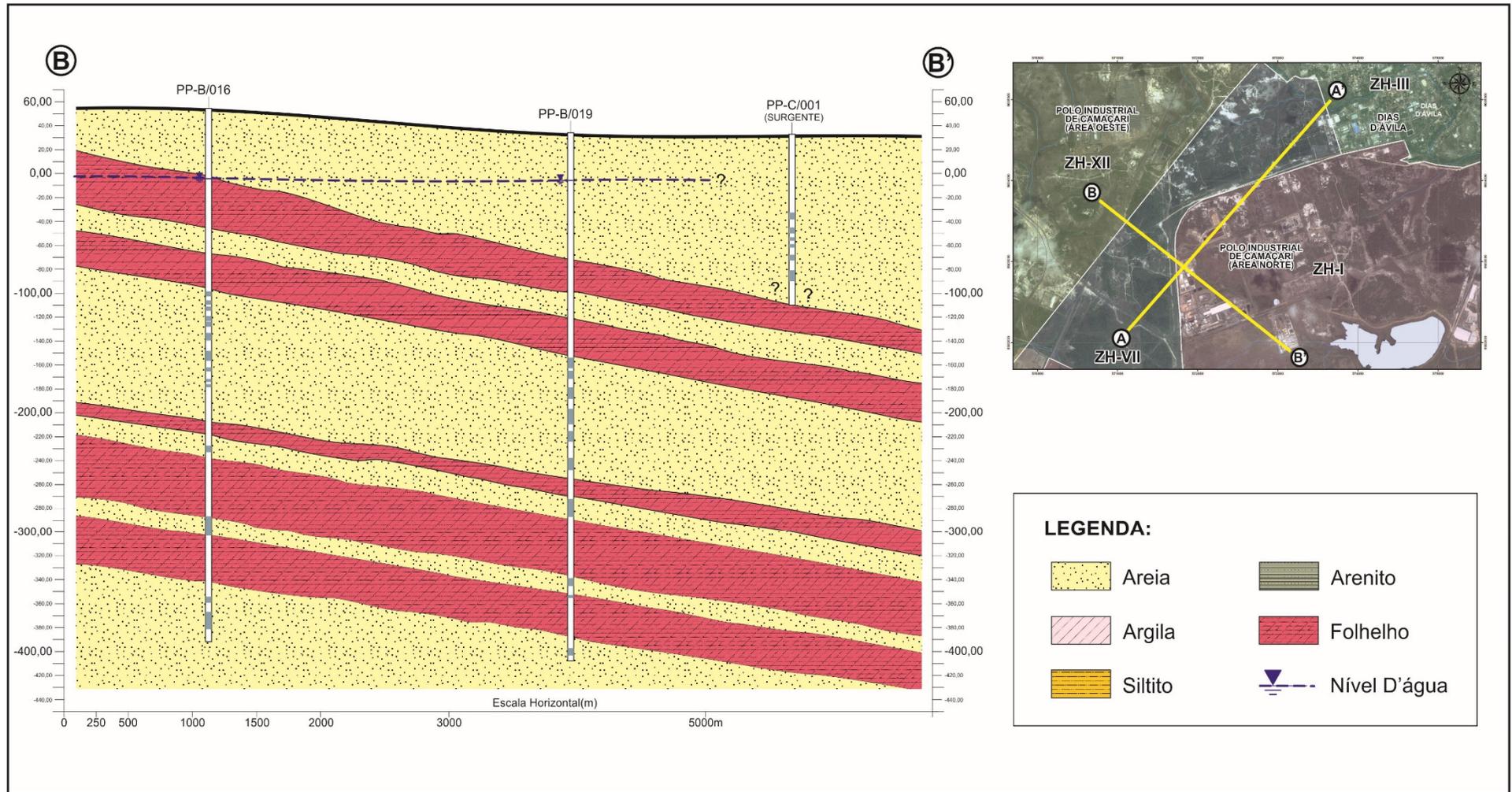


Figura 48 – Seção Esquemática da Hidrogeologia Local B' – B' – Empresa 1 (elaborado pela autora).

Em 2009, quando foi iniciada a operação simultânea da bateria de poços, houve rebaixamento excessivo do nível dinâmico, o que representou inclusive riscos de superexploração (CETREL, 2011). Nesse período, a vazão operacional precisou ser ajustada e reduzida para 43.200 m³/d, valor esse menor que o outorgado na época (50.400 m³/d).

No caso do PP-B/009 o maior rebaixamento registrado pelo ensaio de bombeamento era de cerca de 40 m, no entanto, no início da operação da bateria de poços o rebaixamento total chegou a 55 m. A partir do ano de 2012 foi possível verificar o rebaixamento total do poço em operação, muito maior que aquele observado quando do início da operação (Figura 49).

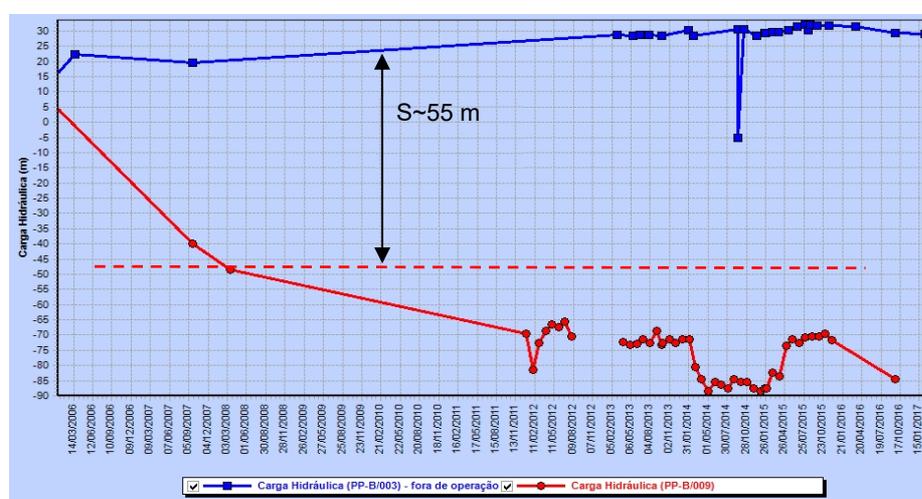


Figura 49 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/009 (em operação) X PP-B/003 (inoperante) (elaborado pela autora).

Para os demais poços, especialmente os pares onde é possível acompanhar as diferenças entre o nível dinâmico, medido nos poços em operação, e nível estático, medido nos poços inoperantes, observou-se rebaixamentos de cerca de 100 metros, até sua estabilização, cujos dados só puderam ser observados a partir de 2012/ 2013. Antes desse período não houve monitoramento de nível d'água (Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53 e Figura 54).



Figura 50 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/011 (em operação) X PP-B/002 (inoperante) (elaborado pela autora).

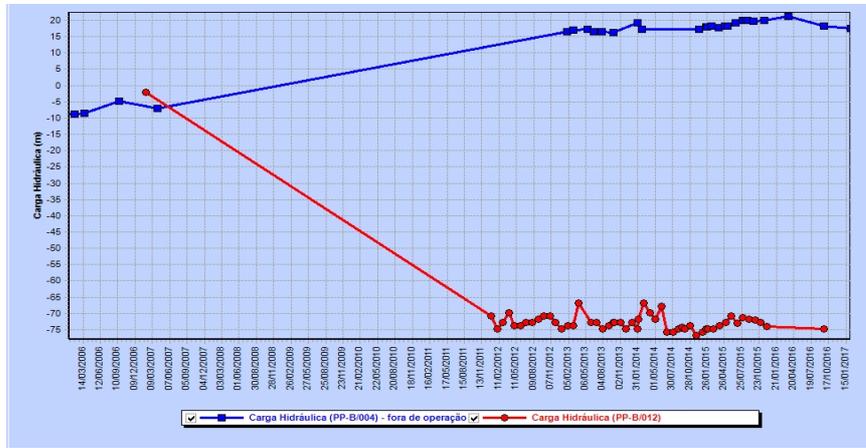


Figura 51 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/012 X PP-B/004 (inoperante) (elaborado pela autora).



Figura 52 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/013 X PP-B/005 (inoperante) (elaborado pela autora).



Figura 53 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/014 X PP-B/006 (inoperante) (elaborado pela autora).



Figura 54 – Diferença de Cargas Hidráulicas PP-B/015 X PP-B/007 (inoperante) (elaborado pela autora).

Ressalta-se que o rebaixamento indicado pelos poços de produção inclui as perdas de carga no regime laminar e turbulento. No regime laminar, relaciona-se à: perdas no aquífero que dependem dos parâmetros hidráulicos T e S, além do tempo de bombeamento e do raio do poço; perdas na zona de transição do pré-filtro e perdas por penetração parcial do poço no aquífero. As perdas de carga no regime turbulento estão associadas a zona do pré-filtro e filtro, além das perdas axiais associadas aos filtros, seção intermediária e câmara de bombeamento (CPRM, 2000).

Em relação à interferência do bombeamento dos poços no comportamento do aquífero (Figura 49 a Figura 54), indicadas pelos valores de nível d'água nos poços de observação em azul (PP-B/002 a 007), percebe-se que a evolução dos dados de carga hidráulica medidos entre os anos de 2012 e 2016 não registram tendência de rebaixamento, estando em

equilíbrio com o regime de bombeamento da bateria de poços. Aparentemente esses resultados indicam que a exploração está sendo racional, entretanto, para se avaliar uma possível tendência de sobreexploração localizada, também deve-se levar em conta os volumes de recarga anuais. Se as recargas são menores que as taxas de bombeamento, pode haver um indicativo de déficit de volumes disponíveis em longo prazo.

Na análise do balanço hídrico, discutido no item 4.4., foi visto que mais de 70% da recarga nessa região (ZH-VII) provém de zonas vizinhas, especialmente a ZH-XII, e alguma recarga provém da contribuição por precipitação direta (28%).

Nesse caso, entender como ocorrem localmente as relações de drenança vertical entre os aquíferos livre e confinado é de extrema importância no processo de gestão de recursos hídricos, uma vez que se há drenança vertical do freático para o confinado, os volumes de recarga provenientes da precipitação direta têm participação relevante na potencialidade hídrica local utilizada para exploração. Dessa forma, é importante gerenciar o equilíbrio entre os volumes explorados e as taxas de recarga do aquífero, para não comprometer a disponibilidade hídrica regional.

As relações de drenança são analisadas em função da condutividade hidráulica na camada confinante, da diferença entre cargas hidráulicas nas porções freática e confinada e da espessura dessa camada (CPRM, 2000). Admitindo-se que na região de estudo ocorre drenança vertical, ainda que em taxas muito pequenas, pode-se avaliar se a tendência de fluxo é ascendente ou descendente através da comparação entre as cargas potenciométricas do aquífero freático e confinado.

Na região da bateria de poços em avaliação (Empresa 1) não há poços multiníveis que possam monitorar as relações hidráulicas entre o aquífero raso e confinado, porém, na tentativa de compreender as relações de drenança vertical entre os aquíferos freático e confinado, utilizaram-se as cargas hidráulicas calculadas para os poços rasos PM-D/001 (prof. 24 m), PM-D/002 (prof. 24 m) e PM-D/003 (prof. 25 m), comparadas com os poços profundos PP-B/006 (prof. 268 m) e PP-B/007 (prof. 257 m), distantes dos citados poços rasos em cerca de 600 m. Os poços de monitoramento estão situados a nordeste da bateria de poços, entre as zonas hídricas I e VII (Figura 55).

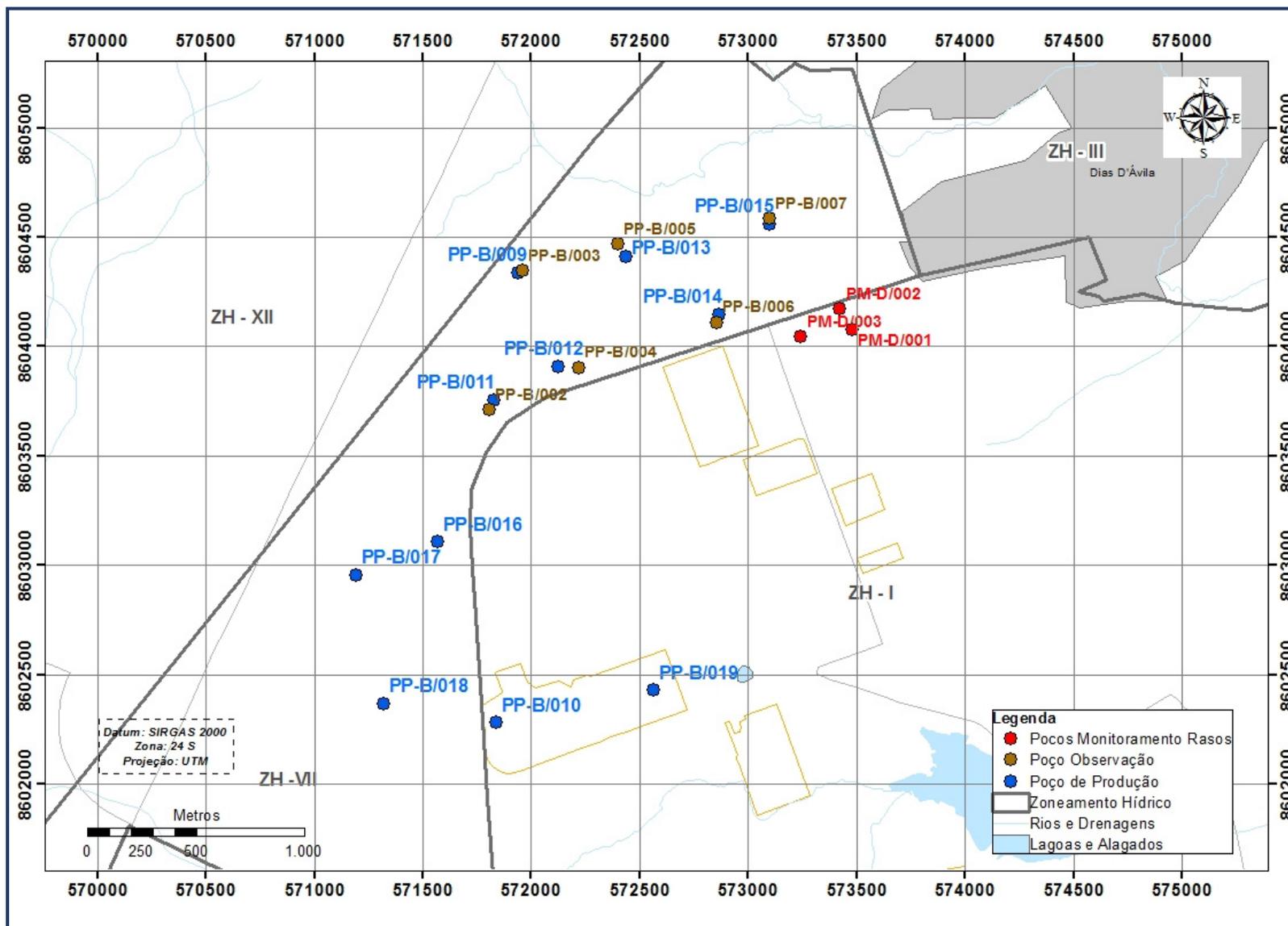


Figura 55 – Localização dos Poços de Monitoramento Rasos (elaborado pela autora).

