JONATHAN CARVALHAES BATISTA

Superexploração de águas subterrâneas, o caso de Recife

Tese apresentada ao Instituto de
Geociências da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências

Área de concentração: Hidrogeologia
e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Ricardo César
Aoki Hirata

SÃO PAULO

2015

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Carvalhaes Batista, Jonathan

Existe superexploração nos aquíferos de Recife (PE)? / Jonathan Carvalhaes Batista. - São Paulo, 2015

110 p.: il + mapas

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Hirata, Ricardo César Aoki

1. Recife: Águas subterrâneas 2. Superexploração 3. Gestão de aquíferos 4. Aquífero Cabo I. Título

Há somente dois erros que se cometer ao longo do
caminho para a verdade: não ir até ao fim, e não partir.

Buddha

Dedicatória

Dedico esse trabalho à minha mãe Ana, pelo apoio incondicional, amor, carinho e pelo exemplo de força e determinação. Ao meu padrasto Nilton, que me escolheu como filho. Ao meu irmão Nilton César por todos esses anos ao meu lado, por seu amor e carinho. À minha esposa Marina, por seu amor, apoio, entendimento, diálogo e por me trazer de volta ao chão de vez em quando. À minha filha Ísis, que já é muito amada e motivo de muita alegria. Dedico à Neide, Jackson, Livia e Felipe, por me acolherem em sua família. Por fim, dedico esse trabalho a todos os seres, que esse trabalho contribua para semear lucidez no mundo.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço ao Professor Ricardo Hirata, que me aceitou como seu aluno, me conduzindo ao longo desses anos, me fazendo amadurecer enquanto pesquisador e pessoa. Meus sinceros agradecimentos pela amizade, conversas, conhecimentos e paciência.

Ao meu amigo Guillaume Bertrand, que desenvolveu seu pós-doc no projeto, sempre me ajudando com conversas, dicas, referências, puxões de orelha. Sem você esse projeto não seria o mesmo. Agradeço também aos professores Veridiana Martins e Reginaldo Bertolo pelas contribuições, pela atenção, conhecimentos compartilhados. À Profa. Alexandra Suhogusoff e Profa. Christine Bourotte pelas valiosas contribuições no meu exame de qualificação.

Agradeço à equipe do projeto COQUEIRAL, em especial à Emmanuelle Petelet do Serviço Geológico da França e Profa Suzana Montenegro da Universidade Federal de Pernambuco.

Agradeço aos amigos do Laboratório de Modelos Físicos (LAMO) que sempre estiveram por perto para conselhos, ajudas e até festas; são eles: Rafael Terada, Paulo Galvão, Jorge Peñaranda, Sandra Procell, Bruno Pirilo, Jeane Glaucia, Marcos Ucci, Marcos Barbosa, Lucas Andreatta, Mariana Bernardino, Osvaldo Ally e todos os outros que participaram direta ou indiretamente nesse trabalho. Aos professores e funcionários do IGC, os quais fazem desse instituto um local

Agradeço profundamente àqueles que iniciaram minha jornada como pesquisador, a eles devo muito do que sei. Em especial agradeço ao Prof. Osvaldo Antônio Serra, do Laboratório de Terras Raras, foi ele quem primeiro me orientou, me ensinando os primeiros passos no mundo científico. Ainda no LTR, preciso agradecer ao PC (Paulo César), o melhor químico que eu tive a oportunidade de conhecer, foi ele quem se dedicou dia após dia a me ensinar desde como pesquisar um artigo até sintetizar moléculas quase impossíveis. Ainda na USP Ribeirão, devo agradecer aos meus amigos Diego, Gabriel, Chucrute (Evandro), Xicó (Flávio), Skywalker (Lucas), Cláudio Neri, Ana Cecília, Juju (Juliana).

À todos aqueles que foram importantes na minha formação como pessoa: tia Luzia e tio Manoel, Simone, Sirley, Toninho, Glória, Corina (in memoriam), Irmã Isabel, Carlos, Érica, tia Joana, tio Manoel.

Agradeço àqueles que por algum descuido não foram mencionados aqui, mas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento dessa pesquisa.

Por fim agradeço à FAPESP pela bolsa concedida (Processo 2012/12506-3) e pelo financiamento ao Projeto COQUEIRAL (Processo 2011/50553-0), sem seu apoio nada disso teria acontecido.

RESUMO

BATISTA, J. C.; **Existe superexploração nos aquíferos de Recife (PE)?** 2015. 110 f. Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.

Superexploração de águas subterrâneas é um termo que vem sendo utilizado irrestritamente na literatura científica e na mídia. Entretanto não existe definição técnica do termo, sendo utilizado quando os efeitos negativos da exploração dos aquíferos são percebidos. Apesar da indefinição técnica, o termo superexploração traz consigo um alerta à sociedade, colocando a exploração do aquífero em evidência. Logo seu uso pode ser justificado desde que essas limitações sejam reconhecidas. Ante uma análise criteriosa dos efeitos do bombeamento de poços é possível delinear seis aspectos de superexploração de aquíferos: (1) hidráulico, relacionado à exaustão física do aquífero; (2) qualidade de água, queda na qualidade da água a níveis inaceitáveis; (3) econômico, caracterizado pelo aumento exacerbado nos custos de bombeamento; (4) ecológico, relacionado à diminuição da vazão de rios e outros corpos d'água e extinção da flora e fauna dependentes do aquífero; (5) geotécnico, identificado como a perda da estabilidade de terrenos devido à retirada de água do aquífero; e (6) ético e social, relacionado à distribuição desigual dos recursos hídricos. Nesse cenário, Recife é um exemplo típico de cidade abastecida parcialmente com águas subterrâneas, em Recife houve uma expansão muito rápida da rede de poços, bombeamento desordenado, queda acentuada nos níveis d'água e depreciação da qualidade da água. Dessa forma nos últimos anos os trabalhos desenvolvidos na área caracterizaram o regime de exploração dos aquíferos como superexploração. Esse trabalho analisou o regime de exploração do Sistema Aquífero Cabo, em Recife, frente aos seis aspectos de superexploração. Para tanto foram utilizados dados históricos de análises químicas e medições de nível obtidos por projetos anteriores, ademais foram realizadas duas campanhas de amostragem de água e uma campanha para geofísica da área. Com esses métodos não foi possível caracterizar a superexploração do Aquífero Cabo, entretanto foi identificada uma área onde pode estar ocorrendo depreciação da qualidade da água, todavia essa queda na qualidade não está relacionada ao bombeamento. No aspecto econômico foi caracteriza um expressivo custo extra

devido à queda dos níveis d'água, entretanto a exploração do aquífero ainda é muito vantajosa frente ao abastecimento público. No aspecto ético foi demonstrado que os usuários do Aquífero Cabo têm poder aquisitivo maior, não havendo impedimentos de acesso ao aquífero. Como estratégia foi proposta a outorga mediante monitoramento do poço, sendo os dados utilizados para alimentar um modelo de fluxo da região. Dessa forma esse modelo seria cada vez mais representativo, podendo ser utilizado como ferramenta de gestão e para prever cenários futuros.

Palavras-chave: Superexploração, Recife, Gestão Aquíferos, Águas Subterrâneas, Aquífero Cabo.

ABSTRACT

BATISTA, J. C.; **There is overexploitation in Recife (PE)?** 2015. 110 f.
Dissertação de Mestrado – Instituto de Geociências – Universidade de São Paulo.

Groundwater overexploitation are been used in scientific literature and media in an unrestrained way. Nevertheless there are no technical definition of this term, usually this expression are used when the negative aspects of groundwater exploitation are perceived by stakeholders. Despite his technical indetermination the term puts groundwater exploitation in evidence, creating more awareness for the situation. Then the usage can be justified since those limitations are taken into account. Before careful analysis of pumping effects is possible to outline six aspects of overexploitation: (1) hydraulic, related to aquifer exhaustion; (2) water quality, decline of water quality to unacceptable levels; (3) economic, increase of pumping costs to an level in which others sources of water are more suitable; (4) ecologic, related to loss of base flow in rivers and others superficial water bodies and extinction of aquifer dependent flora and fauna; (5) loss of land stability due to water withdrawal; (6) ethic and social, related to unequal distribution of water resources. In this scenario, Recife is a typical example of partial groundwater supplied city, in Recife there was a very fast increase of wells, uncontrolled pumping, marked water level drawdown and decrease of water quality in some spots. Therefore in the last years all studies in characterized the area as overexploited. This study analyzed the exploitation regime in Cabo Aquifer, in Recife, in face of the previous cited six aspects os overexploitation. For this purpose, were historical chemical analysis and water level logging were used, furthermore two sampling campaigns and one geophysical campaign were done. With these methods were not possible to characterize an overploitation scenario. However, were possible to delineate and area in which groundwater depreciation might be happening, nonetheless this depreciation are not related to groundwater pumping. Concerning the economic aspect the extra costs due to drawdown was estimated, notwithstanding, even with extra costs, groundwater exploitation where much more advantageous than water from public supply. Regarding the ethical aspect were shown that Cabo Aquifer users has high economic power, therefore any of those users are

hindered to aquifer access. As management strategy was purposed that groundwater permission would be only gave to users who are involved in well monitoring programs, such monitoring data would be used to feed an flux model. In this way, this model could be an managing tool and also foresee future scenarios.

Keywords: Overexploitation, Aquifer Management, Groundwater, Cabo Aquifer, Recife.

SUMÁRIO

1 – Introdução	18
1.1 – Contextualização da pesquisa	19
2 – Objetivos	20
3 – Superexploração	20
3.1 – De onde vem a água?	22
3.2 – Superexploração e sustentabilidade`	25
3.3 – O rendimento sustentável	26
3.4 – Formas de superexploração	27
3.4.1 – Aspecto hidráulico	29
3.4.2 – Aspecto de qualidade da água	30
3.4.3 – Aspecto econômico	31
3.4.4 – Aspecto ecológico	34
3.4.5 – Aspecto geotécnico	37
3.4.6 – Aspecto ético e social	38
3.5 – Mineração de água	39
3.6. Superexploração: Estratégias e critérios	40
4 – Área de estudo	42
4.1 – Geologia da área	46
4.2 – Contexto hidrogeológico	49
4.2.1 –Sistema Aquífero Cabo	49
4.2.2 – Aquífero Beberibe	50
4.2.3 – Aquífero Boa Viagem	51

4.2.4 – Aquífero Fissural	52
4.2.5 – Aquífero Barreiras	52
4.3 – Delimitação da área de pesquisa	55
4.4 – Modelo hidrogeológico da área de pesquisa	56
5 – Metodologia	58
5.1 – Dados históricos	58
5.2 – Campanhas de amostragem	59
6 – Superexploração em Recife	68
6.1 – Caracterização do bombeamento e fluxos de água em Recife	68
6.2 – Superexploração em Recife: Aspecto Hidráulico	82
6.3 – Superexploração em Recife: Aspecto de Qualidade da Água	83
6.4 – Superexploração em Recife: Aspecto Econômico	92
6.5 – Superexploração em Recife: Aspecto Ecológico	97
6.6 – Superexploração em Recife: Aspecto Geotécnico	98
6.7 – Superexploração em Recife: Aspecto Ético e Social	98
6.8 – Afinal, existe superexploração em Recife?	101
7 – Conclusão	102
8 – Referências	104

Lista de figuras

Figura 3.1 – Evolução do aquífero com o bombeamento	23
Figura 3.2 – Diagrama esquemático do aspecto hidráulico da superexploração	30
Figura 3.3 – Curva de comportamento teórica de uma bomba submersa em relação à altura manométrica e vazão de exploração	32
Figura 3.4 – Gráficos esquemáticos de corrente elétrica vs tempo	34
Figura 3.5 – Processo de drenagem de um rio devido ao bombeamento	36
Figura 4.1 – Localização de Recife e seus bairros.	44
Figura 4.2 – Coluna estratigráfica da área de estudo.	47
Figura 4.3 – Perfil estrutural das Bacias Cabo e Pernambuco-Paraíba.	48
Figura 4.4 – Delimitação da área de pesquisa desse estudo.	55
Figura 4.5 – Modelo hidrogeológico esquemático da área de pesquisa.	56
Figura 4.6 – Modelo hidrogeológico do Sistema Aquífero Cabo com fluxos naturais.	58
Figura 5.1 – Localização dos pontos de amostragem nas três campanhas do Projeto COQUEIRAL.	67
Figura 6.1 – Distribuição de poços do aquífero na cidade de Recife de acordo com a base de dados COQUEIRAL.	68
Figura 6.2 – Número de poços por 0,25 km ² na cidade de Recife.	69
Figura 6.3 – Evolução do número de poços em Recife.	71
Figura 6.4 – Mapa de medianas de vazões.	73
Figura 6.5 – Vazão total por quadrícula de 500 m por 500 m.	74
Figura 6.6 – Mapas potenciométricos históricos do Aquífero Cabo (Recife).	76
Figura 6.7 – Mapa potenciométrico histórico <i>versus</i> densidade de poços por década.	78
Figura 6.8 – Medidas de fluxo vertical em Recife (maio de 2014).	79

Figura 6.9 – Perfil de salinidade do Rio Capibaribe, outubro de 2013.	80
Figura 6.10 – Mapa das unidades de paisagem em Recife.	81
Figura 6.11 – Série histórica da década de 70 a 2000 das medidas de condutividade elétrica no Sistema Cabo.	84
Figura 6.12 – Mediana das condutividades elétricas no Sistema Cabo.	85
Figura 6.13 – Evolução das medidas de condutividade elétrica por quadrículas.	87
Figura 6.14 – Pontos de amostragem dos poços, projeto COQUEIRAL.	88
Figura 6.15 – Diagrama de Piper para as amostras do Sistema Aquífero Cabo e os poços com excesso de Cl e Na.	89
Figura 6.16. – Condutividade elétrica vs pontos de alta salinidade no Sistema.	90
Figura 6.17 – Pontos de alta salinidade do Sistema Cabo vs mapa potenciométrico dos anos 2000.	91
Figura 6.18 – Quedas manométricas no Sistema Aquífero Cabo.	92
Figura 6.19 – Perfil dos bairros de Recife.	100
Figura 6.20 – Renda média vs potencimetria em Recife.	101

Lista de tabelas

Tabela 3.1 – Formas de superexploração.	28
Tabela 4.1 – Resumo de dados estatísticos sobre a rede de água e esgoto da RMR.	45
Tabela 4.2 – Unidades hidrogeológicas e dados hidrodinâmicos da área de pesquisa.	54
Tabela 5.1 – Resumo dos métodos de amostragem e análise.	64
Tabela 5.2 – Sumário dos pontos de amostragem da 3ª campanha.	66
Tabela 6.1 – Consumo de água no edifício exemplo.	93
Tabela 6.2 – Tarifas para usuários residenciais em Recife.	94
Tabela 6.3 – Custo mensal de bombeamento em função da altura manométrica.	95
Tabela 6.4 – Custo fixo médio por poço em Recife.	96

Lista de abreviaturas, siglas e símbolos

ANR - Agence Nationale de la Recherche

APAC – Agência Pernambucana de Águas e Clima

B – Taxa de bombeamento do aquífero

B_s – Taxa de bombeamento sustentável do aquífero

BRGM –Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CELPE - Companhia Energética de Pernambuco

CEPAS – Centro de Pesquisas em Águas Subterrâneas

CHESF - Companhia Hidro Elétrica do São Francisco

CINDACTA – Centro Integrado de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo

COMAR – Comando Aéreo Regional

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento

D_0 – Descarga natura do aquífero

D_R – Descarga residual do aquífero

E – Energia elétrica consumida pela bomba

FACEPE – Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco

FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

H – Altura manométrica

I – Fluxo que entra no sistema

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MS – Ministério da Saúde

PIB – Produto Interno Bruto

Q – Vazão de bombeamento do poço

R_0 – Recarga natural do aquífero

ρ_b – Rendimento da bomba

ρ_m – Rendimento do motor

ReCESA – Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental

RIMAS – Rede Básica de Monitoramento das Águas Subterrâneas

RMR – Região Metropolitana de Recife

S – Coeficiente de armazenamento do aquífero

SRNE – Superintendência Regional do Nordeste

SRHE – Secretaria de Recursos Hídricos Energéticos do Estado de Pernambuco

SUDENE - Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste

t – período de operação da bomba

TRF – Tribunal Regional Federal

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

USP – Universidade de São Paulo

1 – Introdução

A Região Metropolitana de Recife (RMR), no estado de Pernambuco, é o quarto maior aglomerado populacional do Brasil, concentrando 3,7 milhões de pessoas. Desse total, 97,2% moram em áreas urbanas, sendo 1,5 milhão na cidade de Recife (IBGE, 2010). A RMR tem se desenvolvido muito rapidamente, incrementando na mesma medida sua demanda por água, que hoje se aproxima de 473 Mm³/a (15 m³/s) e que não é totalmente atendida pela COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) (COMPESA, 2014; Base de Dados do Estado de Pernambuco, 2014).

Na RMR o número de poços tubulares tem crescido de forma vertiginosa, sobretudo depois da crise no abastecimento de água entre os anos de 1998 e 1999. Neste período, os índices de precipitações estiveram abaixo da média e os mananciais superficiais estavam próximos do colapso. Essa condição climática levou à perfuração de mais de 13 mil poços privados na RMR (Costa, 2002; Foster *et al*, 2010), sendo que muitos foram abandonados posteriormente por conta da salinização.

Ante o intenso regime de exploração, indícios de salinização e queda dos níveis potenciométricos, vários estudos apontaram os aquíferos de Recife como superexplotados (Leal 1994; Costa 1998, 2002; Monteiro 2000; Montenegro 2006, 2009). Entretanto, os estudos sobre superexploração realizados nos aquíferos de Recife até o momento têm como base somente um limitado balanço hídrico entre recargas e descargas. Dessa forma tais estudos não consideram os outros aspectos de superexploração (econômico, social, ecológico, geotécnico e qualitativo). Além disso, os conhecimentos a respeito da geologia de Recife são limitados, tornando imprecisas tais estimativas.

Considerando que o recurso hídrico subterrâneo tem cada vez mais importância para o abastecimento de água de Recife, novas abordagens, análises e modelos sobre as potencialidades hídricas da região são muito valiosas como possíveis instrumentos para tomada de decisões. É dentro deste problema que se insere essa dissertação de mestrado.

1.1 – Contextualização da pesquisa

O abastecimento de água na RMR tem um histórico marcado por falta d'água, racionamento, longas estiagens e investimento público intenso. Concomitantemente, a região é um exemplo típico de um cenário cada vez mais comum no mundo: grandes concentrações urbanas, marcadas pela desigualdade social, aparelho estatal falho, rápido desenvolvimento industrial e turístico; cenário que redundará em um aumento das pressões sobre recursos naturais, num cenário de mudanças climáticas globais.

Essa situação levou a uma chamada da FACEPE-FAPESP-ANR intitulada: “Research on the impacts of sea level change and climate change projected by the end of the century in coastal Brazil, identifying vulnerabilities and adaptation strategies (i.e.: impacts on Pernambuco coastal areas, particularly in the metropolitan area of Recife)”, (“Pesquisa dos impactos do aumento do nível do mar e mudanças climáticas projetadas para o fim do século na costa do Brasil, identificando vulnerabilidades e estratégias adaptativas [i.e. impactos na área costeira de Pernambuco, particularmente na região metropolitana de Recife]”). Em resposta a essa chamada foi criado o projeto COQUEIRAL: “Desafio da Qualidade da Água em Ambiente Urbano: Aquíferos de Recife e Uso do Solo: Como Enfrentar a Contaminação e a Salinização das Águas Subterrâneas sob a Mudança Ambiental Global em seu Contexto Social”.

O projeto COQUEIRAL é uma parceria entre a Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a Universidade de São Paulo (USP) e o Serviço Geológico Francês (BRGM). O parte pernambucana ainda é composta pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), o Serviço Geológico do Brasil (CPRM). O time paulista é representado do Centro de Pesquisas em Águas Subterrâneas (CEPAS-IGc) e pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A equipe francesa compreende além do BRGM a Universidade de Lille 3 (CeRIES), Universidade de Rennes 1 (CAREN) e a empresa GEO-HYD (adquirida pelo Grupo d'Antea). O projeto tem como objetivos analisar o impacto da exploração das águas subterrâneas em grandes centros urbanos (Recife) frente às mudanças climáticas globais tanto no aspecto hidrogeoquímico quanto no aspecto social.

Esse estudo faz parte da Tarefa 3 do Projeto COQUEIRAL. Nesse estudo foi feita a análise do cenário recifense frente ao entendimento atual de superexploração. Essa pesquisa foi necessária para caracterizar a exploração dos aquíferos de Recife e para apresentar novas interpretações a respeito do conceito de superexploração.

2 – Objetivos

Este estudo teve como objetivo central a análise da exploração do principal sistema aquífero da planície do Recife, o Cabo, frente aos conceitos de superexploração de recursos hídricos subterrâneos.

Adicionalmente essa pesquisa objetivou revisar e reinterpretar os conceitos de superexploração de aquíferos e caracterizar o cenário de utilização dos recursos hídricos subterrâneos em Recife.

3 – Superexploração

Superexploração de aquíferos é um termo que tem se tornado cada vez mais comum entre pesquisadores, gestores e comunicadores. Esses profissionais tem usado o termo para se referir a aquíferos sob estresse ou para situações onde ocorrem conflitos pela água (Custodio 2002).

O termo superexploração sugere que o recurso está sendo utilizado em quantidade maior que deveria, entretanto não fornece nenhuma informação acerca do real estado do aquífero. Por isso Llamas (2011) desaconselha o uso do termo, qualificando-o como sem significância e enganoso.

A falta de significado do termo superexploração tem ligação direta com a forma como ocorreu o desenvolvimento da água subterrânea no mundo. Uma vez que o desenvolvimento da geologia moderna foi tardio, o conhecimento técnico da dinâmica de aquíferos ficou desconhecido por muito tempo. Dessa maneira os investimentos de abastecimento público concentraram-se nos recursos superficiais, pois estes já eram mais bem conhecidos e estavam mais disponíveis.

Com o desenvolvimento das tecnologias modernas de bombeamento e construção de poços e da evolução da hidrogeologia enquanto ciência, as condições para utilização do recurso subterrâneo foram satisfeitas. Alheio a esses fatos, o poder público continuou a investir nos recursos superficiais. Sabendo que o custo para a instalação de uma unidade de exploração de água subterrânea é relativamente baixo, a iniciativa privada, motivada pela necessidade de água limpa e barata, liderou a expansão da rede de poços.

Havendo pouco interesse do poder público, a expansão da rede de poços pela iniciativa privada ocorreu de forma desordenada e desregulamentada. Esse cenário levou a dois efeitos colaterais (Llamas 2011):

- I. Gestores de recursos hídricos têm conhecimento técnico limitado e poucos dados sobre recursos subterrâneos, uma vez que por muito tempo não houve interesse no assunto; e
- II. Desenvolvimento desordenado que causou em alguns locais grande rebaixamento do nível d'água, degradação da qualidade da água, aumento nos custos, subsidência de terrenos, interferência em rios e outros corpos d'água etc.

Ainda segundo Llamas (2005, 2011), a falta de interesse do poder público nas águas subterrâneas é também motivada por interesses pessoais e por corrupção. Isso ocorre devido à dimensão das obras de implantação de barragens e outras estruturas relacionadas à água superficial. Tais obras envolvem muito investimento, muitas empresas e tem um alto impacto na popularidade dos políticos; sendo um campo fértil para corrupção, favorecimentos em contratos e desvios de dinheiro.

Nesse cenário nasce o termo superexploração de aquíferos. Um termo utilizado para referir-se a um aquífero onde os efeitos negativos da exploração caótica são percebidos pelos usuários e gestores.

3.1 De onde vem a água?

Uma grande dificuldade na gestão de águas subterrâneas é que muitas vezes os gestores, pesquisadores e tomadores de decisão desconhecem o funcionamento de um aquífero, frequentemente essas pessoas aplicam erroneamente conceitos de águas superficiais à água subterrânea. Dessa forma a mentalidade que permeia a literatura de recursos hídricos é que a superexploração de aquíferos ocorre quando o bombeamento é maior que a recarga natural do aquífero. Embora haja um grande esforço da comunidade científica em desmistificar a dinâmica de aquíferos submetidos ao bombeamento (Theis, 1940; Brown 1963; Bredehoeft 1982, 1997, 2002; Sophocleous, 1997, 2000; Alley & Leake, 2004; Devlin & Sophocleous 2005; Zhou 2009), muitos autores adotam essa errônea ideia sobre superexploração.