A Figura 56 mostra a diferença entre as cargas hidráulicas obtidas de poços rasos e profundos ao longo do tempo.

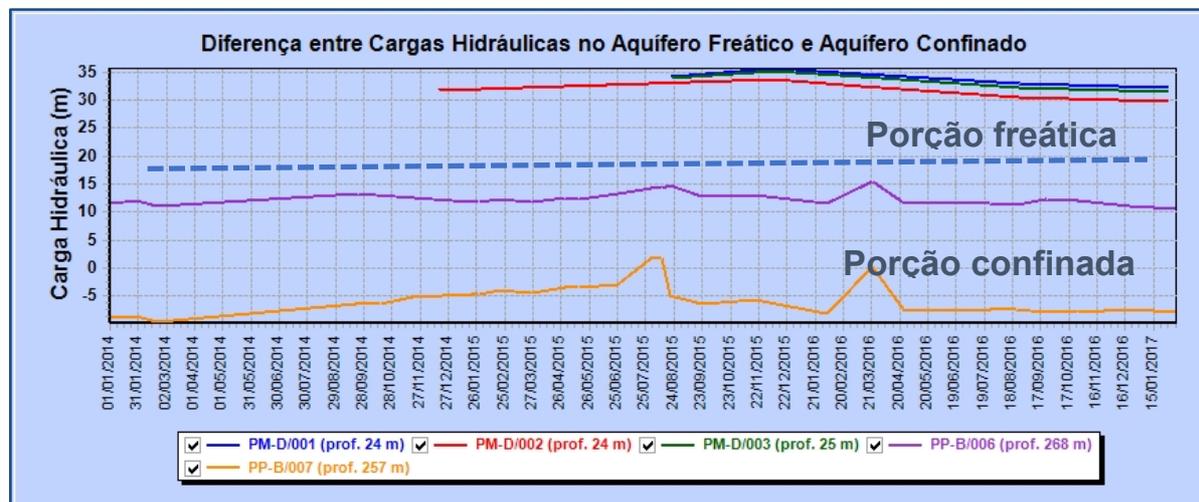


Figura 56 – Diferença entre Cargas Hidráulicas no Aquífero Freático e Aquífero Confinado (elaborado pela autora).

Uma vez que a água subterrânea tende a se movimentar de áreas de maior potencial para menor potencial, a Figura 56 pode indicar que, localmente, o aquífero freático apresenta drenança vertical descendente para o aquífero confinado. Vale ressaltar que as cargas dos poços de observação PP-002/006 e PP-002/007, estão influenciadas pelo bombeamento dos poços PP-002/014 e PP-002/015, respectivamente, o que já favorece uma possível drenança vertical descendente.

Supondo-se que a drenança vertical esteja ocorrendo, o controle de poluição na porção freática do aquífero passa a ter uma importância muito maior, devendo ser um fator prioritário no gerenciamento do risco da área onde há poços de produção instalados.

Atualmente, os poços na região operam a uma vazão média total de 42.744 m³/d e a vazão total outorgada é de 56.440 m³/d (2013 a 2018). As características dos poços e condições de operação atuais estão representadas na Tabela 28.

Tabela 28. Condições Operacionais dos Poços Instalados após Ampliação da Outorga

Poço	Prof. (m)	Vazão Média (2013) - m ³ /h	Vazão Média (2015) - m ³ /h	Vazão Outorgada - m ³ /h (2013 a 2018)	Regime Operacional da Outorga (h)
PP-B/009	450.80	159	186.5	222	20
PP-B/010	450.00	182	181.2	250	20
PP-B/011	480.00	203	166.3	250	20
PP-B/012	453.81	165	171.5	250	20
PP-B/013	450.02	200	202.0	250	24
PP-B/014	449.44	202	186.3	250	20
PP-B/015	450.08	216	141.5	250	24
PP-B/016	450.08	162	190.5	250	20
PP-B/017	447.57	197	177.3	250	20
PP-B/018	450.78	150	176.3	250	20
PP-B/019	449.48	218	190.7	250	20
Total (m ³ /d)		40.776	42.744	56.440	

Fonte: Elaborado pela autora.

A diferença entre as cargas hidráulicas entre os poços pares (PP operando e PP de observação) e os rebaixamentos obtidos nos ensaios de bombeamento se devem, provavelmente, ao fato de que os ensaios de vazão foram conduzidos individualmente para cada poço por vez, não levando em consideração a interferência existente entre eles.

Já na simulação de projeto, indicada pelo MNFR, se observava que as zonas de captura se sobrepunham entre os poços. Nesse caso, os raios de influência são intervenientes entre eles e o rebaixamento total para cada poço seria a soma dos rebaixamentos individuais obtidos nos testes de vazão (FETTER, 1994). Essa superposição linear é válida somente para aquíferos confinados, onde os valores de transmissividade não mudam com o rebaixamento, como é o caso objeto do estudo.

De forma esquemática, Diniz (2008) apresenta a relação entre os rebaixamentos de poços intervenientes na Figura 57, mostrada a seguir, onde o rebaixamento total individual será $s' = s_1 + s_2$.

Seguindo o modelo de Diniz (2008), foram tomados dados médios de rebaixamento (RM) dos poços pares com os poços de observação e somou-se os rebaixamentos máximos entre poços interfrentes (RMI) (Tabela 29), chegando a razões na faixa de 1,02 a 1,59. Dessa forma, verifica-se que, quando considerada a interferência entre os poços, os rebaixamentos máximos calculados nos ensaios de vazão se apresentam mais próximos dos

rebaixamentos confirmados em campo por monitoramento. Portanto, o presente trabalho considera que as premissas de vazão para outorga devem ser reavaliadas em função das capacidades específicas dos poços.

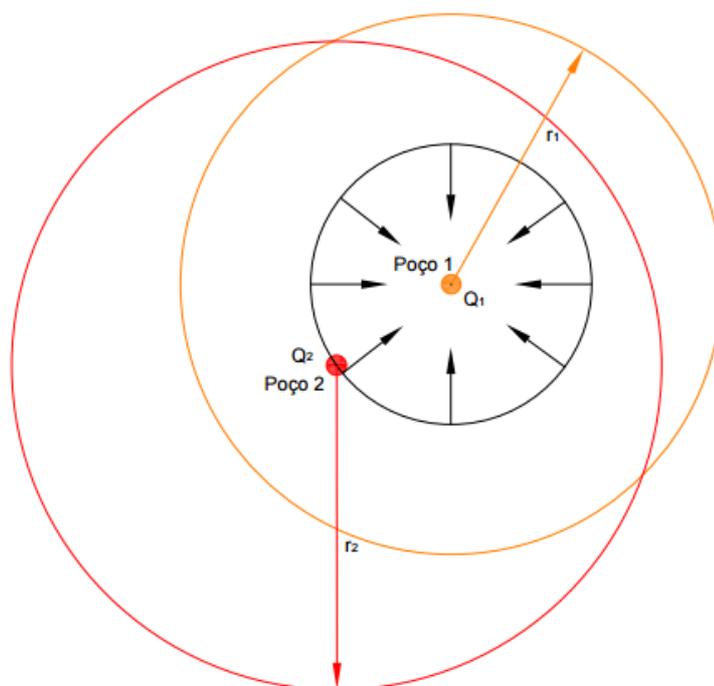


Figura 57 – Representação Esquemática da Interferência entre Poços (DINIZ, 2008).

Tabela 29. Rebaixamentos Máximos Interferência entre Poços

Poço	Rebaixamento Máximo considerando Interferência entre poços - m (RMI)	Rebaixamento Monitorado - m (RM)	RMI/RM
PP-B/009	110	100	1,10
PP-B/011	113	110	1,02
PP-B/012	107	100	1,07
PP-B/013	143	90	1,59
PP-B/014	104	100	1,04
PP-B/015	104	80	1,30

Fonte: Elaborado pela autora.

5.1.3 Aplicação da Metodologia de Avaliação Proposta

A metodologia proposta neste trabalho foi aplicada na condição de avaliação preliminar da outorga, antes da instalação da bateria de poços, e na condição hipotética de avaliação pós-instalação dos poços. O método de avaliação considerou as etapas descritas no fluxograma apresentado na Figura 41.

5.1.3.1 Pré-avaliação da Outorga antes da Instalação dos Poços

A Figura 58 apresenta a localização da bateria de poços em relação ao zoneamento hídrico proposto no presente trabalho e a Tabela 30 resume a aplicação da metodologia de avaliação preliminar do processo de outorga, seguindo o fluxograma da Figura 41.

Como mostrado na Figura 58 a bateria de poços em avaliação tem dois deles situados na Zona Hídrica I (PP-B/010 e 019), e devido à proximidade com as zonas de risco de contaminação, seria recomendada a relocação dos mesmos para zona hídrica vizinha.

Um dos poços está situado na ZH-XII (PP-B-016), onde a potencialidade hídrica efetiva é de 16.909.162 m³/ano, e o volume anual demandado pelo poço é de 1.825.000 m³/ano. Dessa forma, a localização do poço estaria adequada em relação ao zoneamento e potencialidade hídrica.

Os demais poços, todos situados na Zona Hídrica VII, seriam avaliados segundo a condição de “potencialidade efetiva” do ano em que a outorga foi solicitada. A potencialidade calculada para a zona VII foi de 12.761.479 m³/ano, subtraindo-se a vazão comprometida por poços em operação na zona no período de avaliação da outorga (2004), a potencialidade efetiva seria de 1.436.025 m³/ano para o ano de 2004.

Vale lembrar que a Potencialidade Hídrica é calculada a partir do somatório da Reserva Reguladora com uma porcentagem da Reserva Permanente (item 4.3.3. Reservas e Potencialidades). Nesse caso, qualquer solicitação de outorga posterior não poderia, em tese, comprometer a potencialidade hídrica da zona, sendo esse o primeiro critério aplicado na avaliação da outorga.

A demanda solicitada pela empresa, considerando apenas os poços instalados na ZH-VII, excluindo-se os dois poços da ZH-I e o poço da ZH-XII, era de 15.125.600 m³/ano, valor bastante superior à potencialidade efetiva disponível para àquela zona em 2004.

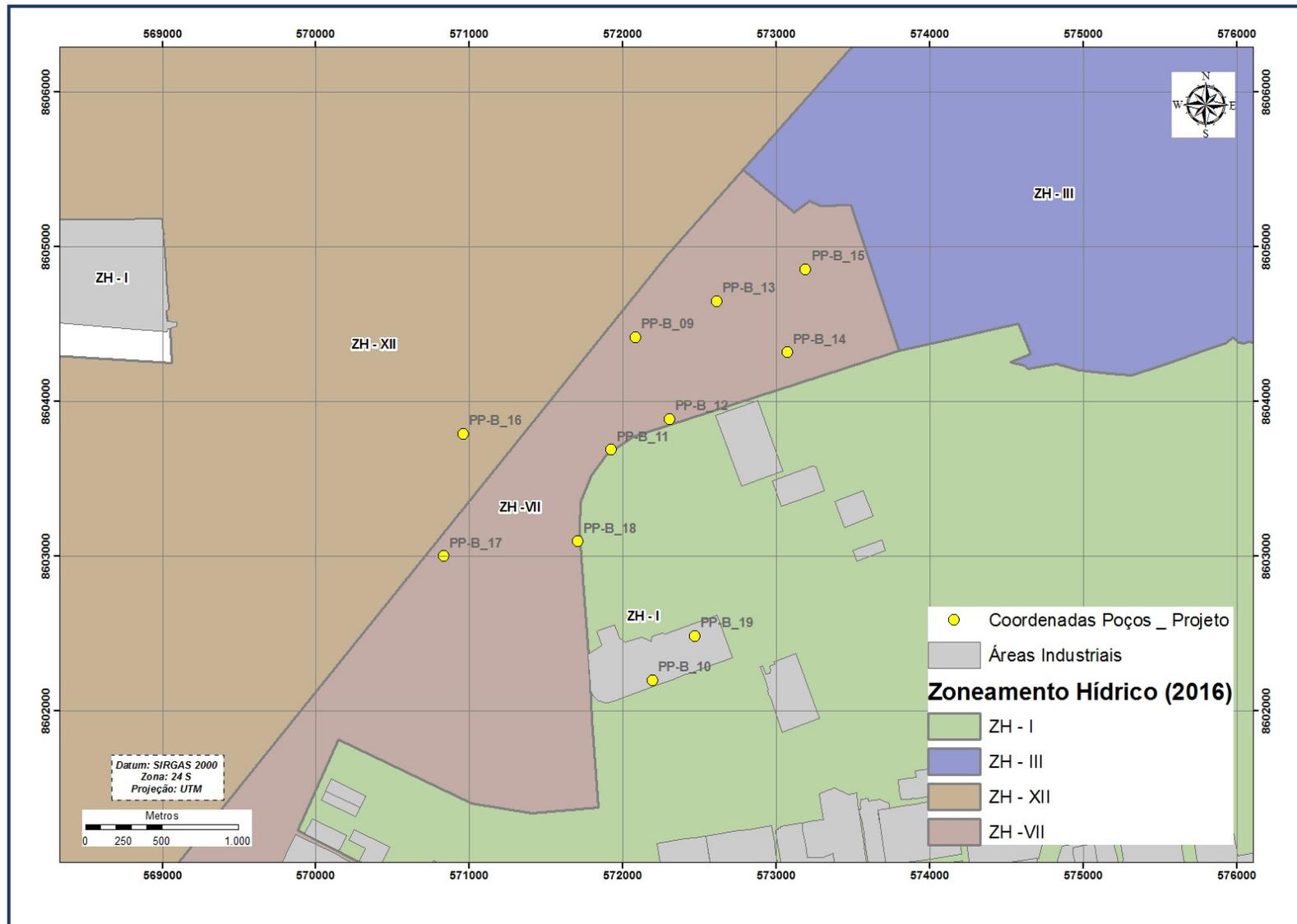


Figura 58 – Localização Bateria de Poços (pré-projeto) em Relação ao Zonamento Hídrico Proposto (elaborado pela autora).