Para se entender essa questão pode-se lançar mão do um aquífero-ilha hipotético (Bredehoeft 1982, 2002). Na situação não perturbada do aquífero (Figura 3.1 A) sua recarga natural (R_0) é igual à sua descarga natural (D_0) (Equação 3.1).

$$R_0 - D_0 = 0 \quad (\text{Equação 3.1})$$

Quando ocorre a instalação de um poço no aquífero (Figura 3.1 B) o equilíbrio é alterado pela introdução do bombeamento (B), recarga induzida (ΔR_0), variação na descarga (ΔD_0) e retirada de água do armazenamento ($dS/dt = 0$). Dessa forma, o novo equilíbrio pode ser descrito pela Equação 3.2, nessa equação as parcelas que entram no sistema tem sinal positivo e as parcelas que deixam o sistema tem sinal negativo.

$$(R_0 + \Delta R_0) - (D_0 - \Delta D_0 + B + \frac{dS}{dt}) = 0 \quad (\text{Equação 3.2})$$

Sabendo que $R_0 = D_0$ (Equação 3.1), o bombeamento resume-se à:

$$B = \Delta R_0 + \Delta D_0 + \frac{dS}{dt} \quad (\text{Equação 3.3})$$

Assim pode-se concluir que toda água proveniente do bombeamento advém de (1) recarga induzida, (2) diminuição da descarga, (3) armazenamento do aquífero ou uma combinação dessas três fontes.

Sob os princípios estabelecidos por pela Lei de Darcy só há uma maneira de aumentar o fluxo em áreas de recarga natural ou diminuir o fluxo em áreas de descarga natural: alterando o gradiente hidráulico e a espessura saturada do aquífero nessas áreas, ou seja a transmissividade. Isso implica no rebaixamento do nível d'água em todos os pontos entre o poço e as áreas de recarga ou descarga naturais; obviamente essa condição leva à extração de água do armazenamento do aquífero. Assim fica claro que não é possível retirar água do aquífero sem impactar o armazenamento do aquífero.

Alley *et al* (1999) definem que o regime sustentável para águas subterrâneas é aquele que pode ser mantido por um tempo infinito sem causar danos não aceitáveis. Assim para o regime sustentável a retirada de água do armazenamento deve ser nula ($\frac{dS}{dt} = 0$). Portanto a taxa de bombeamento sustentável (B_s) pode ser expressa como:

$$B_s = \Delta R_0 + \Delta D_0 \quad (\text{Equação 3.4})$$

A parcela $\Delta R_0 + \Delta D_0$ é chamada de captura (Lohman, 1972). Em aquíferos profundos, onde não há recarga induzida, o bombeamento sustentável reduz-se à diminuição da descarga ($B_s = \Delta D_0$).

Figura 3.1 – Evolução do aquífero com o bombeamento. A) Aquífero não perturbado. B) Efeitos primários do bombeamento. C) Intensificação do cone de rebaixamento. D) Rebaixamento intensifica-se a ponto de alterar o fluxo (modificado de Bredehoeft, 1982).

Entretanto, a água será retirada do armazenamento até que seja atingido um ponto de equilíbrio. Com o progresso do bombeamento é possível que o rebaixamento seja tal que induza a inversão do fluxo em áreas de descarga (Figura 3.1 D). A princípio isso torna possível o bombeamento a vazões superiores à recarga natural sem impactar o armazenamento do aquífero.

Resumidamente pode-se sintetizar a dinâmica da exploração de aquíferos da seguinte maneira:

- Anterior ao bombeamento a recarga era contrabalanceada com a descarga do aquífero (Equação 3.1) (Figura 3.1 A);
- Com a introdução do bombeamento há retirada de água do armazenamento do aquífero sem impactar de forma considerável a descarga natural (Equação 3.3) (Figura 3.1 B);
- Quando o cone de rebaixamento atinge áreas de descarga ou recarga pode-se estabelecer um equilíbrio onde a retirada de água do armazenamento cessa e toda água é proveniente da diminuição da descarga ou aumento da recarga (Equação 3.4) (Figura 3.1 C);
- Caso haja a intensificação da exploração o cone de rebaixamento pode se estabelecer de tal maneira que induza a inversão do fluxo em áreas de descarga (Figura 3.1 D).

A Equação 3.4 expressa claramente de onde vem a água num regime de bombeamento sustentável, entretanto sua utilização prática é limitada pois seus termos são difíceis de calcular na prática. Para expressar o bombeamento sustentável de forma mais usual pode-se lançar mão da descarga residual (D_R) e da soma dos fluxos que entram no sistema (I) (Zhou 2009):

$$D_R = D_0 - \Delta D_0$$

$$I = R_0 - \Delta R_0$$

Substituindo esses termos na equação 3.2, pode-se obter uma nova expressão para a taxa de bombeamento sustentável:

$$B_s = I - D_R \quad (\text{Equação 3.5})$$

Para aquíferos profundos, onde não há recarga induzida ($\Delta R_0 = 0$, então $I = R_0$) o bombeamento sustentável é expresso por:

$$B_s = R_0 - D_R \quad (\text{Equação 3.6})$$

A equação 3.6 tem aplicação prática mais direta que a equação 3.4 uma vez que suas variáveis representam a condição atual do aquífero.

3.2 – Superexploração e sustentabilidade

Os conceitos de superexploração e sustentabilidade são dois lados da mesma moeda. Quando um recurso é explorado de forma não-sustentável é dito que há um regime de superexploração do recurso. Dessa forma há equivalência entre falar de superexploração ou falar de sustentabilidade.

Apesar de haver mais de 50 definições diferentes de sustentabilidade (Rogers 2006), aparentemente não há desconforto em utilizar o termo de maneira irrestrita. Essa promiscuidade no uso dos termos torna seu significado vazio (Llamas 2005, 2011). Por conseguinte municípios, empresas e organizações implementam programas totalmente distintos incluindo todos sob a bandeira da sustentabilidade. Ademais outros termos derivados de sustentabilidade são utilizados sem haver um consenso sobre seu real significado. Assim termos como ‘produção verde’, ‘eco engenharia’, ‘consumo sustentável’, ‘redução de perdas’, ‘eco eficiência’, ‘controle de poluentes’ etc; são utilizados por políticos, cientistas, jornalistas e administradores de maneira redundante e até mesmo conflitante. O neologismo apresenta-se de forma geográfica, sendo que algumas comunidades cunham termos diferentes para referir-se à mesma situação (e.g. química verde e produção limpa). Glavic & Lukman (2007) revisaram 51 termos correlacionados ao conceito de sustentabilidade.

Associar o conceito de superexploração ao conceito de sustentabilidade traz consigo o inconveniente que sustentabilidade não é um termo precisamente definido. Assim o conceito de superexploração carrega essa indefinição conceitual. Entretanto, assim como a indefinição de sustentabilidade não é intrinsecamente ruim (White 2013), a indefinição de superexploração também não é. A incerteza sobre os conceitos refletem seu inerente caráter humano, pois eles dependem do que é socialmente

aceitável. A exemplo, numa publicação clássica, Theis (1940) afirma que uma das maneiras de se aumentar a recarga é drenar áreas de recarga rejeitada, áreas alagadas e áreas com vegetação freatófita. Essas soluções apontadas por Theis eram consideradas um serviço à sociedade, pois áreas alagadas eram consideradas fontes de doenças; todavia atualmente as áreas alagadas são consideradas santuários ecológicos e sua drenagem é condenada.

Por mais que hajam muitos entendimentos de sustentabilidade há um ideal que compõem todas as definições: a continuidade. Todo conceito de sustentabilidade é cunhado para caracterizar alguma forma de continuidade, seja a continuidade de uma população, da oferta de um recurso mineral, de um mercado, de uma espécie animal, de um ecossistema etc. Em resumo “um sistema sustentável é aquele que sobrevive ou persiste” (Constanza & Patten, 1995).

Tendo em vista que sustentabilidade e superexploração não podem ser definidos adequadamente, a comunidade científica deve se concentrar em (Constanza & Patten, 1995):

- I. definir o que é importante perdurar;
- II. criar meios de prever o que vai perdurar e como vai perdurar;
- III. inserir isso numa escala de tempo e espaço.

Com isso evita-se toda a discussão filosófica a respeito do que de fato é sustentabilidade e pode-se concentrar esforços em criar meios de evitar que recursos sejam superexplorados.

3.3 – O rendimento sustentável

Ainda que não haja consenso sobre superexploração e sustentabilidade, faz-se necessário determinar uma vazão de exploração do aquífero. Tentando responder essa questão foi introduzido o conceito de rendimento seguro (*safe yield*, em inglês) (Meinzer 1920). Este autor define o rendimento seguro como sendo menor que a recarga anual do aquífero. Entretanto o uso dessa definição provoca diversos efeitos negativos; dessa forma o conceito de rendimento seguro foi modificando-se. Kalf & Wolley (2005) apresentam o histórico da evolução do conceito de rendimento seguro.

Com o desenvolvimento científico e com a crescente preocupação ambiental, o conceito de rendimento seguro evoluiu naturalmente para rendimento sustentável. O termo rendimento seguro reflete a maior preocupação dos gestores com a continuidade da disponibilidade de água, ou seja, com ele pretendia-se definir um regime de exploração tal que não prejudicasse o aquífero ao ponto de exauri-lo. Por sua vez o conceito de rendimento sustentável já considera a exploração do aquífero num contexto ambiental, econômico e social; levando em consideração os efeitos sociais e ambientais do bombeamento de água subterrânea.

Dessa forma o rendimento sustentável seria a taxa de exploração que evita a superexploração do aquífero. Uma vez que o bombeamento causa: (1) retirada de água do armazenamento do aquífero (consequentemente rebaixamento dos níveis), (2) aumento da recarga, (3) diminuição da descarga. Assim, o rendimento sustentável deve ser tal que os impactos causados pelo bombeamento sejam aceitáveis. Dessa forma o rendimento sustentável deve ser obtido por meio de modelagens numéricas onde seja avaliada a resposta do sistema aquífero ao bombeamento. Evidentemente, deve haver constante monitoramento dos aquíferos submetido ao bombeamento. Por consequência o regime de bombeamento e os impactos podem ser constantemente avaliados frente aos conhecimentos e a conjuntura social à época.

3.4 – Formas de superexploração

Sabendo que toda extração artificial de água do aquífero causa impacto em sua dinâmica natural é possível abandonar a ideia que um regime sustentável é aquele que não causa nenhum impacto. Assim pode-se concentrar na realidade e reduzir os impactos a um nível aceitável.

Como já discutido anteriormente toda extração de água de um aquífero causa retirada de água do armazenamento e pode causar diminuição da descarga natural ou aumento da recarga. Cada uma dessas interferências pode gerar vários efeitos indesejados, dependendo da conjuntura de cada localidade um efeito pode ser mais proeminente que outro, logo a superexploração de aquíferos pode se apresentar de diversas formas.

Consequentemente a literatura científica trata diversos aspectos de superexploração e sustentabilidade (Custodio 1995, 2002; Hirata, 1993; Pezzey & Tomam, 2002; Llamas 2003, 2006; Fornes *et al* 2004; Kalf & Woolley, 2005; Foster *et al*, 2013). A Tabela 3.1 apresenta um resumo do entendimento deste autor sobre as 3.4 – Formas de superexploração

Tabela 3.1 – Formas de superexploração

Aspecto	O que é	Como ocorre	Impactos
Hidráulico	Exaustão física do aquífero	Rebaixamento atinge um ponto onde é fisicamente impossível retirar mais água	Cessaçã da retirada de água do aquífero
Qualidade	Modificação na qualidade da água além dos níveis aceitáveis	Bombeamento mobiliza águas de baixa qualidade, tornando a água bombeada imprópria	Impossibilidade da utilização da água ou adoção de restrições ao uso (uso para lavagem etc.)
Econômico	Elevação dos custos de operação	Rebaixamento chega a níveis onde o custo de outras fontes de água é menor que a água subterrânea	Bombeamento cessa enquanto há fontes mais baratas de água
Ecológico	Danos ecológicos inaceitáveis	Queda na descarga ou recarga induzida do aquífero interferem em sistemas aquáticos vizinhos ao aquífero	Drenagem de rios, lagos, áreas alagadas e outros corpos d'água. Desaparecimento de alguns tipos de vegetação e fauna associada.
Geotécnico	Perda da estabilidade de terrenos	Retirada de água do armazenamento do aquífero altera as características do terreno	Subsidência de terrenos, surgimento de áreas alagadas
Ético e Social	Distribuição desigual de recursos	Grandes usuários impedem o acesso de usuários menores ou usuários a jusante	Conflitos pelo acesso a água

As seis formas de superexploração não ocorrem isoladamente, muito pelo contrário num mesmo cenário geralmente encontram-se juntas. Entretanto, o que há de fato é uma dominância de um ou mais aspectos de superexploração. A seguir cada forma de superexploração é tratada separadamente.

3.4.1 – Aspecto hidráulico

Esse tipo de superexploração ocorre em situações onde o regime de bombeamento não atinge o equilíbrio, logo a água é continuamente retirada do armazenamento. Na situação limite é possível atingir um rebaixamento tal que seja fisicamente impossível a retirada de mais água do poço, caracterizando superexploração pelo aspecto hidráulico.

Essa limitação física pode ocorrer por:

- I. Água está tão profunda que é tecnicamente impossível trazê-la até a superfície;
- II. A espessura saturada do aquífero atingiu um nível fora do regime de operação das bombas disponíveis.

A literatura sobre esses aspectos é restrita, sendo praticamente limitada a manuais de bombas submersas. Nesses manuais encontra-se que a altura manométrica máxima capaz de ser vencida pelas bombas atuais é 590 m, com uma vazão de 55 m³/h; para essa condição de operação o poço deve ter 12” de diâmetro. Esse valor máximo não é aplicável a todos os aquíferos, posto que a estrutura instalada para exploração do aquífero na maioria das vezes não é adequada para essa situação limite.

Com relação à espessura saturada seria necessário apenas cobrir a bomba para extrair água, entretanto na prática as condições de cada local devem ser avaliadas. Se a diferença entre o nível d’água e a bomba for muito pequena podem ser formados vórtices que prejudicam o funcionamento da mesma e podem induzir a entrada de ar no sistema. Da mesma forma se a bomba estiver posicionada muito próxima ao fundo do aquífero é possível que sedimentos sejam mobilizados e entupam os filtros, danificando-a. Como regra prática adota-se 10 m como uma distância segura entre a bomba e o nível d’água.

Dependendo das dimensões do aquífero e regime de bombeamento é possível que em uma região seja impossível retirar água (aquífero superexplorado hidráulicamente), e em outra localidade seja viável o bombeamento. Assim pode-se concluir que o fator hidráulico não impacta o aquífero como um todo, podendo estar restrito a uma região. Essa situação está ilustrada na figura 3.2, onde os poços 1 e 2

estão numa situação de superexploração hidráulica e o poço 3 consegue bombear água normalmente.

Figura 3.2 – Diagrama esquemático do aspecto hidráulico da superexploração. Nesse diagrama o poço 1 não pode mais bombear água pois a espessura saturada do aquífero é muito pequena; no poço 2 a bomba não consegue mais vencer a altura manométrica; por sua vez o poço 3 opera normalmente estando numa área onde não há superexploração do aquífero.

3.4.2 – Aspecto de qualidade da água

O bombeamento de um aquífero causa alterações na potenciometria do mesmo. Quando o bombeamento é de baixa intensidade essas alterações são perceptíveis somente nas proximidades do poço (nível local), no entanto com a intensificação do regime de bombeamento tais alterações passam a ser perceptíveis a nível regional, eventualmente alterando o padrão de fluxo de todo um aquífero.

Geralmente essas mudanças na potenciometria causam inversões dos potenciais hidráulicos, podendo haver mobilização de águas de baixa qualidade. Destarte, é possível ocorrer:

- I. infiltração de águas superficiais e subterrâneas contaminadas (principalmente em grandes centros urbanos e áreas agrícolas);
- II. mobilização de águas salinas antigas;
- III. avanço da cunha salina (aquíferos costeiros).

Dependendo das características do aquífero esses efeitos podem demorar anos ou décadas para tornarem-se perceptíveis. Dessa forma esse aspecto da superexploração surge na forma de um gradual aumento na concentração de

contaminantes (Custodio 2000). Como os efeitos são graduais muitas vezes os usuários tardam a buscar soluções para o problema, acabando muitas vezes por perfurar outros poços em busca de água de melhor qualidade (que logo apresentam o mesmo problema dos outros poços).

Além das alterações na qualidade da água essa situação pode provocar a ocorrência de processos biogeoquímicos divergentes do natural do aquífero, o que pode acarretar a liberação de espécies que antes eram insolúveis ou ficavam adsorvidas. Fora isso a ingressão de águas de baixa qualidade no aquífero provoca reações de troca iônica, retendo os contaminantes na matriz rochosa, portanto os efeitos dessa contaminação serão percebidos muitos por muitos anos, mesmo que haja o completo cessar do bombeamento.

3.4.3 – Aspecto econômico

No que tange ao aspecto de custo, a exploração de águas subterrâneas tem basicamente três componentes:

- I. Instalação poço: estudo da área, serviço de perfuração e construção, bomba etc.
- II. Manutenção: limpeza periódica do poço, troca de bomba e tubos, análises químicas.
- III. Energia elétrica: Energia consumida pela operação da bomba.

O custo de instalação do poço depende muito da geologia do local e da profundidade que poço. Por mais onerosa que seja a instalação do poço, este custo fica amortizado ao longo do período de operação, o qual pode passar de 30 anos. Além disso, poços profundos são perfurados por usuários de grande porte (e.g. empresas, condomínios, indústrias etc.); para tais usuários o custo de instalação é pequeno frente ao custo da água de outras fontes e ao fluxo econômico da instituição.

O custo de manutenção de um poço é baixo, consistindo de análises físico-químicas e bacteriológicas, limpeza por cloração e, algumas vezes, sendo necessários métodos mecânicos e químicos de limpeza e troca de materiais danificados (fiação, encanamento, bomba etc).

O custo que realmente impacta a exploração de águas subterrâneas é o custo de operação. Esse custo resume-se basicamente à energia elétrica. O consumo de energia elétrica depende da vazão de bombeamento (Q , [L^3/T]), altura manométrica (H , [L]), rendimento do conjunto da bomba (ρ_b , adimensional), rendimento do motor (ρ_m , adimensional) e do tempo que operação da bomba (t , [T]). A Equação 3.7 apresenta a energia consumida (em kwh) em função das variáveis referidas (Simontato, 2012):

$$E = \frac{Q \cdot H \cdot 0,736 \cdot t}{75 \cdot \rho_b \cdot \rho_m} \text{ (Equação 3.7)}$$

Dado que a bomba possui potência constante, conforme o rebaixamento aumenta (i.e. aumento da altura manométrica) a vazão de exploração diminui. A Figura 3.3 traz o gráfico teórico característico de uma bomba submersa (Simonato, 2012).

Figura 3.3 – Curva de comportamento teórica de uma bomba submersa em relação à altura manométrica e vazão de exploração (Simonato, 2012).

Dessa forma observa-se a necessidade do dimensionamento da bomba em função do regime de exploração. Caso contrário pode haver dois problemas: (1) queda da vazão de forma a impossibilitar o uso do poço; (2) gasto de energia elétrica em excesso por conta do superdimensionamento da bomba. O primeiro caso acarreta gastos com troca de bomba e o segundo caso leva ao consumo exagerado de energia elétrica.

Pela equação 3.7 nota-se que para diminuir os custos com energia elétrica pode-se diminuir a altura manométrica, diminuir a vazão ou aumentar a eficiência do sistema. Na maioria das vezes diminuir a altura manométrica ou a vazão não é desejado, pois isso influenciaria a quantidade de água que pode ser utilizada. Por sua vez a eficiência do sistema pode ser melhorada com o correto dimensionamento da bomba, construção dos poços dentro dos padrões, especificação e dimensionamento das tubulações (ReCESA, 2008).

Um fator agravante no consumo excessivo de energia elétrica é a falta de equipamentos controladores de consumo, como por exemplo, inversores de frequência. Na falta desses equipamentos a potência da bomba é utilizada integralmente, independente de altura manométrica ou vazão; causando aumento no custo de operação.

Outro benefício dos inversores de frequência é atenuar o consumo pela potência de arranque do motor. Esse consumo ocorre a cada partida do motor para coloca-lo em funcionamento. A figura 3.4 demonstra graficamente a redução na potência de arranque.

Opcionalmente pode-se diminuir o custo operacional ligando os poços nos períodos onde a tarifa de energia elétrica é menor.

O custo de operação de um poço pode ser incrementado pela necessidade de instalação de estações de tratamento de água. Essas estações são necessárias quando a qualidade da água extraída não é adequada. O custo do tratamento depende diretamente do tipo de contaminante presente, podendo ser uma simples cloração até complexos sistemas de dessalinização.

Figura 3.4 – Gráficos esquemáticos de corrente elétrica vs tempo, evidenciando a menor potência de arranque para: a) partida direta; b) partida com autotransformador; c) partida suave; d) partida com inversor de frequência (Perroni 2005).

O aspecto econômico da superexploração se apresenta no momento onde os custos para exploração da água subterrânea são maiores que águas de outras fontes. Essa conjuntura leva ao abandono do recurso subterrâneo até que haja novamente um demanda que não possa ser suprida pela fonte mais barata ou até que o custo das outras fontes se eleve.

3.4.4 – Aspecto ecológico

O aspecto ecológico da superexploração decorre pela diminuição da descarga ou aumento da recarga induzida. As alterações ambientais decorrentes da exploração de aquíferos são (Custodio 2000, Glennon 2004):

- I. Diminuição da vazão de nascentes e rios,
- II. Drenagem de lagos, lagoas, mangues e áreas alagadas,
- III. Extinção de vegetação freatofita e estresse na fauna correlata.
- IV. Alterações no microclima

A intensidade das interferências no meio ambiente depende diretamente do papel do aquífero no sistema e da intensidade da exploração. Para aquíferos profundos a interferência no ambiente pode ser praticamente nula, uma vez que tais aquíferos encontram-se relativamente isolados da superfície. Por sua vez, aquíferos livres têm uma interação muito mais pronunciada com a superfície, seus impactos ambientais são percebidos com uma velocidade muito maior.

Numa situação de falta de gerenciamento adequado é possível que rios sejam completamente esgotados por conta do bombeamento de água do aquífero (Glennon 2004). Nesse caso ocorrem severos danos ambientais tais quais a extinção de espécies vegetais e animais nativas e alterações no microclima regional. Além disso, essa situação poder levar ao aumento das tensões sociais e econômicas, dado que alguns usuários podem ficar sem acesso a água e outros podem ter suas plantações prejudicadas.

A figura 3.5 mostra o processo de drenagem de um rio por conta do bombeamento, que altera uma condição natural de descarga (a).

Quando o nível d'água localiza-se próximo à superfície há interação entre o aquífero e superfície, de forma que o aquífero influencia lagos, mangues e áreas alagadas. Similarmente o aquífero também suporta a parte da vegetação da região. Logo, quando a superfície potenciométrica é rebaixada essa recarga que antes era rejeitada passa a adentrar o aquífero (recarga induzida). Causando a drenagem de áreas alagadas e extinção da fauna e flora correlata. Quando essa situação mantém-se por um ou dois anos a flora não se extingue totalmente e é possível haver mais rápida recuperação da área, entretanto após uma ou duas décadas os prejuízos ambientais podem ser muito severos (Llamas 2004). A queda na superfície potenciométrica causa também uma queda na evapotranspiração do aquífero. Assim o microclima regional fica alterado pelo bombeamento da água subterrânea.