Tabela 30. Aplicação da Metodologia de Avaliação de Processos de Outorga para o Pré- Projeto da Empresa 1 – Recursos Hídricos Subterrâneos

Etapa 1 – Anterior a perfuração: Pré-avaliação das vazões outorgáveis:	Situação Pré-Projeto_Empresa 1
1. Verificação da condição de localização proposta para perfuração do poço quanto à:	
<ul style="list-style-type: none"> • Favorabilidade 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ ZH-I (PP-B/010 e PP-B/019) não favorável à exploração ✓ ZH-VII (PP-B/09, PP-B/011 a 015, PP-B/017 a 018) não favorável a ampliação da exploração. ✓ ZH-XII (PP-B/016) favorável à exploração.
<ul style="list-style-type: none"> • Potencialidade hídrica efetiva ($P_{o\text{efetiva}}$) 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Supondo a $P_{o\text{efetiva}}$ para o ano de 2004 igual a $P_{o\text{efetiva}}$ total da ZH VII (=1.436.025 m³/ ano), a vazão requerida de 15.125.600 m³/ano não é suportada pela $P_{o\text{efetiva}}$.
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativa da vazão máxima explotável 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A vazão máxima estimada para a zona hídrica VII é de 174 m³/h e a vazão solicitada para outorga foi de 220 a 250 m³/h. Critério qualitativo, uma vez que se pretendia instalar poços mais profundos, onde a expectativa de vazão era maior.
2. Interferência entre poços (possibilidade de relocação)	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Há interferência.
3. Comparação vazão proposta com vazões operacionais	<ul style="list-style-type: none"> ✓ A vazão média operacional para os poços dessa zona é cerca de 154 m³/h. Qualitativo, expectativa de vazão é maior.
4. Interação com recursos hídricos superficiais	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Sem interação direta.
5. Simulação da vazão proposta no MNFR, caso ocorram interferências verificar possibilidade de relocação de poços	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Considerando a simulação realizada em 2004: Captura para tempo de transito de 15 e 30 anos: interferência entre poços / Rebaixamentos máximos entre 16 e 18 metros nas camadas produtoras.
Resultado do Parecer:	Não Favorável a Implantação , com recomendação de relocação de poços para a ZH-XII

Fonte: Elaborado pela autora.

Como resultado da avaliação preliminar, considerando os novos critérios de outorga, seria recomendada a revisão do projeto com a relocação de poços, de preferência para a zona hídrica vizinha ZH-XII, que possui potencialidade hídrica suficiente para atender à demanda solicitada.

Caso o primeiro critério do Zoneamento Hídrico e Potencialidade Hídrica fossem favoráveis, ainda assim, as simulações de captura no modelo indicariam interferência entre poços, como já visto na avaliação preliminar conduzida em 2004. Dessa forma, a opção de relocação dos poços seria provavelmente a mais recomendada.

A diferença entre as duas análises (método de avaliação de 2004 e método proposto neste trabalho) é que em 2004 foi recomendada a instalação dos poços, porém em uma configuração mais espaçada, de forma a reduzir a interferência entre as zonas de captura e reduzir os efeitos locais do rebaixamento do aquífero. Entretanto, a recomendação do presente trabalho é mais restritiva, pois propõe a relocação de poços para zona hídrica adequada em termos do potencial hídrico quanto à exploração e sem comprometimento das reservas hídricas em longo prazo.

5.1.3.2 Avaliação da Outorga após Instalação da Bateria de Poços – Empresa 1

No projeto final, após instalação da bateria de poços, a localização de projeto foi pouco alterada, com diferenças mínimas entre a localização de projeto e instalação final, como foi possível observar anteriormente na Figura 46.

O poço PP-B/016, antes localizado na ZH-XII, onde não havia problemas em relação à potencialidade hídrica, foi deslocado para a ZH-VII, se aproximando da área das instalações industriais e aumentando a possibilidade de interferência entre os poços.

Seguindo o roteiro de ações do fluxograma de avaliação de outorga, etapa 2 (Figura 41), o desvio nas locações originais não alterou a condição de interferência entre os poços já verificado na avaliação preliminar, pelo contrário aproximou ainda mais os poços, piorando a condição de interferência.

Segundo o fluxograma da Figura 41, o parecer na etapa 1 não seria favorável às locações dos poços quanto ao zoneamento hídrico, nem à favorabilidade quanto a potencialidade hídrica. Como os poços foram efetivamente instalados a etapa 2 da avaliação proposta será aplicada ao estudo de caso.

Nos testes escalonados realizados individualmente para os poços PP-B/009 a 019 calculou-se valores de capacidades específicas entre 4,82 e 8,76 m²/h. No entanto, quando

os poços começaram a operar todos juntos, esses valores se reduziram drasticamente, em função dos rebaixamentos excessivos (Tabela 31).

No estudo de caso em questão, ficou demonstrado que os testes de vazão escalonados realizados na bateria de poços poderiam ter considerado as interferências entre os mesmos chegando a vazões ótimas, adequadas à capacidade específica média esperada para a ZH-VII ($4,72 \text{ m}^3/\text{h}/\text{m}$ -Tabela 9), o que não foi feito em 2004.

A Tabela 32 resume os resultados da aplicação da metodologia de avaliação de outorga proposta neste trabalho, na pós-instalação dos poços. Alguns itens foram avaliados hipoteticamente, visto que, segundo a metodologia proposta, esse caso de outorga não seria favorável a implantação dos poços desde a avaliação preliminar.

Tabela 31. Comparativo entre Capacidades Específicas na Bateria de Poços – Empresa 1

Poço	Prof. (m)	Vazão Máxima do Ensaio (m ³ /h)	Rebaixamento Máximo do Ensaio (m)	Capacidade Específica Esperada (Q/s) – m ³ /h/m	Vazão Média Monitorada – 2015 (m ³ /h)	Rebaixamento Monitorado nos Poços (m)	Capacidade Específica Efetiva (Q/s) – m ³ /h/m
PP-B/009	450,8	222,00	39,10	5,68	186,50	50,00	3,73
PP-B/010	450,00	129,20	22,20	5,82	181,20	60,00	3,02
PP-B/011	480,00	270,00	32,20	8,39	166,30	85,00	1,96
PP-B/012	453,81	250,00	35,70	7,01	171,50	75,00	2,29
PP-B/013	450,02	250,00	35,40	7,07	202,00	80,00	2,53
PP-B/014	449,44	250,00	51,90	4,82	186,30	90,00	2,07
PP-B/015	450,08	250,00	34,40	7,27	141,50	70,00	2,02
PP-B/016	450,08	250,00	33,10	6,91	190,50	80,00	2,38
PP-B/017	447,57	250,00	27,40	8,76	177,30	80,00	2,22
PP-B/018	450,78	250,00	40,00	5,92	176,30	75,00	2,35
PP-B/019	449,48	250,00	38,60	6,48	190,70	85,00	2,24

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 32. Aplicação da Metodologia de Avaliação de Processos de Outorga para Poço já Instalado da Empresa 1 – Recursos Hídricos Subterrâneos

Etapa 2 – Posterior a Instalação: Ajuste ou validação das vazões outorgáveis	
1. Verificação in situ da localização do poço: interferência entre poços próximos.	Houve ligeira alteração nas locações originais, porém a condição de interferência entre poços se manteve. O PP-B/016 foi deslocado para a ZH-VII, que já possuía limitações em relação a $P_{o\text{efetiva}}$, também intensificando condição de interferência entre poços
2. Caso se verifique interferência entre poços, estudar vazões ótimas para que não haja rebaixamento excessivo entre os poços.	Recomendação de realização de testes de bombeamento que considerem a interferência entre poços. As capacidades específicas (CE) reais dos poços diferem das CE calculadas nos ensaios escalonados, individuais.
3. Comparação entre os rebaixamentos e zonas de captura obtidos na simulação com os resultados do teste escalonado. Se houver coincidência, prosseguir para 5.	Não houve similaridade, em parte, por considerar rebaixamentos medidos nos poços de observação obtidos durante os ensaios de vazão individuais. Outro fator interferente: profundidade de poços pares e posicionamento das seções filtrantes diferentes.
4. Determinar Captura e Rebaixamento com Dados Reais dos Poços	Realizar ensaios de bombeamento que considerem a interferência entre poços e determinar captura e rebaixamento, utilizando <i>softwares</i> específicos.
5. Avaliação qualitativa da capacidade específica (CE) do poço com a CE dos poços situados na mesma ZH para determinação da vazão que poderá ser efetivamente outorgada.	As capacidades específicas (CE) reais dos poços são bem menores que as CE calculadas nos ensaios escalonados, individuais. Novamente: realizar ensaios de bombeamento que considerem a interferência entre poços e determinar vazões ótimas de operação onde as CE se aproximem de 5 m^2/h .
6. A vazão máxima final a ser outorgada para o requerente corresponderá a um percentual da vazão calculada para o poço, considerando o fator de favorabilidade indicado para a zona hídrica. Se $CE \text{ do poço} < CE \text{ poços próximos}$, recomenda-se operar a uma vazão menor que a máxima.	Nas condições especificadas a recomendação seria realizar estudos que considerem a interferência entre poços, para determinação das vazões adequadas de operação.
Avaliação da qualidade da água.	Não há dados para avaliar esse critério, porém dados do monitoramento atual não apontam indícios de contaminação.
Resultado do Parecer:	Não favorável à liberação da outorga nas condições especificadas. Recomendação de estudo de vazões ótimas para adequação das CE. Planejar em longo prazo, relocação dos poços para ZH que possua PO_{efetiva} adequado.

Fonte: Elaborado pela autora.

O item 3 do fluxograma de avaliação da outorga (Figura 41) solicita a comparação entre os dados de captura e rebaixamentos simulados no MNFR com os resultados dos testes escalonados, sempre que efetuados com leituras de nível em poços de observação. Vale lembrar que o MNFR considera o rebaixamento da bateria de poços (com interferência), enquanto, os testes escalonados são testes individuais poço a poço.

As medidas de rebaixamento obtidas dos poços produção antigos PP-B/001 a PP-B/007 utilizados como poços de observação, durante os ensaios de bombeamento em 2005, foram comparadas ao rebaixamento simulado na pré-avaliação. Entretanto, sabe-se que esses valores de rebaixamentos medidos durante os ensaios devem ser menores que os reais, pois não consideraram o funcionamento dos demais poços, como pode ser deduzido da Figura 59.

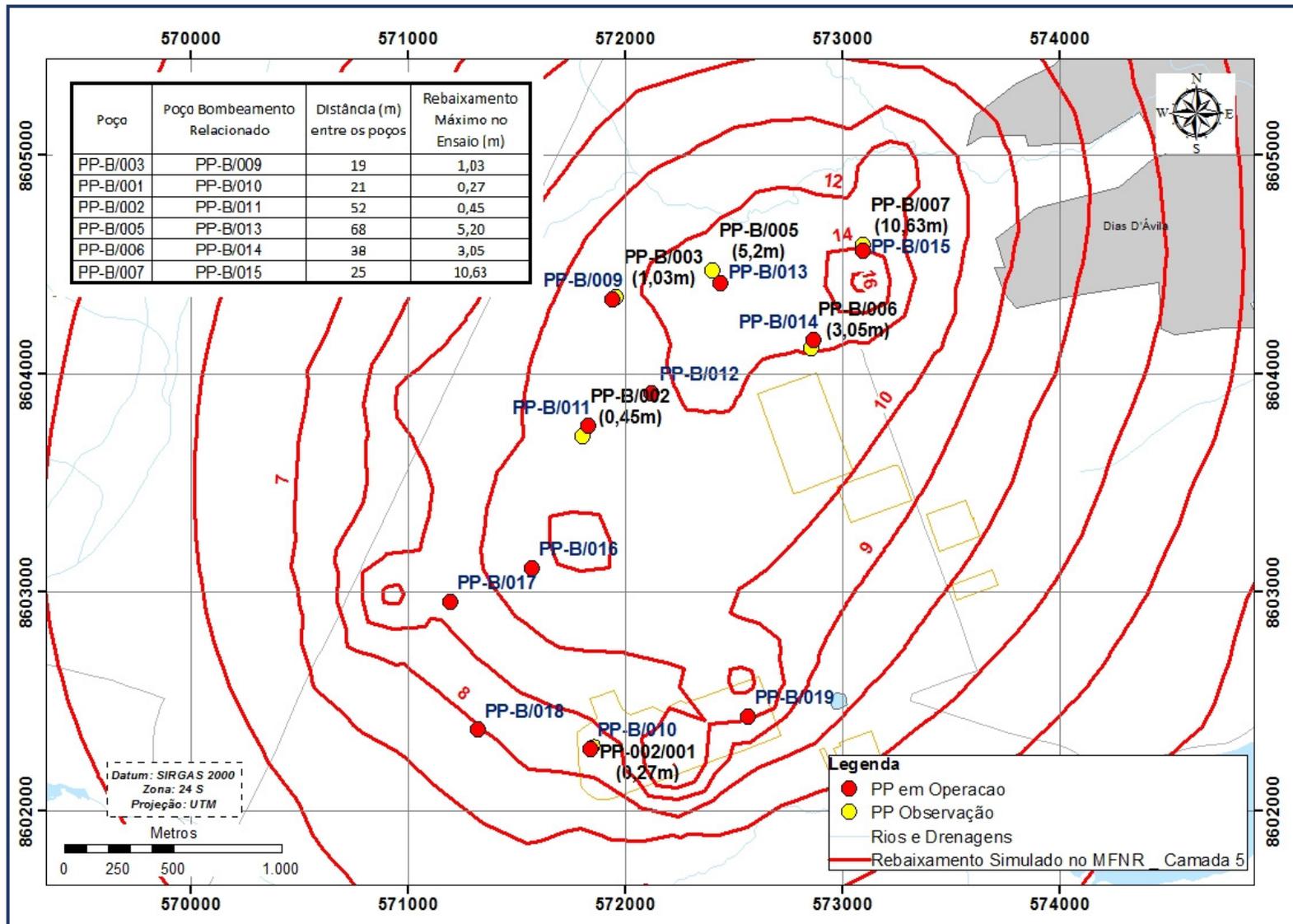


Figura 59 – Comparação entre Rebaixamentos Simulados e Dados Monitorados Durante os Ensaios Escalonados Individuais (elaborado pela autora).

Com base na Figura 59, observa-se que apenas o valor monitoramento no PP-B/007 se aproxima do rebaixamento simulado pelo MNFR, considerando apenas a camada 5, uma vez os poços antigos são mais rasos que os poços de produção atuais. Para o poço PP-B/005, por exemplo, entre as linhas 12 e 14 m de rebaixamento do MNFR, encontrou-se o valor 5,2 m de rebaixamento no ensaio de vazão.

Na análise do item 6 do fluxograma de avaliação da outorga (Figura 41) recomenda-se o prévio estudo das capturas e rebaixamento com os dados reais dos poços, considerando o múltiplo bombeamento e interferência entre os poços, o que não foi executado em 2005. Para isso, pode-se utilizar *softwares* específicos para ensaios de bombeamento, como o *Aquifer Test*, por exemplo. Tendo em vista, que em 2005 esses testes não foram realizados considerando a interferência entre poços, o presente trabalho não teria parâmetros de comparação, portanto essa etapa não foi executada.

O item 7 do fluxograma (Figura 41), relacionado à qualidade da água, não foi considerado na avaliação preliminar de 2004, entretanto, dados de monitoramento atuais não indicam contaminação, e os parâmetros físico-químicos revelam água de excelente qualidade para consumo.

Com base nos itens avaliados, a conclusão do presente trabalho é que, já na avaliação preliminar o processo de outorga deveria solicitar a relocação de poços. Para a segunda etapa, mesmo considerando que os critérios de zoneamento hídrico e potencialidade tenham sido favoráveis, o que não foram, ainda assim seria recomendado realização de testes de aquífero para determinação de vazões ótimas de operação considerando interferência entre os poços.

Finalmente, o parecer da outorga não seria favorável quanto às localizações propostas, e como os poços foram efetivamente instalados, a avaliação da segunda etapa também não seria favorável às condições atuais de operação que a bateria de poços apresenta, tendo em vista que os rebaixamentos da bateria de poços são maiores que os indicados em testes de vazão realizados em cada poço.

5.1.4 Validação do MNFR quanto aos Testes de Vazão Escalonada – Empresa 1

Com a finalidade de verificar se o MNFR responde de maneira similar às condições verificadas em campo em relação aos ensaios de vazão escalonada realizados após instalação dos poços da Empresa 1, foram simulados os ensaios nas mesmas condições de vazão adotadas em campo e comparados os valores de carga simulados com os valores obtidos em campo.

Parâmetros Hidrodinâmicos

Dentre os 11 ensaios de vazão realizados nos poços de produção instalados na Empresa 1, em pelo menos 6, os testes foram conduzidos com leitura de nível em poço de observação.

Vale lembrar que no processo de verificação de um modelo, o ideal é que os dados de carga hidráulica sejam comparados apenas com dados medidos em poços de monitoramento.

Além disso, testes de vazão em poços de produção conduzidos com leitura de nível em poços de observação são os mais adequados para estimativas de transmissividade (T) e armazenamento (S). Esses dados servem também para validar as premissas utilizadas para esses parâmetros dentro do MNFR.

Dessa forma, previamente às simulações, foram avaliadas as condições de condutividade hidráulica da região comparando os dados calculados a partir dos testes de bombeamento com os dados assumidos pelo MNFR, de modo a verificar a necessidade de ajustes e refinamentos.

Do total de 6 ensaios com leitura de nível d'água nos poços de observação, apenas 4 deles apresentaram dados brutos em condições de análise e cálculo dos valores de transmissividade e armazenamento, sendo eles o PP-B/003 (PP-B/009), PP-B/002 (PP-B/011), PP-B/006 (PP-B/014) e PP-B/007 (PP-B/015). Inconsistências relacionadas à má distribuição das leituras (erros sistemáticos) e incongruências nas datas de início e final dos testes levaram ao descarte dos dados de dois poços PP-B/005 (PP-B/013) e PP-B/004 (PP-B/012).

Com exceção do poço de produção PP-B/009, onde o teste foi conduzido em etapa única (vazão constante), nos demais poços foram conduzidos testes de vazão escalonada em 4 etapas, acrescidos da vazão máxima. As leituras de rebaixamento / recuperação nos poços de observação foram realizadas a partir da etapa de leitura das vazões máximas.

Considerando os dados disponíveis e assumindo o aquífero confinado, não drenante, homogêneo, isotrópico e de espessura uniforme na área de influência do bombeamento, com aparente extensão horizontal infinita, e desprezando-se as dimensões construtivas do poço, optou-se por utilizar a solução de recuperação de Theis para determinar os coeficientes hidrodinâmicos (T, S). Para isso foi utilizado o *software Aquifer Test* (v. 4.6.0.2.), da *Schlumberger Water Services*, cujo método de cálculo está descrito no item 3.5. deste trabalho.

Na Tabela 33 estão resumidas as informações hidráulicas obtidas a partir dos testes de vazão previamente conduzidos nos poços da Empresa 1.

Tabela 33. Parâmetros Hidráulicos nos Poços Instalados Obtidos do *Aquifer Test*

Poço de Bombeamento (PP)	Poço de Observação (PO)	T (m ² /s) -Theis (Aquifer Test) no PO	K (cm/s) = T (Aquifer Test) / b (espessura saturada)	S -Theis (Aquifer Test) no PO	Distância Radial do PO ao PP
PP-B/009	PP-B/003	7,47E-02	2,88E-04	1,32E-07	19,36
PP-B/010	PP-B/001	Dados de campo do PO inconsistentes para análise.			
PP-B/011	PP-B/002	5,16E-03	1,84E-05	7,94E-04	51,99
PP-B/012	PP-B/004	Sem leitura de nível em PO.			
PP-B/013	PP-B/005	Dados de campo do PO inconsistentes para análise.			
PP-B/014	PP-B/006	1,08E-02	4,15E-05	5,72E-05	38,44
PP-B/015	PP-B/007	4,36E-03	1,81E-05	1,23E-05	24,83
PP-B/016	-	Sem PO.			
PP-B/017	-	Sem PO.			
PP-B/018	-	Sem PO.			
PP-B/019	-	Sem PO.			

Fonte: Elaborado pela autora.

Os valores médios de condutividade hidráulica (K) obtidos estão na faixa de E-5 a E-4 cm/s e coeficientes de armazenamento (S) entre E-7 e E-4. Em relação ao armazenamento (S), verificou-se que os valores foram compatíveis com os coeficientes de armazenamento considerados no MNFR, entre 1E-7 ou 1E-4.

A Tabela 34 mostra a distribuição das condutividades hidráulicas nas camadas do MNFR onde estão instaladas as seções filtrantes para cada poço considerado, uma condição prévia do MNFR, sem nenhum ajuste de parâmetros.

Tabela 34. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços Instalados dentro do MNFR

Poço	Poço Implementado 2005			
	Camada MNFR	Kx (cm/s)	Ky (cm/s)	Kz (cm/s)
PP-B/009	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
	7	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
	8	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
PP-B/010	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	7	4,42E-05	4,42E-05	4,42E-05
	8	4,42E-05	4,42E-05	4,42E-05
PP-B/011	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	7	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	8	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
PP-B/012	6	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
	7	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
	8	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
PP-B/013	6	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
	7	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
	8	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
PP-B/014	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
	7	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
	8	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
PP-B/015	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	7	2,51E-05	2,51E-05	2,51E-05
	8	2,51E-05	2,51E-05	2,51E-05
PP-B/016	4	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
	7	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
	8	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
PP-B/017	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
	7	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
	8	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
PP-B/018	5	1,80E-06	1,80E-06	1,80E-07
	6	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
	7	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
	8	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
PP-B/019	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	7	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05
	8	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05

Fonte: Elaborado pela autora.

Como se verifica na Tabela 34, os valores de condutividade hidráulica nas camadas 4, 5 ou camada 6, são vias de regra inferiores às camadas subsequentes e representam o pacote de argila que precede às camadas de arenito mais produtoras do aquífero São Sebastião.

Assim sendo, é recomendado um ajuste nos valores de condutividade hidráulica das camadas. Aquelas com seções filtrantes, inserir valores de condutividade hidráulica na ordem de E-5 cm/s e àquelas imediatamente sobrepostas (referentes ao pacote de argilas que confinam o primeiro aquífero), inserir valores de menor condutividade hidráulica.

A Tabela 35 apresenta os valores ajustados para condutividade hidráulica dentro do MNFR, resultante de sucessivas simulações até se obter o melhor ajuste das cargas hidráulicas dos poços de observação, em regime estacionário. Nesse processo, com exceção da camada 5 no PP-B/009 e camada 4 no PP-B/016, em todas as demais camadas onde havia filtros, foram otimizados valores de condutividade hidráulica da ordem de E-5 cm/s.

Tabela 35. Distribuição das Condutividades Hidráulicas nos Poços Instalados dentro do MNFR após ajustes com Dados Litológicos de Campo

Poço	Poço Implementado 2005			
	Camada MNFR	Kx (cm/s)	Ky (cm/s)	Kz (cm/s)
PP-B/009	5	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	6	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
	7	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
	8	3,13E-05	3,13E-05	3,13E-05
PP-B/010	5	5,46E-05	5,46E-05	5,46E-05
	6	4,42E-05	4,42E-05	4,42E-05
	7	4,42E-05	4,42E-05	4,42E-05
	8	4,42E-05	4,42E-05	4,42E-05
PP-B/011	5	6,79E-05	6,79E-05	6,79E-05
	6	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	7	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
	8	3,50E-05	3,50E-05	3,50E-05
PP-B/012	6	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
	7	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
	8	3,27E-05	3,27E-05	3,27E-05
PP-B/013	6	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
	7	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
	8	2,79E-05	2,79E-05	2,79E-05
PP-B/014	5	7,92E-05	7,92E-05	7,92E-05
	6	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
	7	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
	8	2,81E-05	2,81E-05	2,81E-05
PP-B/015	5	8,38E-05	8,38E-05	8,38E-05
	6	2,51E-05	2,51E-05	2,51E-05
	7	2,51E-05	2,51E-05	2,51E-05
	8	2,51E-05	2,51E-05	2,51E-05
PP-B/016	4	3,00E-07	3,00E-07	3,00E-08
	5	5,21E-05	5,21E-05	5,21E-05
	6	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
	7	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
	8	4,17E-05	4,17E-05	4,17E-05
PP-B/017	5	4,75E-05	4,75E-05	4,75E-05
	6	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
	7	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
	8	4,37E-05	4,37E-05	4,37E-05
PP-B/018	5	4,94E-05	4,94E-05	4,94E-05
	6	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
	7	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
	8	4,59E-05	4,59E-05	4,59E-05
PP-B/019	5	5,58E-05	5,58E-05	5,58E-05
	6	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05
	7	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05
	8	4,13E-05	4,13E-05	4,13E-05

Fonte: Elaborado pela autora.

Verificação no Modelo

Para reprodução do cenário de rebaixamento / recuperação do ensaio de bombeamento no MNFR foram consideradas algumas premissas, conforme descrito a seguir:

- A versão do MNFR utilizada para a simulação foi a mesma utilizada preliminarmente entre 2004 e 2005 buscando se aproximar da condição de fluxo existente à época em que os ensaios de bombeamento foram conduzidos.
- Foram simulados os cenários de bombeamento / recuperação em regime transiente, que são mais adequados à avaliação de flutuações de nível d'água em curtos espaços de tempo.
- Foram utilizados os dados de rebaixamento / recuperação apenas dos poços de observação PP-B/003 (PP-B/009), PP-B/002 (PP-B/011), PP-B/006 (PP-B/014) e PP-B/007 (PP-B/015) para calibração dos dados de vazão máxima simulados.
- Os cenários foram simulados individualmente, por poço, conforme a premissa adotada em campo. Não foram consideradas interferências entre o bombeamento de poços vizinhos, uma vez que se objetiva validar os resultados do MNFR quanto aos resultados obtidos em campo, poço a poço.

Em simulações em regime transiente, o tempo se torna uma condição de contorno da simulação (ANDERSON *et al*, 2015). Portanto, para se obter a condição inicial de contorno, o modelo foi simulado e calibrado previamente em regime estacionário, com os poços de bombeamento desligados, utilizando os dados de nível estático prévio ao início dos ensaios.

A Figura 60 mostra o resultado da calibração dessa simulação para os 04 poços de interesse para o estudo PP-B/003 (PP-B/009), PP-B/002 (PP-B/011), PP-B/006 (PP-B/014) e PP-B/007 (PP-B/015). Lembrando que na simulação feita neste trabalho, os poços dentro dos parênteses são considerados de produção e os que estão fora dos parênteses foram utilizados como poços de observação.

É importante considerar que como os poços de produção possuem seções filtrantes em diferentes profundidades, e conseqüentemente, em diferentes camadas do MNFR, para serem utilizados como poços de observação para calibração, as cargas hidráulicas tiveram de ser atribuídas acerca da metade dos filtros. Em geral, a presença de vários filtros em diferentes níveis de aquífero produz cargas hidráulicas aproximadas e, na ausência de poços piezométricos de seções filtrantes curtas nas diferentes camadas do aquífero, pode-se

assumir que a carga observada é válida na metade dos filtros de poços de produção desativados.

Para os poços PP-B/002, 006 e 007 as cargas observadas foram posicionadas na camada 6 e para o PP-B/003 a carga observada foi posicionada na camada 7.