Figura 3.5 – Processo de drenagem de um rio devido ao bombeamento: a) o aquífero em seu estado natural; b) introdução do bombeamento, onde não há influência na descarga do rio; c) com a intensificação do bombeamento a descarga do aquífero cessa, invertendo o sentido do fluxo e diminuindo a vazão do rio. O processo mostrado em c) pode acarretar a total drenagem do rio.

Cientes que toda retirada artificial de água do aquífero gera impactos ambientais, a superexploração de aquíferos ocorre quando os impactos extrapolam um nível aceitável. Em última instância o aceitável é definido pelas leis ambientais do país. Entretanto esse limite sofre influência de ambientalistas, lobistas do setor privado, visibilidade na imprensa e do conhecimento científico da época.

3.4.5 – Aspecto geotécnico

A estabilidade geotécnica é influenciada pela retirada de água do armazenamento do aquífero. Com a saída da água a pressão intersticial aumenta, produzindo redução ineslástica da porosidade (subsidência). Esse é um efeito muito pequeno por unidade de espessura de sedimento, entretanto se torna notável quando se trata de bacias sedimentares com centenas ou milhares de metros de espessura (Fornes *et al* 2004).

A subsidência por conta de bombeamento de água foi observada na Califórnia (EUA), Golfo do México (EUA, México), Bangkok (Tailândia), Tokyo (Japão), Cidade do México (México), Veneza (Itália) entre outros (Marsal & Mazari 1962, Bell 1988, Custodio 2000).

A estabilidade de terrenos de geologia cárstica também é influenciada pelo bombeamento. Nesse tipo de aquífero a água flui por condutos e cavernas abertos pela lenta dissolução da matriz carbonática. Com a retirada da água dos condutos criam-se espaços vazios, o que aumenta a pressão exercida sobre o teto da caverna. Isso acaba causando o desabamento da caverna, criando o que se chama de dolina (Gutiérrez *et al* 2014). A oscilação dos níveis d'água ou depleção do aquífero cárstico aumenta a ocorrência de dolinas.

Em caso de subsidência ocorre uma alteração no padrão de inundação da área. No caso de aquíferos costeiros essa alteração pode propiciar o avanço do mar sobre áreas urbanas. Além dos efeitos de inundação, com o rebaixamento do terreno ocorre o aumento da recarga e do nível d'água. Esse aumento pode levar à formação de lagos ou áreas alagadas, há ainda a possibilidade da inundação de construções no subsolo e danos à estrutura de edifícios e de outras obras urbanas. Além dos problemas com padrão de inundação, a subsidência de terrenos pode causar danos a estradas, encanamentos, ferrovias, canais e edificações.

3.4.6 – Aspecto ético e social

O contexto social do uso da exploração de recursos hídricos envolve discussões sobre:

- I. água como um bem comum;
- II. água como uma necessidade básica;
- III. direitos e responsabilidades sobre uso da água;
- IV. papel econômico da água.

De acordo com os princípios éticos gerais expressos na Declaração Universal dos Direitos Humanos, o acesso à água deve ser garantido a todos. Assim a água é tida como um bem comum, ou seja, uma condição social para que todos possam atingir todo seu potencial humano (Llamas, 2003).

Os bens comuns sofrem do que é chamado de *“tragédia dos bens comuns”* (Hardin, 1968), que explica como ocorre a depleção dos recursos naturais. No contexto de um aquífero todo usuário quer maximizar seus ganhos por unidade de água extraída. Em contrapartida a retirada de água do aquífero causa impactos. O benefício gerado pela exploração do aquífero aproveitado pelo usuário, enquanto os efeitos dos impactos são divididos por todos os usuários do aquífero. Dessa forma, quando o indivíduo faz o balanço da exploração do aquífero ele conclui que os ganhos extrapolam as perdas. Entretanto quando todos os usuários chegam à mesma conclusão os danos somados causam depleção do aquífero e outros efeitos indesejados (Loáiciga, 2004). Em resumo, a tragédia dos comuns é a privatização dos ganhos e a socialização das perdas.

A exploração de águas subterrâneas geralmente vem acompanhada de crescimento econômico, principalmente em áreas de plantio com irrigação. Com o poderio econômico gerado pela agricultura irrigada geralmente foram-se lobbys ou grupos de interesses comuns, além disso, a região como um todo ganha destaque político. Quando os efeitos negativos da exploração de aquíferos são percebidos, algo que ocorre só em torno de uma ou duas gerações após o bombeamento começar, esses grupos pressionam o poder público para que as águas de outras bacias sejam transportadas a fim de suprir a demanda da região. Ou seja, esses grupos usam seu poder político e econômico para contornar a situação sem alterar o regime de

exploração dos recursos locais, essa situação gera altos gastos públicos com a implantação das estruturas de transporte de água, além de tensões sociais e ambientais por conta do aumento da extração de água na bacia.

Dentro de uma mesma comunidade de usuários aqueles que possuem maior poder econômico podem interferir no direito dos outros usuários sobre a água. Essa interferência ocorre de duas formas:

- I. O usuário de maior poder econômico causa um rebaixamento tal que seca o poço vizinho. Nesse caso, se o vizinho não tiver condições financeiras de adequar seu equipamento, acaba ficando sem acesso à água; e
- II. Um usuário ou grupo de usuários causam uma queda na descarga tal que limitam a vazão dos rios que servem outras comunidades (como exemplificado na figura 3.5). Dessa forma o acesso à água na comunidade fica restrito ou impedido.

Essas interferências podem ser motivo de violência entre usuários (Llamas 2003), entretanto a violência em nível pessoal e local não costuma significar violência em nível regional ou global. De fato, a questão da água tem sido mais um motivo de construção de laços comunitários que de guerra (Asmal 2000 apud Llamas 2003). Desde que não haja introdução externas à comunidade de usuários, os conflitos tendem a serem resolvidos em paz.

3.5 – Mineração de água

Mineração de água é o nome dado ao bombeamento de aquíferos onde a sua recarga é praticamente nula ou muito reduzida no tempo (i.e. reposições de dezenas de milhares de anos), portanto toda a água do aquífero será retirada do seu armazenamento. Assim é caracterizado um regime dito não sustentável.

Entretanto pouco se fala sobre a sustentabilidade do regime de exploração das águas superficiais. Vale observar que por conta do assoreamento, a vida útil das barragens é de 40 a 200 anos (Llamas 2011). Esse tempo é equiparável à maioria da vida útil dos aquíferos em regime de mineração. Entretanto gestores e tomadores de decisão muitas vezes desconhecem esses parâmetros e acabam cegamente optando pelo recurso superficial.

Além disso, muitos autores consideram a mineração de água subterrânea como falta de ética com as gerações futuras, pois esse recurso não estará disponível no futuro. Entretanto há de se concordar que as gerações futuras terão o mesmo impasse, logo, segundo essa lógica esse recurso nunca será utilizado.

Apesar das orientações contrárias, as águas subterrâneas podem ser utilizadas em regime de mineração desde que haja planejamento adequado. Deve-se levar em conta que a exploração dos recursos hídricos provoca mudanças profundas na economia e sociedade locais. Tais mudanças sociais têm sido acompanhadas por políticas de melhor uso da água, dessa forma a abstração de água subterrânea tem sido dramaticamente diminuída. Llamas & Custodio (2002) apresentam vários exemplos de regimes de mineração de águas subterrâneas que foram bem sucedidos.

3.6. Superexploração: Estratégias e critérios

Adams & MacDonald (1998) afirmaram que a superexploração de aquíferos é sempre diagnosticada *a posteriori*. Os referidos autores sugerem um método de diagnóstico *a priori*. Nesse método são considerados três níveis de susceptibilidade: declínio do nível d'água, intrusão salina e subsidência. No método, para cada nível é assinalado um valor numérico, o qual depois da soma dos valores é atribuída uma designação qualitativa da superexploração do aquífero (i.e. baixa, média ou alta). Devido à alta diversidade hidrogeológica e socioeconômica é praticamente impossível aplicar as mesmas ferramentas de gerenciamento e diagnóstico em todos os lugares (Llamas 2004). Adicionalmente, esse método não considera outros aspectos igualmente importantes para a caracterização da superexploração, como visto anteriormente.

Apesar disso é preciso estabelecer critérios e estratégias de gerenciamento. O primeiro e mais importante passo é a aquisição de dados em quantidade e qualidade suficientes. Uma grande falha quando se trata de águas subterrâneas é a falta de dados confiáveis e séries históricas. Como o recurso subterrâneo geralmente não é o foco do poder público, não costumam existir grandes programas de monitoramento ou fiscalização. Dessa forma os tomadores de decisão, que não possuem formação adequada, acabam decidindo com base em dados incompletos e falhos.

Com dados de qualidade é possível haver um planejamento adequado. O planejamento é importante, pois grande parte dos problemas com recursos hídricos não se devem à falta do recurso, mas sim à má gestão (Llamas 2004).

Todos os problemas de superexploração estão de alguma forma relacionados a uma queda pronunciada na superfície potenciométrica. Uma estratégia importante na gestão é a disposição geográfica dos poços. Zhou (2009) apresenta um caso onde a mudança na disposição dos poços, mantendo o regime de bombeamento idêntico, causou um rebaixamento 20 m menor. Portanto o posicionamento dos poços deve ser levado em conta no planejamento da exploração de um aquífero.

Com relação ao planejamento e critérios para tomada de decisão, deve-se levar em conta que o tempo de resposta de um aquífero é muito grande. Bredehoeft (1982), através de modelos numéricos, calculou cerca de um século até que seja atingido o equilíbrio de um aquífero livre de grandes dimensões. Custodio (1992), Sophocleous (2000) e Zhou (2009) chegaram a valores muito similares para diferentes sistemas aquíferos. Obviamente, o tempo necessário para atingir o estado de equilíbrio depende do tamanho do aquífero, suas características hidráulicas e regime de exploração (Bredehoeft 1992).

Assim pode-se concluir que o bombeamento efetivamente sustentável só pode ser obtido após uma centena de anos de exploração do aquífero. Essa escala de tempo está muito distante do que é considerado nos estudos atuais. Para efeito de comparação, caso seja observado o declínio nos níveis por 10 anos consecutivos muitos autores classificam o aquífero como superexplorado. Entretanto o período considerado por esses estudos é uma fração muito pequena do período necessário para o aquífero atingir o estado de equilíbrio.

Destarte para avaliação acurada da situação do aquífero se faz necessário o uso de modelos de fluxo (e.g. Modflow etc), os quais devem ser continuamente aprimorados de forma a aproximarem-se cada vez mais do observado na realidade. Tendo um bom modelo como suporte, os comitês de gestão podem avaliar cada um dos aspectos da superexploração de aquíferos e traçar estratégias de ação. Ademais o

modelo deve ser melhorado ao ponto de poder prever cenários futuros, mais uma vez balizando as decisões dos comitês.

Deve-se ter em mente que pelas características descentralizadas dos recursos hídricos a participação da comunidade de usuários é importante. Experiências recentes foram feitas com gerenciamento participativo de águas subterrâneas (van Steenbergem & Shah, 2002; Sandoval, 2004; Wester *et al.*, 2011), entretanto essas experiências limitam-se a pequenas comunidades de usuários agrícolas ou em áreas de grande escassez de água; não havendo estudos de experiências em cidades.

4 – Área de estudo

A cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, é uma das cidades mais importantes do nordeste brasileiro. Seu PIB é o maior entre as capitais nordestinas, sendo resultado da marcante característica mercantil da cidade. Em Recife vivem aproximadamente 1,54 milhões de habitantes (IBGE 2010) numa área de 218 km², caracterizando uma densidade demográfica de 7.000 hab/km², a quarta maior do país. Recife também é sede da chamada Região Metropolitana de Recife (RMR), a qual é composta por outros 13 municípios. A RMR concentra 3,7 milhões de habitantes, o quinto aglomerado urbano do país.

Recife é espaço de grande número de sedes regionais e nacionais de instituições e empresas públicas e privadas, como o Comando Militar do Nordeste, a SUDENE, a Eletrobras Chesf, o TRF da 5ª Região, o Cindacta III, o II COMAR, a SRNE da Infraero, a SRNE do INSS e muitos consulados. A região ainda possui um importante aeroporto internacional e dois portos (Porto de Suape e Porto de Recife).