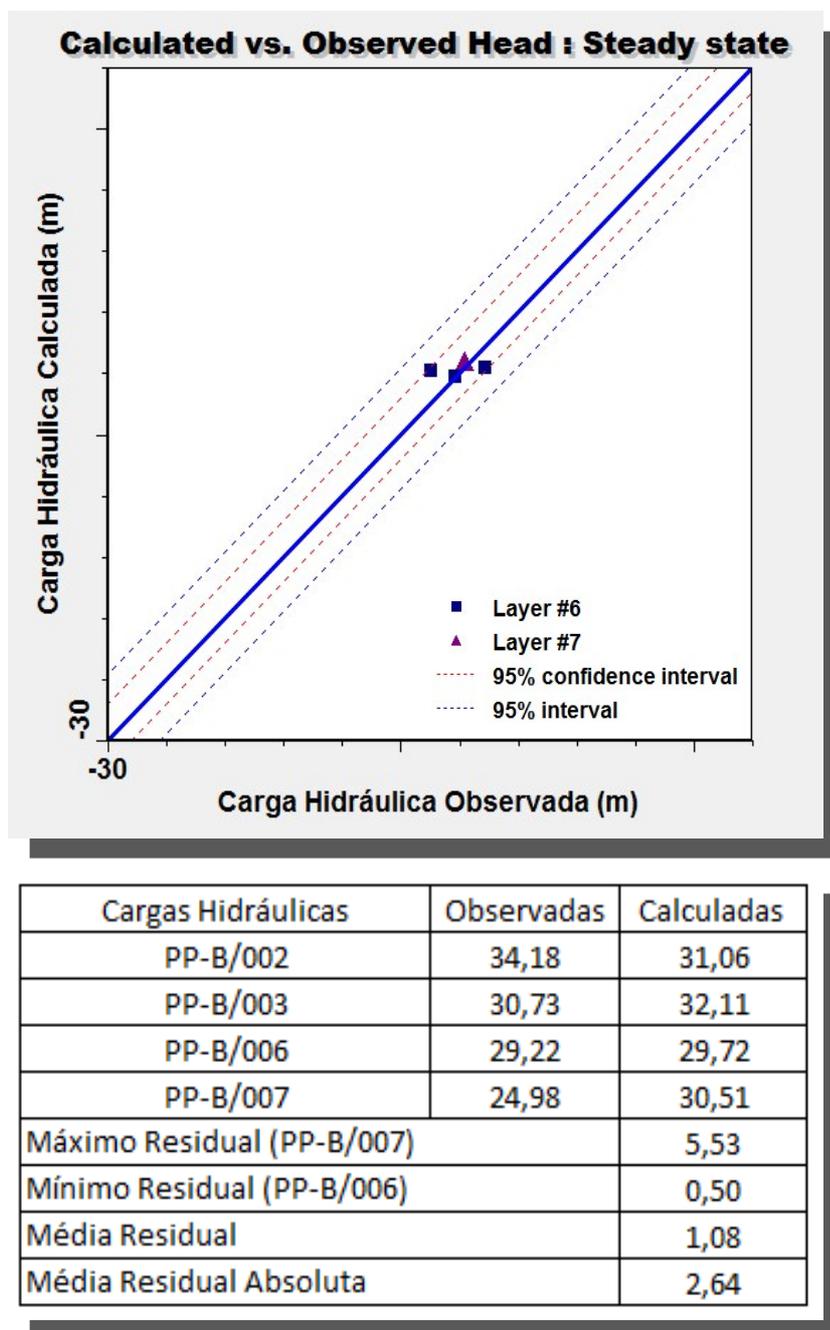


Figura 60 – Calibração do Modelo em Regime Estacionário – Condição Inicial para Simulação Transiente (elaborado pela autora).

De acordo com a Figura 60, os resultados mostraram que os poços PP-B/003 e PP-B/006 estiveram bem próximos da reta de calibração, porém os poços PP-B/002 e PP-B/007 mostraram algum desvio, ainda que dentro da faixa de 95 % de confiança na leitura dos dados. Devido a esse resultado, foi feita a tentativa de obter melhores ajustes para os PP-B/002 e PP-B/007, alterando as condições (condutividade hidráulica e armazenamento), verificando-se entretanto, poucas diferenças nos resultados.

Finalmente, utilizando como dados de calibração as leituras de nível d'água obtidos durante os ensaios de bombeamento para os poços de observação, na etapa da vazão máxima (regime de bombeamento) e etapa de recuperação (cessado o bombeamento), foram simulados os ensaios em regime transiente, seguindo os passos descritos abaixo:

1. O MNFR, previamente calibrado em regime estacionário, com os mesmos dados atualizados na época da simulação de 2004, foi utilizado como solução inicial para a simulação dos ensaios de bombeamento. Na simulação do modelo em regime estacionário, os poços de bombeamento estavam desligados, sendo atribuídas cargas de nível estático para calibração dos poços de observação.
2. Para cada um dos poços de bombeamento, PP-B/009, PP-B/011, PP-B/014 e PP-B/015, foram atribuídas as vazões máximas do teste de vazão, e valor de vazão nula para a etapa de recuperação. Como já comentado, as simulações ocorreram individualmente, sem considerar a interferência entre os poços. A Tabela 36 apresenta os dados de entrada no MNFR para simulação.

Tabela 36. Dados de Entrada no MNFR para Simulação em Regime Transiente

Poços	t (dia) inicial	t (dia) final	Vazão (m ³ /d)
PP-B/09	0	3	5328
	3	4	0
PP-B/11	0	3	6000
	3	4	0
PP-B/14	0	3	6002
	3	4	0
PP-B/15	0	3	6000
	3	3,5	0

Fonte: Elaborado pela autora.

3. As simulações foram conduzidas em regime transiente com 50 passos de tempo, em termos de discretização temporal. Os passos de tempo aumentam em progressão geométrica com fator de multiplicação de 1,2 vezes.

As Figura 61, Figura 62, Figura 63, Figura 64, Figura 65, Figura 66, Figura 67 e Figura 68 mostram os resultados obtidos para as cargas observadas versus interpoladas e rebaixamentos observados versus interpolados para os testes de vazão simulados no MNFR, em regime transiente.

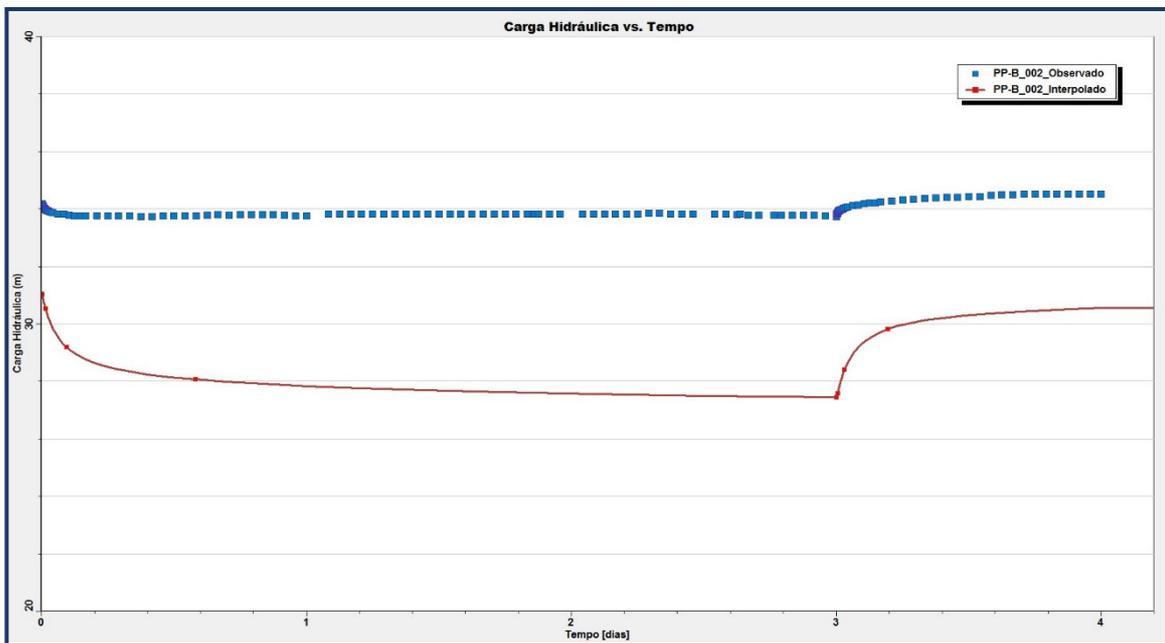


Figura 61 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/002 (elaborado pela autora).

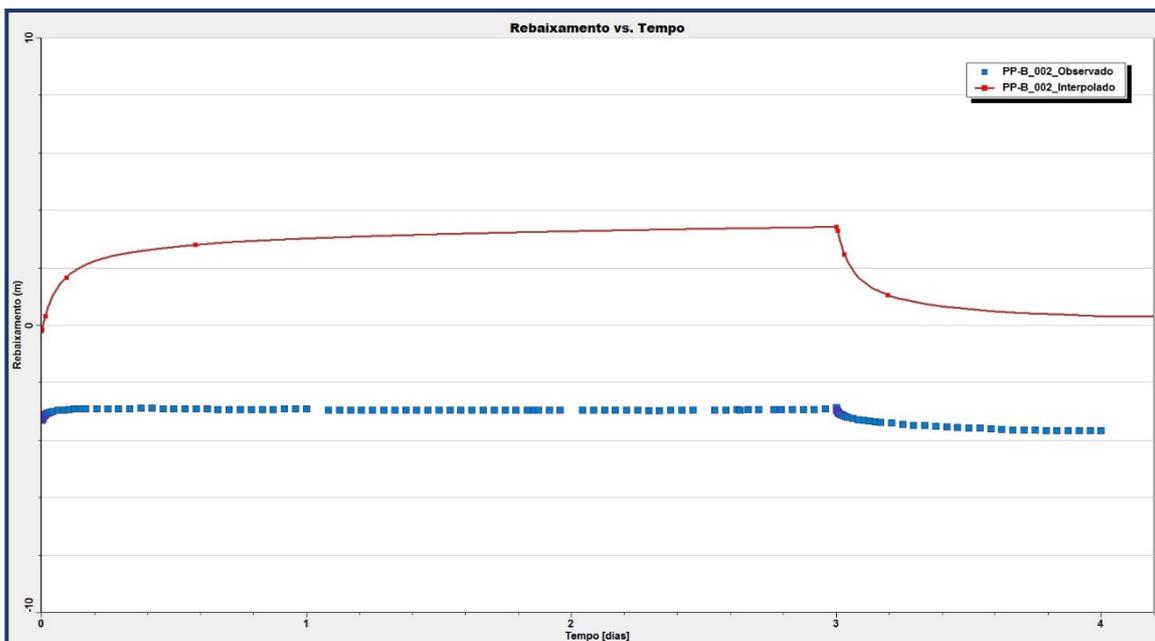


Figura 62 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/002 (elaborado pela autora).

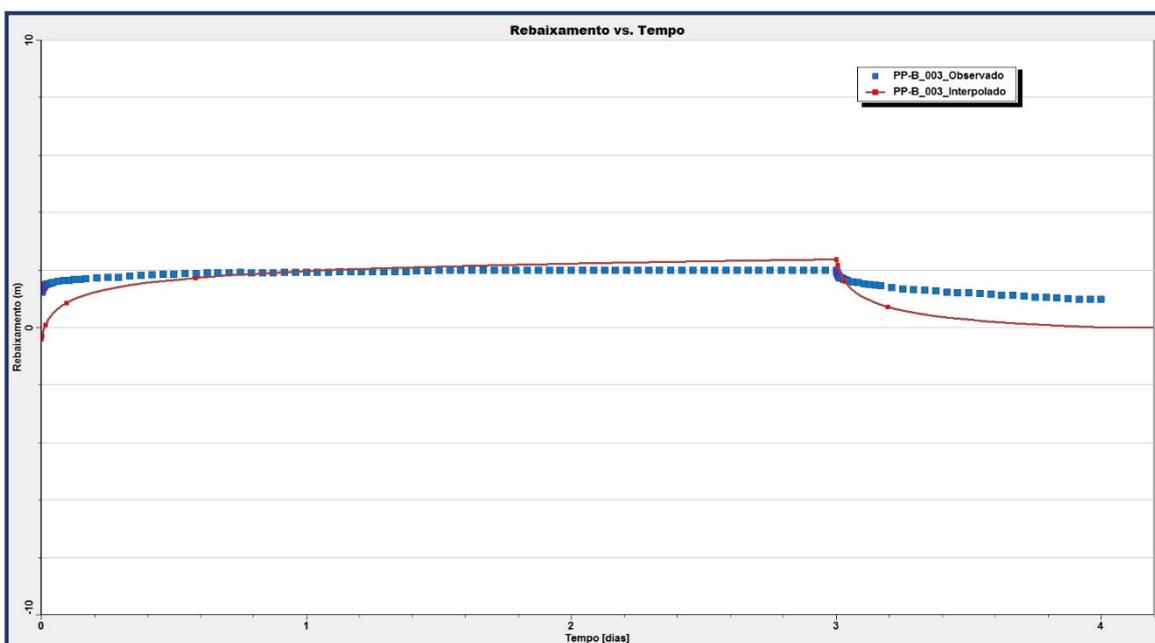


Figura 63 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/003 (elaborado pela autora).

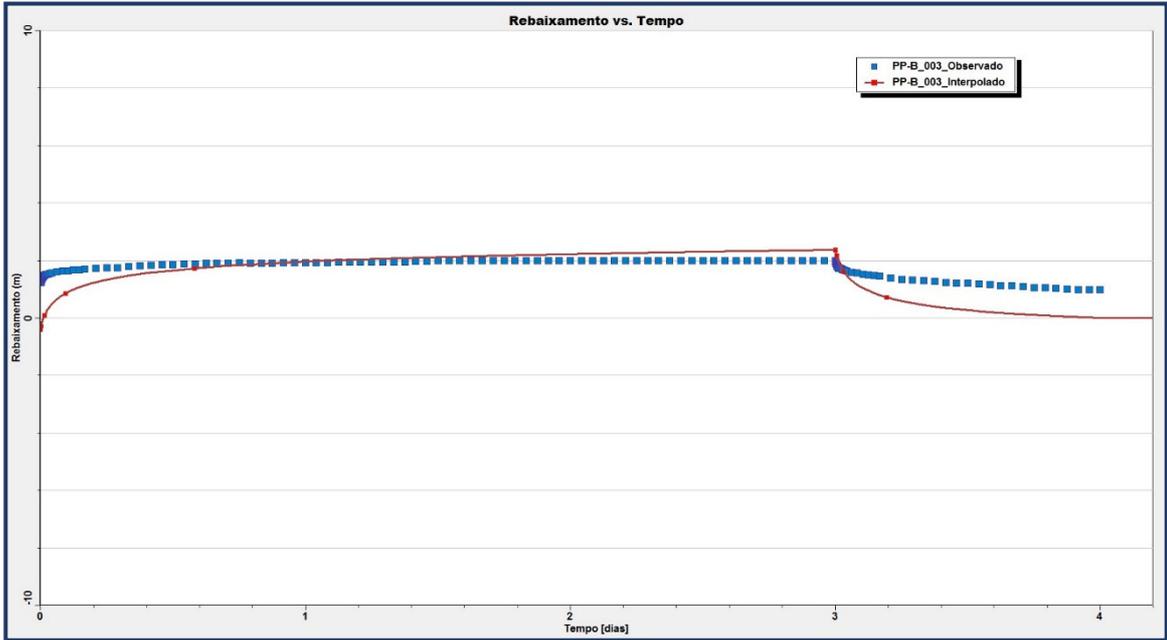


Figura 64 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/003 (elaborado pela autora).

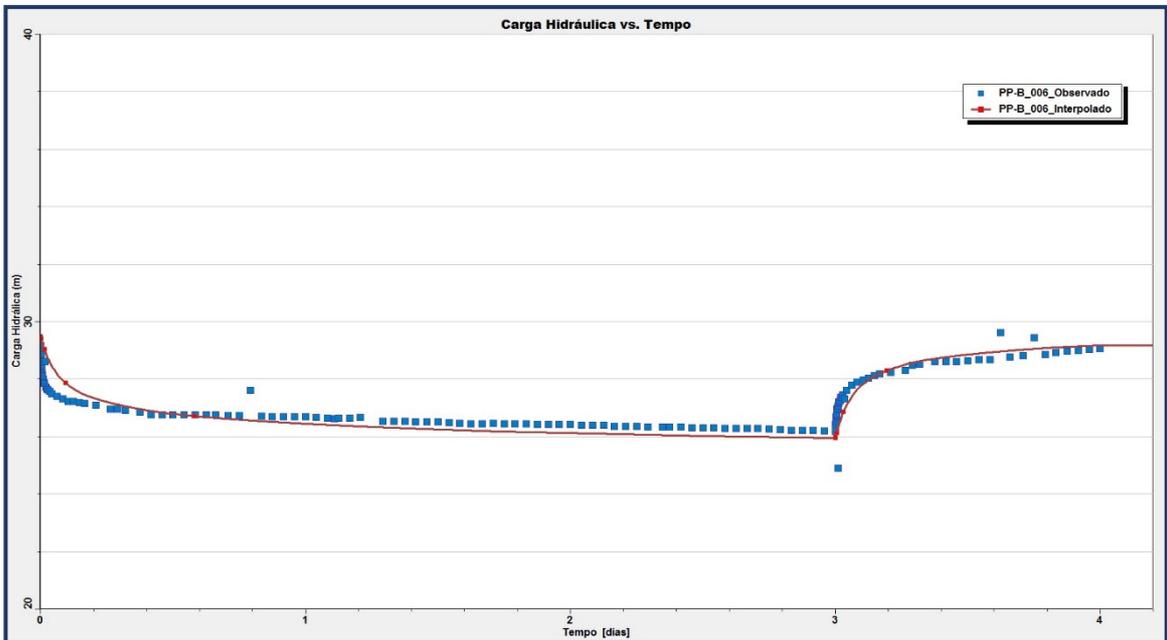


Figura 65 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/006 (elaborado pela autora).

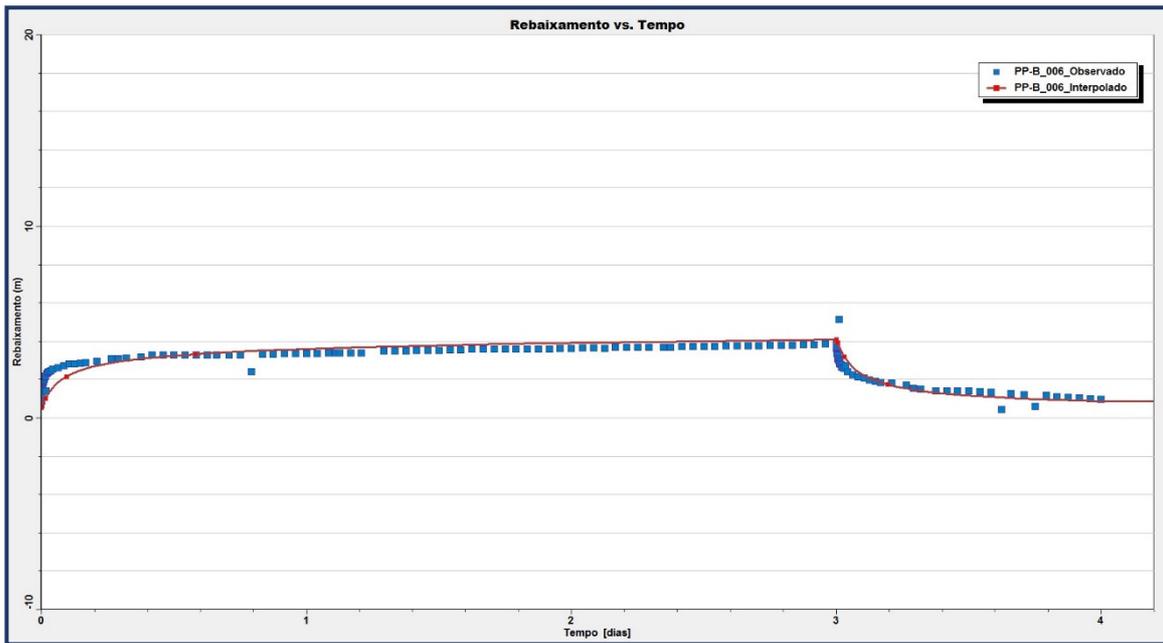


Figura 66 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/006 (elaborado pela autora).

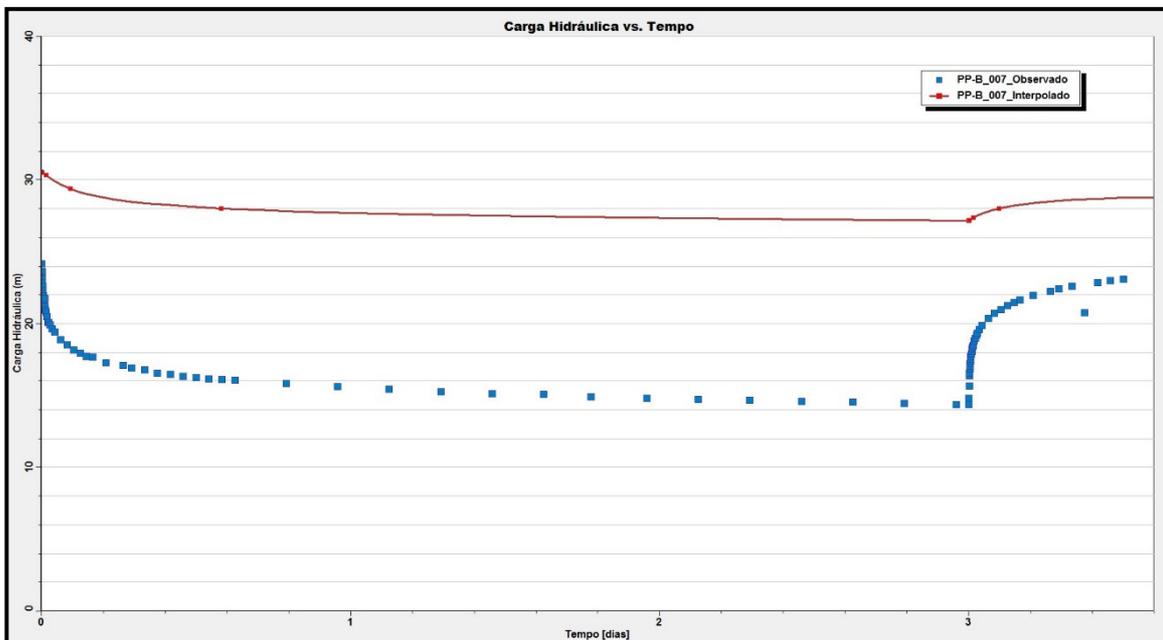


Figura 67 – Simulação em Regime Transiente _ Carga versus Tempo no PP-B/007 (elaborado pela autora).

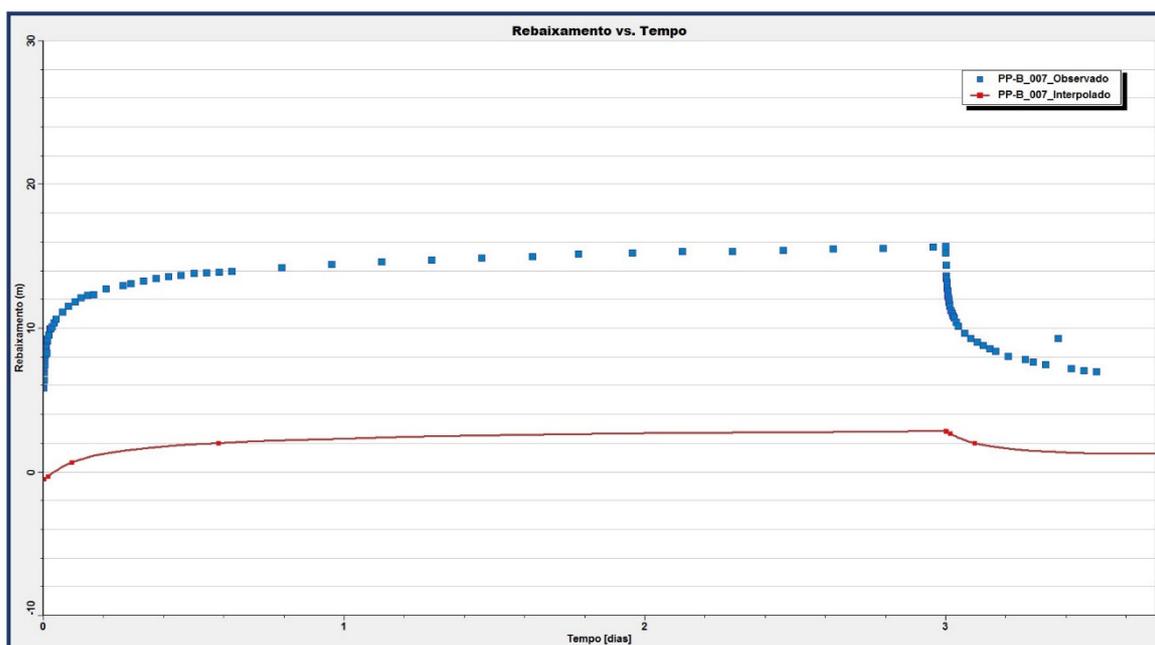


Figura 68 – Simulação em Regime Transiente _ Rebaixamento versus Tempo no PP-B/007 (elaborado pela autora).

Como esperado, com base nas figuras supracitadas, considerando a condição inicial de calibração do modelo em regime estacionário, as melhores simulações foram obtidas para os poços PP-B/003 e PP-/006. Para os poços PP-B/002 e PP-B/007 a diferença entre as curvas observadas (campo) versus interpolados (MNFR) foi de até 13 m.

De maneira geral, verificou-se que justamente os poços PP-B/003 e PP-/006, cujos resultados da calibração em regime estacionário foram bastante satisfatórios, representaram melhor a condição do ensaio de vazão realizada em campo, mostrando uma relação direta entre a calibração do modelo com os prognósticos simulados. Assim, o MNFR é uma excelente ferramenta para simulações de prognósticos operacionais para zonas de captura e rebaixamento de poços de produção, desde que as condições de calibração locais estejam adequadas e correspondentes às condições de campo.

Para os poços PP-B/002 e PP-B/007, provavelmente, incertezas associadas ao comportamento hidrodinâmico do aquífero, registros incorretos de dados de campo, ou dados de topografia inadequados, impediram um melhor ajuste entre os dados de campo e os dados simulados. Outros ajustes como análise de sensibilidade em relação ao grid, ou outras condições de contorno poderiam ser tentadas, entretanto tais alterações poderiam comprometer a calibração regional do MNFR, estando, portanto, fora do escopo deste trabalho.

5.1.5 Resultados Obtidos: Discussão do Estudo de Caso

O processo de autorização de perfuração e de liberação da outorga da bateria de poços da Empresa 1, liberado entre 2004 e 2005, não levou em consideração as recomendações da avaliação preliminar no MNFR em relação ao aumento do espaçamento na instalação dos poços, tendo sido pouco conservador nos volumes de outorga liberados, sem uma avaliação adequada das vazões ótimas de operação para condições de interferência entre poços.

Quanto à avaliação prévia da outorga, o processo metodológico de avaliação proposto nesse trabalho agrega, especialmente, a condição dos poços em relação ao zoneamento hídrico e potencialidade hídrica, fatores não considerados na época da avaliação preliminar de 2004/2005. Sendo assim, 02 dos poços avaliados previamente estariam localizados em uma zona próxima a zonas de riscos de contaminação (ZH-01), não sendo recomendada sua instalação. Um dos poços, o PP-B-016, situado na ZH-XII, estaria em condições adequadas de operação em relação ao zoneamento e potencialidade hídrica, e outros 08 poços estariam situados na zona ZH-VII, cujo volume anual de potencialidade hídrica ($1.436.025 \text{ m}^3/\text{ano}$) estaria abaixo do volume demandado pelos poços ($15.125.600 \text{ m}^3/\text{ano}$).

Apesar de os dados de monitoramento dos níveis d'água dos poços de observação não indicarem condição de rebaixamento ao longo do tempo de operação dos poços da ZH-VII, entre 2012 e 2015, utilizar volumes anuais acima das taxas de potencialidade hídricas calculadas para a zona, pode resultar numa condição de uso pouco sustentável do recurso, e em longo prazo, num processo de *déficit* hídrico localizado. Na ZH-VII condições de drenança vertical entre as porções freática e confinada do aquífero indicam tendência de fluxo descendente, sugerindo que os volumes de recarga relacionados à precipitação direta contribuem para a potencialidade hídrica do aquífero, localmente.