A RMR situa-se na faixa litorânea nordestina (Figura 4.1), que se estende do Rio Grande do Norte até o sul da Bahia. Pertence à Bacia Hidrográfica do Atlântico Nordeste Oriental, que se caracteriza pela ausência de grandes rios, configurando um cenário de baixa disponibilidade hídrica com relação às demandas, principalmente em períodos de estiagem. Destacam-se alguns rios entre eles Capibaribe, que dá nome à Bacia. Este rio apresenta regime fluvial intermitente no alto e médio curso, tornando-se perene somente a partir do município de Limoeiro, no seu baixo curso. Quando se

bifurca, o seu braço norte encontra-se com o rio Beberibe e deságua no mar. Seu braço sul junta-se ao rio Tejipló, tendo a sua foz no porto do Recife, a alguns quilômetros da foz do braço norte (Fundação Joaquim Nabuco, 2013).

Além da Bacia do rio Capibaribe existe a bacia do rio Ipojuca e outras duas sub-bacias que ocorrem na RMR: os Grupos de Bacias de Pequenos Rios Litorâneos 1 e 2 – GL1 e GL2.

O Grupo GL1 limita-se ao norte com a bacia do rio Goiana, ao sul com a bacia do rio Capibaribe, ao leste com o oceano Atlântico e a oeste com as bacias do rio Goiana e do rio Capibaribe. Os principais cursos d'água do grupo GL1 são os rios Beberibe, Paratibe, Timbó, Bonança, Botafogo, Itapirema e Tapeçu-Iru. O rio Botafogo possui a bacia de maior extensão e é o de maior importância para o abastecimento de água da RMR. O grupo GL2 limita-se ao norte com a bacia do rio Capibaribe, ao sul com a bacia do rio Ipojuca, a leste com o oceano Atlântico e a oeste com as bacias dos rios Capibaribe e Ipojuca. Sua rede hidrográfica é composta basicamente pelos rios Jaboatão e Pirapama, com seus afluentes, à exceção de suas porções nordeste e sudeste, que são representadas pelos estuários do rio Tejipló e dos rios Massangana e Tatuoca, respectivamente. O rio Jaboatão constitui o sistema hidrográfico mais importante, tendo como principal afluente o rio Duas Unas, onde está situada a barragem homônima e cujo manancial abastece parte da RMR (APAC, 2012).

Na RMR a precipitação varia de 2.050 a 2.200 mm/ano e a evapotranspiração potencial varia entre 1.600 mm/ano a 1.550 mm/ano. A temperatura média varia entre 25°C e 26°C (SRHE, 2006). A região apresenta influência da Zona de

Convergência Intertropical, sendo suas secas e chuvas influenciadas pela Oscilação Sul (El Niño e La Niña). Na RMR parte norte são encontradas temperaturas mais altas e chuvas definidas de março a julho e na RMR parte sul as chuvas ocorrem ao longo do ano todo, com estação seca de outubro a dezembro.

A RMR tem se desenvolvido muito rapidamente, incrementando na mesma medida do seu crescimento, sua demanda por água, que hoje se aproxima de 473 Mm³/a (15 m³/s) e que não é totalmente atendida pela COMPESA (Companhia Pernambucana de Saneamento) (COMPESA, 2014; Base de Dados do Estado de Pernambuco, 2014). O serviço público cobre 84,9% dos domicílios (Tabela 4.1), operando quatro sistemas semi-independentes, cuja capacidade total atingiu 252 Mm³/a (8 m³/s) em 2008, mas que já chegou a ser reduzida para 95 Mm³/a (3 m³/s), durante a estiagem no final da década de 1990. O recém-inaugurado Sistema Pirapama, apresentado como a solução final ao problema abastecimento, aduz até 158 Mm³/a (5 m³/s) de fontes superficiais e alimenta a região sul da RMR, apresenta-se igualmente vulnerável aos períodos de forte seca, como os ocorridos nos recentes anos de 2012-2013.

Tabela 4.1 – Resumo de dados estatísticos sobre a rede de água e esgoto da RMR (IBGE, 2010).

Domicílios totais	Urbanos	Rural
1.110.628	1.084.498 (97,6%)	26.130 (2,35%)
Abastecimento de água		
<u>Tipo de abastecimento</u>	<u>Número de domicílios</u>	<u>Porcentagem do total</u>
Rede geral de abastecimento	943.357	84,9%
Poço ou nascente	151.508	13,6%
Carro-pipa	1.550	0,14%
Armazenamento de água de chuva	776	0,07%
Rios, açudes, lagos ou igarapés	1.034	0,09%
Outra forma de suprimento	12.403	1,11%

A área central e a região litorânea da cidade apresentam grande densidade populacional, sendo essas regiões caracterizadas por intensa verticalização e valorização dos imóveis, os quais em sua maioria possuem poços privados para garantir o abastecimento de água. Na região periférica, encontra-se um complexo

cenário caracterizado por casas populares construídas com apoio governamental e áreas ocupadas irregularmente (favelas). Entre 1975 e 1990 houve um aumento de 50% na área de favelas em Recife (Anton *et al.* 1993), nessas regiões o abastecimento público é intermitente, as ligações à rede de água e esgoto são ilegais e os encanamentos utilizados são de baixa qualidade. Esse cenário proporciona altas taxas de vazamento da rede de água, esgoto a céu aberto, contaminação de mananciais, proliferação de mosquitos e ratos, entre outros problemas.

Concomitantemente, desde a década de 90 a região recebe intenso investimento em turismo e indústrias, principalmente com a construção do Porto de Suape. Tal investimento acarreta uma taxa de crescimento populacional vertiginosa e as medidas governamentais não conseguem acompanhar seu ritmo. Para agravar a situação, o aparato estatal de fiscalização é fragmentado e possui baixos recursos para análise e gestão integrada dos recursos e dos problemas da região.

4.1 – Geologia da área

A geologia da RMR é complexa e apesar dos inúmeros estudos realizados, sua geologia ainda é motivo de intensa discussão no meio científico. É de consenso que a região apresenta duas bacias sedimentares separadas pela feição geológica denominada Lineamento Pernambuco. Esse lineamento tem uma direção Leste-Oeste, perpendicular à costa, próximo ao UTM 9.105.000 Sul.

O Lineamento Pernambuco separa duas bacias sedimentares: a norte a Bacia Paraíba (anteriormente, Pernambuco-Paraíba) e a sul, até o Alto Estrutural de Margogi (AL), a Bacia Pernambuco (anteriormente, Bacia Vulcano-sedimentar do Cabo) (Lima Filho, 1998). Ainda segundo Lima Filho (1998), a Bacia Pernambuco pode ser dividida em outras duas sub-bacias separadas pelo Alto Estrutural Cabo de Santo Agostinho. A sub-bacia Norte, encaixada no Graben de Piedade, caracteriza-se da base para o topo por sedimentos imaturos da Formação Cabo, vulcanitos da Suíte Ipojuca, um pacote de arenitos friáveis da Formação Algodoads, a Formação Barreiras e por fim uma camada extensa de sedimentos quaternários. A sub-bacia Sul encaixada no Graben do Cupe (ou Graben de Tamandaré) é composta não somente pelas formações ocorrentes na porção Norte como também por rochas carbonáticas da Formação Estiva. A Bacia da

Paraíba, por sua vez é constituída por arenitos na base (Formação Beberibe), seguida por calcários (Formação Gramame e Maria Farinha) e depósitos recentes da Formação Barreiras. A Figura 4.2 apresenta uma coluna estratigráfica resumindo a geologia da região.

IDADES		Bacia Cabo	Bacia PE/PB	Litologia	
		Unidade Estratigráfica			
Quaternário	Holoceno	Recifes		Arenitos com Cimentação Carbonática	
		Mangues		Areias finas, Siltes e argilas orgânicas	
		Depósitos Flúvio-Lagunares		Areias, siltes e argilas orgânicas	
		Terraços Marinhos Holocênicos		Areias de praia com conchas	
		Terraços Marinhos Pleistocênicos-Modificados		Areias de praia com intercalações de argilas orgânicas	
		Terraços Marinhos Pleistocênicos		Areias de Praia com cimentação por ácido húmico e Fe ₂ O ₃	
Terciário	Pleistoceno	Fm. Barreiras		Areias quartzosas a subarcosianas de coloração creme	
	Plioceno			Areias quartzosas a subarcosianas, com cores vivas variando entre o alaranjado, vermelho e roxo em função dos diferentes estágios de oxidação do ferro.	
	Mioceno			Argilas maciças e siltes, de cores variadas.	
	Oligoceno			Diamictitos, com densidade de cascalho/seixos, onde a matriz é geralmente constituída por material argilo arenoso avermelhado.	
	Eoceno				
Cretáceo	Paleoceno	?	Fm. Maria Farinha	Seção inferior com calcários detríticos, relativamente puros, e um seção superior no qual os calcários são margosos, aparecendo também as intercalações argilosas.	
	Maastrichtiano			Toda a sequência é bastante fossilífera de macrofósseis e microfósseis.	
	Campaniano			Sequência de calcários margosos até argilosos, de coloração cinza. O conteúdo fossilífero é variado, porém em relação aos macrofósseis não muito abundante.	
	Santoniano			Arenitos médios a finos com cimentação carbonática. Calcarenitos quartzosos. Siltitos e argilitos.	
	Coniaciano			Arenitos continentais quartzosos, médios a finos, com intercalações de siltitos e folhelhos.	
Cretáceo	Turoniano	Fm. Algodoais	?	Arenitos friáveis, maciço, composto de fragmentos angulosos de quartzo e feldspato em matriz mais fina areno-argilosa, com cor avermelhada.	
	Cenomaniano	Fm. Estivas		Suíte Ipojuca - Rochas vulcânicas de composição variável, desde básica - basaltos, andesitos e traquitos até ácidas - riolitos, apresentando-se como derrames, sills, plugs e diques.	
	Albiano			Fm Estiva - Arcósios carbonáticos na base, crescendo verticalmente a participação até caracterizar, no topo, margas e calcários dolomíticos fossilíferos.	
	Aptiano	Fm. Cabo		Fm Cabo- Conglomerados polimíticos de matriz arcoseana arcósios, siltitos, argilitos e arenitos.	
	Pré-Cambriano			Embasamento Cristalino	Granitos, granodiorito, gnaisses e migmatitos.

Figura 4.2 – Coluna estratigráfica da área de estudo (Lima Filho, 1998)

Segundo essas descrições o Embasamento Cristalino tem a configuração apresentada por “horsts” e “grabens” sucessivos, conforme mostra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Perfil estrutural das Bacias Cabo e Pernambuco-Paraíba (Costa, 2008).

Recentemente Maia (2011, 2012) e Maia *et al* (2012) subdividiram a Formação Cabo em outras três: Cabo, Suape e Paraíso. Segundo essa descrição a Formação Cabo corresponde à porção inferior da antiga Formação Cabo, sendo constituída por uma matriz arenosa inconsolidada (quartzos angulosos, feldspatos etc) com depósitos de conglomerados polirítmicos intercalados com areias arcoseanas contendo seixos de granitos, gnaisses, xistos, anfibólios e pegmatitos. A Formação Suape apresenta-se como uma camada de arenitos arcoseanos finos a médios alternadas com camadas argilosas verdes (avermelhadas quando sofrem intemperismo). Em geral essa formação ocorre sobre a Formação Cabo, podendo ser encontrada diretamente sobre o embasamento cristalino na região do bairro de Boa Viagem. A Formação Suape apresenta maior variabilidade litológica que a Formação Cabo, podendo ser encontrados minerais de terras raras (Gd, Eu e Dy). A Formação Paraíso é composta por arenitos arcoseanos finos a médios intercalados com camadas argilosas ciclicamente depositadas. Uma descrição mais detalhada das recentes descrições geológicas está sendo preparada (Hirata et al, em preparação).

4.2 – Contexto hidrogeológico

Dentre a complexa geologia local constam cinco domínios hidrogeológicos, sendo eles:

- I. Aquífero Fissural;
- II. Aquífero Beberibe;
- III. Sistema Aquífero Cabo;
- IV. Aquífero Boa Viagem;
- V. Aquífero Barreiras.