Portanto, do ponto de vista de gestão sustentável do recurso, reitera-se o argumento da utilização do critério da potencialidade hídrica na avaliação dos processos de outorga de água subterrânea para a região, ainda que exista o argumento técnico de que parte do volume explorado numa zona hídrica seja resultante das recargas induzidas de áreas externas. De fato, o balanço hídrico simulado no MNFR mostrou que a ZH-VII é abastecida, preponderantemente, pela zona hídrica ZH-XII. No entanto, a base da exploração de determinada zona hídrica deve ser baseada nos volumes disponíveis para àquela zona hídrica e não nas zonas vizinhas, de modo a evitar rebaixamentos regionais excessivos.

Como resultado da avaliação prévia, o parecer técnico seria não favorável à implantação do projeto, com recomendação de relocação dos poços para a ZH-XII, cuja potencialidade hídrica atenderia à demanda solicitada pela empresa.

Quanto à segunda etapa de avaliação da outorga, para sua análise neste trabalho, considerou-se o projeto como ele foi, de fato, aprovado na primeira etapa. Assim, os principais problemas detectados foram: a localização final de instalação dos poços (muito próximos entre eles) e a condução dos testes de bombeamento sem considerar as interferências entre poços, quando os mesmos de fato estavam muito próximos. As comparações entre as simulações preliminares no MNFR e as condições de rebaixamento observadas em campo divergiram consideravelmente por não levar em conta a interferência entre poços nos testes de vazão.

Ao final da análise, mais uma vez, a avaliação não seria favorável à liberação da outorga nas condições solicitadas, sendo recomendado estudo de vazões ótimas para adequação das capacidades específicas dos poços, bem como o planejamento em longo prazo da relocação dos poços, ou pelo menos parte deles, para ZH-XII, cuja potencialidade hídrica atenderia adequadamente a demanda requerida pela empresa. O estudo de vazões ótimas para adequação das capacidades específicas dos poços estaria condicionada à realização de ensaios de vazão que agregasse a condição de interferência entre poços, algo que não foi realizado após instalação dos poços de bombeamento.

Quanto ao processo de validação do MNFR aplicado ao estudo de caso, onde foram utilizados os testes de bombeamento realizados em campo como dados de calibração para simulação dos ensaios em regime transiente, verificou-se que a qualidade e precisão dos prognósticos realizados pelo MNFR dependem do refinamento das informações hidrogeológicas locais e da qualidade das calibrações conduzidas periodicamente no modelo. Dos 4 poços utilizados para calibração das simulações transientes dos ensaios de bombeamento, dois apresentaram resultados bastante satisfatórios, condizentes com os dados de campo, os outros 2, já não registravam condições adequadas de calibração na condição de contorno inicial, o que se propagou nas simulações em regime transiente.

Em conclusão, o item que prevê a comparação entre os dados de campo com os dados simulados preliminarmente no MNFR é imprescindível para determinar as premissas para a operação do poço ou bateria de poços, uma vez que novas condições de captura e rebaixamento podem ser obtidas conforme mudança de premissas de projeto, referentes à: localização de poços, profundidade e vazão requerida, entre outros.

6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A Gestão dos Recursos Hídricos Subterrâneos no Brasil ainda enfrenta desafios associados ao aparato legal, apesar do esforço das instituições federais e estaduais para direcionar as ações necessárias ao controle do direito de uso do recurso. Questões associadas à dominialidade das águas subterrâneas, atualmente pertencente ao âmbito estadual, e, a unidade de gestão considerada pela legislação, atualmente considerada a Bacia Hidrográfica e não necessariamente o domínio hidrogeológico, deve ser sucitada em discussões futuras.

O Distrito Federal, por exemplo, adota no Artigo 3º. da resolução da ADASA (2006) nº. 350, que a unidade básica para o gerenciamento dos recursos hídricos subterrâneos são os sistemas aquíferos. Do ponto de vista de gestão, considerando as particularidades hidrogeológicas dos domínios aquíferos é importante que a unidade de gestão das águas subterrâneas seja a bacia hidrográfica e o domínio hidrogeológico, sendo abordada de forma separada para depois então se pensar na integração. A integração entre as gestões poderia ocorrer em maior ou menor grau, conforme a importância da interrelação dos recursos para a bacia considerada. Por exemplo, os rios Joanes e Jacuípe estão hidraulicamente conectados ao sistema aquífero São Sebastião.

No Brasil não há metodologias consolidadas para avaliação de vazões outorgáveis para águas subterrâneas, no entanto, a experiência de gestão do Distrito Federal parece bastante assertiva em considerar prioritariamente critérios relacionados à disponibilidade hídrica, zoneando os domínios por critérios de favorabilidade hídrica e aplicação de outros critérios relacionados ao conhecimento hidrogeológico e hidráulica de poços para validação dos processos de outorga.

A experiência de gestão dos recursos hídricos no Complexo Industrial de Camaçari e entorno associa o conhecimento hidrogeológico através de estudos realizados e, ferramentas de zoneamento desenvolvidas e em constante atualização ao longo dos últimos 25 anos. Porém, a ausência de um aparato legal que subsidie os processos de outorga de águas subterrâneas na região do PIC e entorno, fragiliza o gerenciamento sustentável dos recursos subterrâneos e aumentam os riscos de problemas quanto à superexploração, rebaixamentos excessivos e poluição a níveis mais profundos.

O esforço de gestão compartilhada, promovido pelo COFIC, através do suporte técnico da empresa CETREL S.A., também necessita de ajustes. A utilização das ferramentas de zoneamento hídrico e simulações em modelos hidrogeológicos para avaliação de processos

de outorga de novos poços poderia ser aprimorada com a inserção dos critérios técnicos sugeridos e desenvolvidos neste trabalho, com a finalidade de uma gestão mais sustentável em longo prazo.

Dentro os critérios técnicos sugeridos e desenvolvidos neste trabalho e as ferramentas de análise desenvolvidas para os processos de outorga na área de entorno do Complexo Industrial de Camaçari, têm-se:

- ✓ Potencialidade hídrica total e efetiva; favorabilidade quanto à exploração; avaliação qualitativa dos parâmetros hidráulicos; vazão de base de drenagem superficial, vazão do poço obtida em ensaio de vazão; qualidade hidroquímica do poço.
- ✓ As ferramentas de análise para utilização dos critérios citados acima, foram: novo zoneamento hídrico, cálculo de reservas e potencialidades para a região e a classificação das zonas hídricas quanto à exploração.
 - O novo zoneamento hídrico aqui proposto objetiva integrar a gestão interna da água subterrânea do polo, limitada às áreas industriais (poligonal do polo) à circunvizinhança que vem crescendo e aumentando as demandas por águas subterrâneas, especialmente os municípios de Dias D'Ávila e Camaçari, cada vez mais próximas das atividades industriais do polo. Além disso, agrega o fator relacionado ao compartimento hidrogeológico, considerando as particularidades de cada bloco estrutural. O zoneamento proposto buscou ainda integrar os estudos de vulnerabilidade intrínseca realizados por Santos (2010) e o zoneamento das áreas de risco por contaminações associadas a atividades industriais.
 - A avaliação das reservas e potencialidades, por zona hídrica, por sua vez, pode ser considerada a ferramenta de análise mais importante proposta, cuja metodologia desenvolvida busca validar tecnicamente as vazões de segurança (vazões máximas explotáveis) que podem ser outorgadas para determinada zona. Para obtenção das potencialidades, buscou-se aprimorar os dados de recarga disponíveis para a região chegando a valores médios de recarga em 179 mm/ano, calculados através de novo balanço hídrico, com dados atualizados de pluviometria.

O cálculo das reservas permanente e reguladora baseou-se no conservadorismo de manutenção do sistema, levando em conta a espessura do aquífero que vêm sendo explorada na região (até 500 metros de profundidade), excluído-se o volume armazenado nas argilas, no entanto os

volumes calculados se aproximaram em termos de ordem de grandeza dos cálculos já realizados para a região com outras metodologias.

O cálculo das reservas exploráveis, utilizou como premissa o volume da reserva reguladora, mais uma parcela da reserva permanente equivalente a 30% do valor total em 50 anos (CETREL, 2012), considerando que não há indícios de superexploração do aquífero na região, na atualidade, e que a espessura estimada do aquífero São Sebastião é da faixa de 1.000 m (Petrobras), em uma área bastante superior à área de estudo. A determinação desse valor da reserva permanente no cálculo das vazões de segurança é algo que sucinta discussão no meio técnico, portanto, é recomendado que o trabalho desenvolvido seja atualizado em condições futuras, a medida que os parâmetros utilizados possam ser aprimorados.

Neste trabalho, o cálculo das potencialidades reais (Po efetiva) levou em consideração os volumes efetivamente explorados, contudo, do ponto de vista da gestão, o cálculo das potencialidades deveria considerar os volumes outorgados para os usuários, de maneira conservadora, inclusive buscando revisar outorgas já concedidas, na tentativa de reduzir os volumes outorgados, sempre que possível, de modo a aumentar a oferta de água para a região.

- Quanto a classificação das zonas hídricas, foram obtidas 13 zonas. Quanto a favorabilidade de exploração foram: não favoráveis (ZH-I e ZH-VII); pouco favoráveis (ZH-II, ZH-III, ZH-IV, ZH-V, ZH-VI); favoráveis (ZH-VIII, ZH-X, ZH-XI); muito favoráveis (ZH-IX, ZH-XII, ZH-XIII). A zona hídrica ZH-I foi classificada como não favorável a exploração de recursos hídricos subterrâneos, especialmente em função do risco de contaminação por atividades industriais, além disso, no passado a porção central já apresentou problemas relacionados à superexploração, provocando o rebaixamento do aquífero regionalmente. Nessa área atualmente ainda operam 24 poços e recomenda-se que no processo de renovação de outorga, os poços sejam reavaliados, considerando os critérios locais de risco por contaminação.

Em relação às demais zonas, a mais crítica em relação a gestão dos recursos é a zona hídrica ZH-VII, onde a potencialidade efetiva calculada (12.761.479 m³/ano) é inferior à disponibilidade demandada (21.531.554 m³/ano), e inferior ao volume outorgado (20.600.600 m³/ano). Nesse caso,

a sustentabilidade dos recursos em curto prazo pode estar comprometida, já que essa zona já apresentou indícios de superexploração no início da última década.

- ✓ A metodologia proposta para avaliação dos pleitos de outorga considera duas etapas, sendo a primeira uma avaliação prévia, antes da instalação dos poços, onde devem ser avaliados: localização proposta, demandas e disponibilidade hídrica, favorabilidade quanto à exploração, possíveis interações com as águas superficiais, restrições em relação a riscos ambientais; além de ser feita a simulação de captura e rebaixamento utilizando o MNFR. Na segunda etapa, após instalação do poço, as condições de localização e estudo de vazões ótimas operacionais são avaliadas para determinação das vazões efetivamente outorgáveis.
- ✓ No estudo de caso da empresa 1 foi avaliado o processo de outorga de uma bateria de poços realizado entre 2004 e 2005, todos instalados na proposta zona hídrica ZH-VII. Para esse caso, observou-se que apesar de os dados de monitoramento em poços não indicarem rebaixamento progressivo do aquífero, a depleção das taxas de descarga pode vir a ocorrer em longo prazo, visto que se explora mais que a potencialidade hídrica estimada para a zona.
- ✓ Devido à alta transmissividade do aquífero e considerando os resultados do balanço hídrico simulado no MNFR, as taxas de bombeamento da bateria de poços da empresa 1 são alimentadas por recargas provindas de outras zonas, em especial a ZH-XII, no entanto, as relações de drenança vertical entre os aquíferos freático e confinado indicam tendência de fluxo descendente, podendo-se inferir que o aquífero confinado também recebe contribuição de recarga da porção freática do aquífero, que por sua vez recebe contribuição de recarga por precipitação direta.
- ✓ A avaliação do processo de outorga no estudo de caso da empresa 1 expôs as dificuldades da gestão interna com a gestão do órgão ambiental e a problemática da ausência de uma instrução normativa que orientasse o processo de avaliação e validação das outorgas.
- ✓ Para o estudo de caso a aplicação do primeiro critério de avaliação de outorga, pelo zoneamento e potencialidade hídrica já invalidaria a liberação de outorgas nos volumes solicitados, sendo recomendada a revisão do projeto e relocação dos poços para a ZH-XII. Verificou-se vulnerabilidades no processo de gestão, onde a

avaliação das outorgas levou em consideração apenas os resultados dos testes de bombeamento, liberando como vazões outorgáveis as vazões nominais obtidas nos ensaios de bombeamento. A questão técnica de interferência entre as capturas dos poços foi ignorada, e o processo foi conduzido de forma burocrática sem uma avaliação técnica mais assertiva sobre as reais vazões operacionais locais.

- ✓ Como resultado, as vazões operacionais precisaram ser ajustadas na época de operação dos poços, em 2009, impactando no processo econômico da empresa, cuja demanda de ampliação em 2004 era de 50.400 m³/d, atualmente operando na faixa de 42.744 m³/d.
- ✓ Caso as avaliações recomendadas na etapa 2 do processo de outorga fossem conduzidas para a empresa 1, o processo de gestão poderia ser mais assertivo em se obter vazões ótimas de bombeamento, e seria conduzido um plano de ação para relocação desses poços, ou parte deles, para uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos, sem o comprometimento das potencialidades hídricas calculadas para a ZH-VII.
- ✓ Sobre a validação do MNFR, utilizado como ferramenta nas avaliações prévias das outorgas para simulação de zonas de captura e rebaixamento do aquífero, verificou-se que os principais fatores que interferem nesses prognósticos são as condições de hidrogeologia local simuladas. As condutividades hidráulicas das camadas produtoras dentro do modelo devem estar as mais próximas quanto possível da condição real de campo, caso contrário, ajustes deverão ser conduzidos nas simulações preliminares, sempre que houver dados hidráulicos (K, S) mais atuais disponíveis.
- ✓ Modificações nas condições de projeto simuladas como: localização dos poços, profundidades, posicionamento das seções filtrantes nas camadas dos MNFR, etc., interferem significativamente nos resultados. Nesse caso, novas simulações, considerando dados reais de campo devem ser conduzidas para obtenção de novas zonas de captura e condições de rebaixamento.
- ✓ No estudo de caso foram utilizados os testes de bombeamento conduzidos nos poços como dados de calibração das simulações dessas vazões dentro do MNFR, sendo necessários ajustes em termos de parâmetros hidráulicos (K e S) e os resultados se mostraram bastante satisfatórios, desde que o modelo estivesse devidamente calibrado em condição inicial estacionária. Para o estudo de caso,

foram utilizados 4 poços para as simulações dos ensaios de bombeamento, entretanto dados de calibração obtiveram melhor ajuste para apenas dois poços.