4.2.1 – Sistema Aquífero Cabo (SAC)

O Sistema Aquífero Cabo (SAC) é composto pelas formações Cabo, Suape e Paraíso. Nesse sistema há dois aquíferos: o Aquífero Cabo e Aquífero Suape, correspondendo respectivamente às formações Cabo e Suape. A Formação Paraíso atua juntamente com a Formação Estivas (localmente) como um aquitarde, isolando o SAC dos aquíferos superficiais.

O SAC estende-se por cerca de 100 km, desde o município de Ipojuca até o sul do Lineamento Pernambuco (Bairro do Pina, Figura 4.1). Em toda sua extensão ocorre sotoposto ao Aquífero Boa Viagem. Alguns autores indicam que esse aquífero aflora em uma pequena área de 5,5 km² na Região do Barro (Figura 4.1) (Borba *et al.* 2010).

O Sistema Aquífero Cabo é o segundo mais explorado da RMR, constituindo juntamente com o Aquífero Beberibe a principal fonte de água subterrânea na região. Apesar de sua intensa exploração, a unidade aquífera é de baixa vocação hidrogeológica, uma vez que em toda sua ocorrência há presença de argila, bem como lentes silto-argilosas. Tal variação faciológica ocorre tanto vertical quanto horizontalmente, o que resulta na elevada heterogeneidade do aquífero. Poços perfurados no aquífero Cabo na região de Boa Viagem apresentam vazões inferiores a 5 m³/h, sendo que em alguns locais a vazão não ultrapassa 2 m³/h (SINGRE II, 2001). As características hidráulicas dos Aquíferos Cabo e Suape não são tratadas de forma individual, primeiramente porque os poços perfuram toda o sistema aquífero tendo

filtros nos dois aquíferos; outro motivo para essa indistinção é a dificuldade de estabelecer com precisão os limites dos dois aquíferos.

4.2.2 – Aquífero Beberibe

O Aquífero Beberibe é o mais importante aquífero em termos de abastecimento de água em toda a faixa costeira de Pernambuco (Borba *et al* 2010). Dentre os aquíferos que são objetos dessa pesquisa, ele é o único que faz parte da Rede Básica de Monitoramento das Águas Subterrâneas (RIMAS), implementada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e que monitora a evolução de diversos reservatórios de água subterrânea para subsidiar políticas públicas.

Observando-se critérios litológicos, o Aquífero Beberibe foi subdividido em duas sub-unidades: Aquífero Beberibe Inferior e Aquífero Beberibe Superior (Costa *et al.* 2008). O primeiro caracteriza-se por ser essencialmente composto de arenitos de granulações variáveis com raras intercalações de siltitos e folhelhos, e pode ser considerado como a unidade principal em termos de armazenamento e exploração do Aquífero Beberibe. O Aquífero Beberibe Superior caracteriza-se por arenitos duros de origem marinha com grande presença de cimentação calcífera. Como não há separação definida entre as duas subunidades, o sistema todo é tratado como um único aquífero de comportamento confinado e forte anisotropia.

Na cidade de Recife, o Aquífero Beberibe ocorre sotoposto aos sedimentos recentes do Aquífero Boa Viagem. Mais próximo à região de Olinda (norte de Recife), o aquífero Barreiras e calcários da Formação Gramame (em alternância) ocorrem sobrepostos ao Aquífero Beberibe (Borba *et al.* 2010). Estudos do Setor de Geologia da COMPESA indicam que parte da recarga do Aquífero Beberibe na região norte ocorre por drenança vertical descendente através de fraturas nos calcários da Formação Gramame. Tais estudos também admitem a possibilidade de haver recarga do Aquífero Beberibe por drenança do Aquífero Barreiras na porção ocidental.

Os poços explotados pela COMPESA nesse aquífero operam com vazões médias de 50 a 70 m³/h, mas existem poços nesse aquífero que podem atingir 400 m³/h de vazão.

4.2.3 – Aquífero Boa Viagem

Apesar dos intensos estudos geológicos realizados na região de Recife, apenas em 1990 foi dada maior atenção à porção superficial (denominada Sedimentos Indiferenciados), correspondente aos sedimentos recentes (Quaternário) do então denominado Aquífero Boa Viagem (Costa & dos Santos 1990).

Essa unidade aquífera é formada por aluviões, terraços fluviais, terraços marinhos, areias de praia, paleomangues e dunas antigas. Localiza-se na região deltaica dos rios Capibaribe, Beberibe e Tejipió, e forma a atual planície do Recife, encobrindo os aquíferos Beberibe (ao norte), Cabo (ao sul) ou assentando-se diretamente sobre o embasamento cristalino na porção oriental da cidade. Esses depósitos sedimentares possuem espessura média de 50 m, chegando a no máximo 80 m, próximo à região de Boa Viagem.

As captações de água nesse aquífero são feitas através de poços rasos (até 20 m) perfurados a trado, poços amazonas e cacimbas, os quais operam com vazões inferiores a 1 m³/h. Contudo poços tubulares perfurados nesse aquífero podem chegar a fornecer vazões superiores à 20 m³/h.

Ante esses dados poder-se-ia concluir que essa unidade aquífera seria um excelente reservatório de água para a região. Contudo as águas desse sistema apresentam padrões microbiológicos em desacordo com a atual legislação de potabilidade, alta salinidade e forte sabor e odor. Apesar dessas características, a população faz uso dessa água para irrigação e limpeza, mas não se pode descartar que, no cenário atual de abastecimento, populações carentes possam fazer outros usos para essa água.

Apesar da menor importância aparente desse aquífero, ele tem um papel na dinâmica dos aquíferos a ele sotopostos. Sua influência sobre os outros aquíferos, bem como suas características espaciais ainda não estão totalmente definidas, o que o faz alvo de diversos trabalhos e intensa discussão na comunidade científica (Bertrand *et al* em preparação).

4.2.4 – Aquífero Fissural

O embasamento cristalino pré-cambriano é constituído por rochas cristalinas, vários eventos tectônicos (e.g. megacisalhamento do Lineamento Pernambuco e suas ramificações) fraturaram as rochas, possibilitando assim que a unidade atue como um reservatório de água.

Como as rochas do embasamento são predominantemente graníticas e migmatíticas suas fraturas ocorrem com maior abertura e menor intensidade (menor quantidade de planos). A capacidade aquífera dessa formação provavelmente reside no conjunto de fraturas com direção NE-SW que nela predominam. Contudo esse não pode ser considerado o fator determinante visto que esse conjunto de rochas apresenta elevado heterogeneidade e anisotropia quanto à densidade e intensidade de fraturas (SINGRE II 2001).

O uso da água do Aquífero Fissural é bem restrito, visto que ele ocorre de maneira tímida na RMR, restringindo seu uso a apenas poucas propriedades rurais. Contudo o entendimento da dinâmica dessa unidade aquífera é importante para a pesquisa da hidrogeologia local, pois suas águas influenciam os aquíferos a ele sobrepostos. Para citar sua importância, no desenvolvimento do projeto COQUEIRAL encontraram-se evidências primárias que indicam que a água do aquífero Cabo pode ser proveniente, em parte, de recarga pelo sistema fraturado. Assim o entendimento desse aquífero torna-se importante no contexto hidrogeológico.

4.2.5 – Aquífero Barreiras

A Formação Barreiras ocorre regionalmente ao redor de toda a planície do Recife de forma descontínua no formato de morros. Constitui-se por sedimentos areno-argilosos dispostos em camadas bem estratificadas com espessura média de 40 m.

Como aquífero, sua exploração é baixa. Poços nesse aquífero possuem vazão específica média de 1,9 m³/h/m, sendo que as vazões podem chegar a 13 m³/h na região de Ibura, e 3 m³/h na região de Aldeia (Figura 4.1). Esse aquífero pode assumir

importância local ao norte, mas sua abrangência na RMR é pequena e sua exploração é pouco desenvolvida.

A tabela 4.2 apresenta a correlação entre as unidades hidrogeológicas e parâmetros hidrodinâmicos.

Tabela 4.2 – Unidades hidrogeológicas e dados hidrodinâmicos da área de pesquisa (Hirata *et al. em preparação*)

Idade	Unid. Geológica	Aquífero/ aquitarde		Denominaçã o antiga	Observações	Transmissividade média (valores max e min)	Condutividade Hidráulica	Porosida de Efetiva	Armazenamento
Pleistoceno / Holoceno	Pleistocene / Holocene sediments	Boa Viagem		Boa Viagem		$7,0 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($3,16 \times 10^{-2}$ - $1,86 \times 10^{-5}$)	$1,7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$	$1,0 \times 10^{-1}$	-
Oligoceno / Eoceno	Barreiras	Barreiras		Barreiras		$1,7 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ($4,05 \times 10^{-3}$ - $3,61 \times 10^{-4}$)	$3,4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$5,0 \times 10^{-2}$	-
Maastrichtiano / Campaniano	Algodoais	Algodoais		-	Aquífero muito restrito	-	-	-	-
Turoniano / Cenomaniano	Estiva	Estivas		-	Um aquítarde local	-	-	-	-
Albiano	Ipojuca	-		-	Rochas vulcânicas	-	-	-	-
	Paraíso	Sistema Cabo	Paraíso	Cabo Superior	Um aquítarde local	$8,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ (4×10^{-3} - 3×10^{-6})	$1,0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$	$7,0 \times 10^{-2}$	$1,0 \times 10^{-4}$
	Suape		Suape						
Aptiano	Cabo		Cabo	Cabo Inferior	Ocorrência restrita na área				
Pre- Cambriano	Muitas unidades diferentes	Fissural		Fissural	Rochas fraturadas e alteradas	-	-	-	-

4.3 – Delimitação da área de pesquisa

Esse estudo teve como objeto o Aquífero Cabo na cidade de Recife. Apesar de o Aquífero Beberibe ser o mais importante em termos de volume de extração, é no Aquífero Cabo que se encontra a maior densidade de poços. A exploração no Aquífero Beberibe é feita pela COMPESA e algumas empresas, caracterizada por poucos poços com altas vazões. Já o Aquífero Cabo caracteriza-se por milhares poços com vazões menores. Dessa forma esse aquífero mostrou-se ideal para estudos sobre superexploração de águas subterrâneas. Os outros aquíferos da região não tem exploração de água expressiva. A figura 4.4 delimita a área de pesquisa.

Figura 4.4 – Delimitação da área de pesquisa desse estudo.

4.4 – Modelo hidrogeológico da área de pesquisa

O modelo geológico utilizado é fruto do Projeto COQUEIRAL (Hirata *et al. em preparação*). Esse modelo tem como base as premissas que se seguem:

- o sistema aquífero é composto pelo embasamento cristalino fraturado, sobreposto ao aquífero confinado (aquíferos Cabo e Beberibe), os quais são isolados do aquífero superficial (Aquífero Boa Viagem) por uma camada descontínua de argila;
- Sistema Aquífero Cabo isola-se do Aquífero Beberibe por um alto estrutural coincidente com o Lineamento Pernambuco. De forma similar, o Aquífero Cabo isola-se do oceano por conta de um alto estrutural.

A figura 4.5 traz um esquema do modelo hidrogeológico considerado nessa pesquisa.

Figura 4.5 – Modelo hidrogeológico esquemático da área de pesquisa.

No âmbito do projeto COQUEIRAL a temperatura de recarga das águas foi inferida por meio da medição da concentração de gases nobres e CFC e SF₆ (Chatton, 2013; Hirata *et al. em preparação*). A temperatura de recarga inferida foi em média de 15°C para os aquíferos profundos (Cabo e Beberibe) e em média 24°C para o aquífero superficial (Boa Viagem). Dado que a temperatura média atual em Recife é de 25°C, o

resultado indica recarga recente no aquífero superficial. Para os aquíferos profundos a temperatura de recarga foi relacionada à última glaciação (10 a 15 mil anos), similarmente ao encontrado por Stute (1995 a, b).

Nesse intervalo de tempo (i.e. 6 a 2 mil anos) a região onde hoje é Recife esteve inundada por águas do mar (Dominguez *et al* 1990). Dessa forma se as águas do Aquífero Cabo não se salinizaram na época há um forte indício que o aquífero encontra-se protegido das águas superficiais pelos aquitardes Paraíso e Estivas.