- ✓ O MNFR é uma poderosa ferramenta que pode ser utilizada no processo de gestão dos recursos hídricos da região de Camaçari e entorno, desde que se mantenha em constante atualização e calibração, agregando novos dados de poços, especialmente em áreas com pouca informação hidrogeológica.
- ✓ Finalmente, os critérios e ferramentas de análise desenvolvidas neste trabalho (zoneamento hídrico, potencialidades, classificação de zonas hídricas), juntamente com o MNFR existente, constituem-se um processo metodológico de avaliação das outorgas, permitindo a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneas na região do Polo Industrial de Camaçari e entorno.

7 RECOMENDAÇÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Como recomendação de trabalhos futuros, são sugeridos:

- ✓ A criação de uma instrução normativa pelo órgão ambiental poderia melhor direcionar os processos de outorga na região, e o trabalho aqui desenvolvido, serve para subsidiar esse documento.
- ✓ Estudos para viabilização de banco de dados integrado com informações dos poços geridos / instalados pelos principais usuários na região (EMBASA, CERB, DNPM e CETREL), onde poderiam ser consultadas características hidráulicas, geológicas e de risco para determinação de vazões de segurança e distância mínima entre poços, por exemplo.
- ✓ Ampliar estudos de vulnerabilidade do aquífero, incluindo toda a área de abrangência do Modelo Numérico de Fluxo Regional, buscando refinar o zoneamento hídrico.
- ✓ Ampliar estudos hidrogeológicos que busquem mapear zonas de falhamentos, melhorando detalhamento dos blocos estruturais, com o objetivo de definir os compartimentos hidrogeológicos que podem ser explorados na região e as eventuais zonas de drenança.

8 REFERÊNCIAS

ADASA. Agência Reguladora de Águas e Saneamento do Distrito Federal. Resolução / Adasa n. 350, de 23 de junho de 2006. Estabelece os procedimentos gerais para requerimento e obtenção de outorga do direito de uso dos recursos hídricos em corpos de água de domínio do Distrito Federal e em corpos de água delegados pela União e Estados. **Diário Oficial do Distrito Federal – DODF de 10 de julho de 2006.**

ANDERSON, M. P.; WOESSNER, W. W.; HUNT, R. J. **Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport.** Second Edition. Elsevier. 535 p. 2015.

BAHIA (Estado). Secretaria da Indústria, Comércio e Mineração do Estado da Bahia – SICM. **Plano Diretor do Polo Industrial de Camaçari.** Governo do Estado da Bahia. Salvador. Bahia. 2013.

BAHIA (Estado). Secretaria de Recursos Hídricos Saneamento e Habitação. **Plano Diretor de Recursos Hídricos: Bacias Hidrográficas do Recôncavo Norte e Inhambupe – Documento Síntese.** Governo do Estado da Bahia. Salvador. Bahia. Novembro de 1996.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Cadernos de Recursos Hídricos.** Disponibilidades e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Brasília, 2005.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Cadernos de Recursos Hídricos nº. 4.** Superintendência de Outorga e Fiscalização. Brasília, 2007.

BRASIL. **Código de Águas (1934).** Código de Águas e legislação correlata. – Brasília : Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2003. 234 p. – (Coleção ambiental ; v. 1).

BRASIL. **Lei No. 9.433 de 08 de Janeiro de 1997.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm>. Acesso em: junho de 2015.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº. 16, de 8 de maio de 2001:** Estabelece critérios gerais para a outorga de direito de uso dos recursos hídricos.

BRASIL. **Resolução n. 16 de 08 de maio de 2001.** Publicada no D.O.U. de 14 de maio de 2001.

BEISL, C. H. **Integração de Dados de Sensoriamento Remoto, Geologia, Gravimetria e Topografia para o Estudo do Arcabouço-Estrutural em uma parte do Compartimento nordeste da Bacia do Recôncavo.** Dissertação de Mestrado. São José dos Campos: INPE. 116 p. 1996.

CAMPOS, J. E. G.; CORREA, P. M. **Crítérios para Determinação de Vazões Outorgáveis em Mananciais Subterrâneos: Aplicação no Distrito Federal.** São Paulo, UNESP, Geociencias, v. 32, n.1, p. 23-32, 2013.

CASTRO, C. N. **Gestão das Águas: Experiências Internacional e Brasileira.** Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA. 86 p. Brasília, junho de 2012.

CBPM. Companhia Baiana de Pesquisa Mineral. **Depósitos de Argila do Recôncavo Baiano**: geologia e potencialidade econômica. Valter Mônico Conceição Filho; Marcos Donadello Moreira. Série Arquivos Abertos Volume 15, 2001.

CETREL. **Consolidação dos Dados do PGRH na Região de Influência do Complexo Industrial de Camaçari: Período de 2011-2012**. Relatório Interno CET-CFC-02-294-13-0, 2013.

CETREL. **Gestão Integrada e Zoneamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos do Complexo Industrial de Camaçari**. Relatório Interno CET-CFC-03-281-15-0, 2015.

CETREL. **Plano de Gestão Integrada e Zoneamento dos Recursos Hídricos no Polo Industrial de Camaçari**. Relatório Interno, 2012.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1989.

COSTA, M. L. M. **Estabelecimento de Critérios de Outorga dos Direitos de Uso das Águas Subterrâneas**. Dissertação de Mestrado. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, 2009.

COSTA, W. D. Avaliação de Reservas, Potencialidades e Disponibilidades de Aquíferos. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 10. **Anais...** São Paulo, 1998.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Hidrogeologia**: arquivos digitais. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: [03?] de maio de 2016. Escala Indeterminável. 2008. GEOBANK: hidro_lito.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Mapa Geológico do Estado da Bahia**: arquivo digital. Disponível em: <<http://geobank.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 03 de maio de 2016. Escala 1:1.000.000. 1990. GEOBANK: gdba_lito.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Hidrogeologia**: Conceitos e Aplicações. 2ª. Ed.: FEITOSA, Fernando (Coord.) A. C. Manoel Filho, João. Universidade Federal de Pernambuco. Recife: Laboratório de Hidrogeologia, 2000.

DINIZ, H. N. Interferência entre Poços Tubulares Profundos na Bacia do Rio Una, Município de Taubaté. In: XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2008, Natal / RN. Resumos: **Revista Águas Subterrâneas**. ISSN 2179-9784 (eletrônico), São Paulo 2008.

FETTER, C. W. **Applied Hydrogeology**. Third Edition. University of Wisconsin – Oshkosh. ISBN 0-02-336490-4. Prentice Hall. 691 p. 1994.

GUIGUER, N; FRANZ, T. **Visual MODFLOW** – Version 2.8 Waterloo Hydrogeologic Inc. 1999.

IBGE – EMBRAPA. **Mapa de Solos do Brasil**. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/mapa_solos.php>.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa**: arquivo digital. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>>. Acesso em: 04 de agosto de 2017.

KONIKOW, L. F.; HORNBERGER, G.Z.; HALFORD, K. J.; HANSON, R. T. **Revised Multi-Node Well (MNW2) Package for MODFLOW ground-Water Flow Model**: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A30. 67 p. 2009.

LIMA, O. A. L. **Avaliação Hidrogeofísica de Arenitos Aquíferos na Bacia Recôncavo-Tucano (BA)**. In: Anais...Congr. Internat. Soc. Bras. Geof., vol. 1, pp. 1016–1022, Salvador: SBGF, 1991.

LIMA, O. A. L. **Caracterização Hidráulica e Padrões de Poluição no Aquífero Recôncavo na Região de Camaçari – Dias D’Ávila**. Maio de 1999. 123 f. Tese (Submetida para Concurso Público de Professor Titular) – Departamento de Geologia e Geofísica Aplicada do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 1999.

MAGNAVITA, L. P. **Bacias do Recôncavo e Tucano**. Capítulo VII. P. 152-158, In: Mapa Geológico do Estado da Bahia: Texto Explicativo. BARBOSA, J. S. F.(Coord.); DOMINGUEZ, J. M. L.Salvador: CPRM, 1996.

MAIA NOBRE ENGENHARIA. **Estudo Litoestratigráfico da Área do Complexo Petroquímico de Camaçari**. Camaçari: CETREL S.A. (relatório interno), 1996.

MAIA, P. H. P.; RODRIGUES, Z. R. C. **Estratégias para Gestão das Águas Subterrâneas do Aquífero Urucuia da Região Oeste do Estado da Bahia**. Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 17. Outubro, 2012.

MATOS, J. C. **Suporte Metodológico para Avaliação de Pleitos de Outorga dos Recursos Hídricos** – Aplicação para o Caso da Bacia Hidrográfica do Rio Jacuípe no Estado da Bahia. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos Publicação MTARH.DM-065/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília: UnB, 2004.

McDONALD, M. G. & HARBAUGH, A.W. **A modular threedimensional finite-difference groundwater flow model**. Techniques of Water Resources Investing of the U.S. Geological Survey Water Supply, Paper 494:71. Chapter A1, 1988.

MMA – Ministério do Meio Ambiente/SRHU – Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. (2008). **Programa – Programa Nacional de Águas Subterrâneas,8** – Versão Preliminar. Plano Nacional de Recursos Hídricos. Componente de Programas Regionais de Recursos Hídricos. Brasília, 2008.

MELLO, R. M.; CASTRO, C. M. S. N. **Exploração de água subterrânea no Distrito Federal: Gestão por Sistema Hidrogeológico**. XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011.

NOBRE, R. C. M. **Avaliação de Risco para o Uso de Proteção de Aquíferos**. Estudo de Caso: Região Metropolitana de Maceió-AL. Tese – Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

PRATES, I.; FERNANDEZ, R. **Bacia do Recôncavo**: Sumário Geológico e Setores em Oferta. Superintendência de Definição de Blocos. ANP, 2015.

- RIBEIRO, M. M. R.; LANNA, A. E. **Instrumentos regulatórios e econômicos: aplicabilidade à gestão das águas e à Bacia do rio Pirapama-PE.** Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 6, n. 4, p. 41-70, 2001.
- SANJAYA RAJ JOSHI, B. E. **Comparison of Groundwater rights in the United States: Lessons for Texas.** Texas Tech University. Dissertação de Mestrado. 132 p. Agosto, 2005.
- SANTOS, C. F.; CUPERTINO, J.A.; BRAGA J.A.E. **Origem e Evolução de Bacias Sedimentares:** Síntese sobre a Geologia das Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Coordenadores: Guilherme Pederneiras Raja Gabaglia e Edison José Milani. Rio de Janeiro: Gávea: R. Redish Prog. Visual Prod. Gráfica e Editoração: PETROBRAS, 1990.
- SANTOS, P.R. P. **Estudo da Vulnerabilidade à Poluição do Aquífero Marizal na Região de Influência do Polo Industrial de Camaçari (PIC) – BA.** Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo – MEPLIM. Departamento de Engenharia Ambiental. Salvador: Universidade Federal da Bahia, 2010.
- SCANLON, B.R.; HEALY, R. W.; COOK, P.G. **Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge.** Hydrogeology Journal (2002) 10:18–39. DOI 10.1007/s10040-0010176-2. 2002.
- SILVA, A. J. P.; LOPES, R. C.; VASCONCELOS, A.; BAHIA, R. B. C. **Bacias Sedimentares Paleozóicas e Meso-Cenozóicas Interiores.** Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. Capítulo II, p 76. Organizado por L. A. Bizzi, C. Schobbenhaus, R. M. Vidotti e J. H. Gonçalves (eds.). Brasília: CPRM, 2003.
- SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. **Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens.** In: Machado, C. J. S. (Org.). Gestão de águas doces. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. Cap. 5, p.135-178.
- SILVA, M. M. A. O.; HOLZ, J.; FAIÃO, D.; FREIRE, C. C. **A outorga de direito de uso da água subterrânea nos estados brasileiros.** Revista Águas Subterrâneas – ABAS, São Paulo. V. 30, no. 2. eISSN 2179-9784 (eletrônico). 2008. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/download/23298/15391>>. Acesso em: julho de 2016.
- SCHULUMBERGER, Water Services; RÖHRICH, T. **AquiferTest v. 4.2. User's Manual: Advanced Pumping Test & Slug Test Analysis Software,** 2008.
- STUDART, T. M., C.; VIEIRA, V. P. P, B. **A gestão da água subterrânea no Ceará.** Universidade Federal do Ceará – UFC. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental- DEHA. Disponível em: <http://www.deha.ufc.br/ticiana/Arquivos/curso_maranhao/artigos%20gestao_ticiana/A_Gestao_da_agua_Subterranea_no_Ceara.pdf>. Acesso em: julho de 2016.
- TUCCI, C.E.M.; MENDES, C.A. **Avaliação ambiental integrada da Bacia Hidrográfica.** Brasília: MMA/SQA.2006.300 p.
- TUCCI, C.E.M.; MENDES, C. A. **Hidrologia: Ciência e Aplicação.** In: TUCCI, Carlos.E.M(Org.). Porto Alegre: UFRGS, 2001. cap. 5;7;11 e 14.

TUCCI, C. E, M. para RHAMA Consultoria Ambiental Ltda. **Gestão de Recursos Hídricos Superficiais no Polo Industrial de Camaçari**. Março, 2009.

VILAS BOAS, G. S. **Descrição Sumariada das unidades litológicas do Mapa Geológico da Bahia**. Segunda Parte. P. 268-270. In: Mapa Geológico do Estado da Bahia: Texto Explicativo. Coordenação: BARBOSA, J. S. F.; DOMINGUEZ, J. M. L. CPRM. Salvador, 1996.

WATERLOO BRASIL; CETREL SA. **Zoneamento dos Recursos Hídricos Subterrâneos na Região do Polo Petroquímico de Camaçari/BA**. Relatório interno. Camaçari: Cetrel, 2003.