A recarga no Sistema Aquífero Cabo provavelmente ocorre através do embasamento cristalino intemperizado que aflora a oeste de Recife. Costa *et al.* (1998) defende que a recarga do SAC ocorre numa pequena área de 5,5 km² onde provavelmente a formação geológica aflora. Entretanto a recarga do aquífero não deve se dar exclusivamente por aquela região, uma vez que a região é muito pequena frente às dimensões do aquífero e, caso fosse correto, o ingresso rápido das águas não permitiria que a idade das águas do Cabo tivessem milhares de anos.

Por meio dos dados hidráulicos do Sistema Aquífero Cabo pode-se estimar uma velocidade média das águas de 0,7 m/ano e tempo total de trânsito podendo superar a 20 mil anos desde a área de recarga até as elevações do embasamento no mar, a 4 km de distância da linha de costa.

Este modelo de circulação é também corroborado pelos dados de isótopos estáveis, que mostram que as águas do Cabo possuem assinaturas muito marcadas e com pouca dispersão, a despeito de sua distribuição na área de estudos. Mesmo o bombeamento bastante intenso em algumas partes da cidade, não tem provocado mudanças na assinatura isotópica. Já com relação à hidrogeoquímica, as águas do SAC também mostram uma assinatura compatível com as rochas desse aquífero e distinta das outras águas (Hirata *et al em preparação*).

Para haver esse isolamento do aquífero superficial o fluxo entre o SAC e o Aquífero Boa Viagem deve ser ascendente, caso contrário poderia haver salinização no SAC nos períodos de transgressão marinha. Esse fato é corroborado pela região de recarga mais elevada (Embasamento Cristalino). Segundo os preceitos apresentados, a

figura 5.6 traz o modelo hidrogeológico e os fluxos naturais considerados no escopo desse trabalho.

Figura 4.6 – Modelo hidrogeológico do Sistema Aquífero Cabo com fluxos naturais.

5 – Metodologia

Para realização deste trabalho foram utilizados dados de cadastramento de poços e análises químicas disponíveis na base de dados do Projeto COQUEIRAL, a qual conta com dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e base de dados de projetos anteriores (e.g. HidroRec I e II, LAMEGO etc). Além dos dados históricos, foram realizadas campanhas de amostragem a fim de obter-se uma caracterização atual da área de pesquisa, bem como realizarem-se análises diferentes das anteriores.

5.1 – Dados históricos

O banco de dados do Projeto COQUEIRAL conta com cadastro de 6212 poços, 979 medidas de condutividade elétrica, dados de 19601 análises químicas em poços da RMR e dados de endereço, proprietário, data de perfuração, profundidade, diâmetro, nível estático e dinâmico, tipo de bomba, aquífero explotado, vazão entre outros.

O bando de dados no formato Microsoft Access® foi disponibilizado pela empresa Geo-Hyd, parceira no projeto COQUEIRAL. De posse desse banco de dados foi

possível gerar análises históricas de parâmetros tais quais mapas potenciométricos, mapas de condutividade elétrica, mapas de densidade de poços entre outros. Para gerar os mapas foi utilizado os softwares ArcGis® 10.0 e Surfer® 11.

Para os mapas onde de maior densidade de dados a cidade de Recife foi dividida em quadrículas de 500 m por 500 m, totalizando uma quadrícula com 0,25 km². Foi realizada a estatística para cada quadrícula (número de dados, média, mediana, desvio padrão). Os resultados foram expressos utilizando a mediana, pois assim representam com maior fidelidade o comportamento da quadrícula.

As avaliações sobre bombas foram feitas utilizando-se o software fornecido pelo fabricante Ebara® (ESB-BR Ver 1.0, disponível em www.ebara.com.br). Nesse programa é possível ajustar as condições de bombeamento e assim obter as bombas que atendem àquelas condições. Vale ressaltar que as bombas fornecidas por esse fabricante são muito similares às outras existentes no mercado, tendo sido utilizadas nesse estudo apenas pela conveniência da utilização do software.

5.2 – Campanhas de amostragem

Foram realizadas duas campanhas de amostragem de água, a primeira em setembro de 2012 e a segunda em março de 2013. As datas foram escolhidas para abranger a estação das chuvas e estação seca e assim abranger o comportamento da região ante as variações sazonais. Para o planejamento das campanhas de amostragem utilizou-se o banco de dados do Projeto COQUEIRAL. Dessa maneira, utilizando fatores como localização, condutividade elétrica e razão Na^+/Cl^- , pode-se escolher os pontos de amostragem de forma a abranger tanto espacialmente quanto hidroquimicamente toda a região estudada.

A primeira campanha de amostragem foi realizada de 10 a 14 de setembro de 2012 e a segunda campanha do dia 11 ao dia 15 de março de 2013. Na primeira campanha foram amostrados 62 pontos, sendo 59 de água subterrânea e três de água superficial, já

na segunda campanha foram coletadas 61 amostras, sendo sete de água superficial e 54 e água subterrânea.

A amostragem iniciava-se com um questionário aplicado ao responsável pelo poço, nesse questionário eram obtidos dados sobre características e uso do poço (e.g. frequência do uso, última utilização, procedimentos e data da última limpeza do poço, uso da água etc).

A água era coletada na primeira saída do poço, antes de qualquer tratamento. Os frascos eram lavados três vezes com a amostra. No campo os parâmetros físico-químicos (pH, potencial redox, oxigênio dissolvido, temperatura e condutividade) eram medidos com uma sonda multiparamétrica YSE[®] Professional PLUS. Garantia-se que pelo menos um volume de poço fosse extraído antes da coleta.

Para cátions maiores, elementos traço, terras raras foram coletados 100 mL de amostra, os quais eram previamente filtrados em filtro de porosidade 0,45 μm , acidificados com ácido nítrico concentrado ultrapuro e lacrados. Para ânions eram coletados 100 mL de amostra filtrada sem acidificação. Para isótopos de boro o valor de condutividade elétrica era observado, caso este fosse menor que 1000 mS/cm^2 era coletado 500 mL de amostra filtrada, caso maior que 1000 mS/cm^2 era coletado 1 L de amostra filtrada.

Para sulfato era realizada em campo uma análise semi-quantitativa do conteúdo desse ânion, o volume de amostra era determinado a partir da concentração de sulfato. Para isótopos de ^2H e ^{18}O foram coletados dois frascos de vidro âmbar contendo 20 mL de amostra bruta tomando cuidado para que no frasco não restasse nenhuma bolha de ar.

Para a coleta de amostras para gases (N_2 , gases nobres, SF_6 e CFC) foram utilizadas ampolas de aço previamente evacuadas, essas era preenchidas de forma a não formar bolhas em seu interior então fechadas com duas válvulas (uma em cada extremidade da ampola).

Nos laboratórios da USP foram analisados os cátions e ânions maiores, elementos traço e isótopos estáveis de hidrogênio e oxigênio (i.e. Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Li^+ , Mn^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , NO_2^- , NO_3^- , HPO_4^{2-} , Br^- , F^- , $\delta^{18}O$ e δ^2H); nos laboratórios do BRGM foram analisados terras raras e isótopos de estrôncio, boro e enxofre e oxigênio presentes no ânion sulfato ($\delta^{11}B$, $\delta^{87}Sr/\delta^{86}Sr$, $\delta^{34}S$ e $\delta^{18}O$ do SO_4^{2-}).

As concentrações de ânions e cátions foram obtidas por meio da técnica de cromatografia iônica num cromatógrafo de íons DIONEX ICS-90 e DIONEX ICS-900, respectivamente, no laboratório de Hidroquímica do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS), do Instituto de Geociências – USP.

A determinação de elementos traço foi feita via absorção atômica utilizando um espectrômetro de absorção atômica GBC 932 PLUS no Laboratório de Hidroquímica do Centro de Pesquisa de Águas Subterrâneas (CEPAS), do Instituto de Geociências – USP.

As medidas de alcalinidade foram feitas por titulometria, utilizando-se volume conhecido de amostra, ácido sulfúrico de concentração conhecida (i.e. 0,01N ou 0,001N) e indicador misto (solução alcoólica de verde de bromocresol e vermelho de metila)

As razões isotópicas foram obtidas no Laboratório de Isótopos Estáveis do Centro de Pesquisas Geocronológicas (CPGeo) do Instituto de Geociências – USP. O

equipamento utilizado foi um espectrômetro de razão isotópica (IRMS, em inglês) Delta Plus Advantage (Thermo Finnegan), para a determinação do $\delta^{18}\text{O}$ o equipamento é acoplado a um Gas Bench II (Thermo Finnigan), já para os isótopos de H é acoplado a um H Device (Thermo Finnigan); em ambos os casos um amostrador automático GC-PAL (CTC Alalysis) também era utilizado.

Os resultados das determinações de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ foram corrigidas utilizando padrões internacionais e internos (determinados contra padrões internacionais). Os padrões usados pelo laboratório incluem VSMOW-2, GISP, SLAP-2. Os resultados foram expressos na notação delta (δ) e expressos em per mil (‰). O desvio instrumental informado pelo fabricante é de 0,08 ‰ para $\delta^{18}\text{O}$, sendo desvios interamostras de até 0,1 ‰; o desvio instrumental para $\delta^2\text{H}$ é de 0,2 ‰, sendo os desvios interamostras comumente 0,5 – 0,8 ‰ e podendo chegar até a 1‰. As análises são realizadas em triplicata e seu desvio padrão é determinado. Informações suplementares podem ser encontradas no manual do equipamento (Thermo Finnigan Operation Manual, 2004) e na literatura científica (Mook, 2000).

As análises de SF_6 e CFC foram realizadas num cromatógrafo a gás Agilent 3000A Micro GC, segundo o método estabelecido por Sugisaki (1987) e descrito por Chatton (2013).

A Tabela 5.1 resume todos os procedimentos de amostragem e equipe responsável pela análise.

Por fim foi realizada uma terceira etapa de campo, a qual ocorreu de 24 a 28 de março de 2014. Essa campanha de amostragem teve como objetivo caracterizações

geofísicas, amostragem de águas em diferentes profundidades e amostragem de poços em áreas selecionadas com base nos resultados das campanhas anteriores.

A caracterização geofísica deu-se por meio da obtenção dos perfis de radiação gama natural, do perfilamento acústico, da perfilagem de calibre de poço (caliper) e medições de direção de fluxo da água no poço. Para tanto foram utilizados os equipamentos: 1) sonda 3-Arm Caliper-Gamma Probe (Robertson Geologging) para caliper e radiação gama natural; 2) High Resolution Acoustic Televiewer (Robertson Geologging) para perfilagem acústica; 3) Heat Pulse Flow Meter (Robertson Geologging) para aferição da direção e velocidade do fluxo. Para descer cada sonda no poço foi utilizado um guincho e cabos de conexão apropriados (Robertson Geologging).

Para amostragem de água em diversas profundidades foi utilizada uma bomba submersa da marca Grundfos modelo MP-1. O sistema bomba e mangueiras foi descido no poço ajuda de um guincho. No momento da coleta os parâmetros físico-químicos (pH, Eh, condutividade elétrica, temperatura, oxigênio dissolvido) eram aferidos e a água só era amostrada após estabilização desses parâmetros.

Dessa forma caracterização geofísica e amostragem de água foram feitas em três poços (Almirantina, CPRM e TendTudo), no poço Cab-006 (amostrado em campanhas anteriores) foi realizada somente a caracterização geofísica. Foram amostrados ainda um poço multi-nível (Duplo Pina) e um poço salinizado distante da costa (Norvidro); por fim ainda foi obtida uma amostra representativa da água dos mangues. A Tabela 5.2 traz um sumário da 3ª campanha, a Figura 5.1 traz um mapa com os pontos amostrados nas três campanhas.

Tabela 5.1 – Resumo dos métodos de amostragem e análise

Parâmetro medido	Tipo de investigação		Tipo de frasco	Tratamento da amostra	Técnica de análise	Unidade	Equipe responsável
Ions (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , NH ₄ ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Li ⁺ , Mn ²⁺ , Cu ²⁺ , NO ₂ ⁻ , NO ₃ ⁻ , HPO ₄ ²⁻ , Br ⁻ , F ⁻)	Interação	água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de polietileno de 100 mL	Filtração 0.45 µm, acidificação com ácido nítrico ultrapuro	Cromatografia iônica	mg/L	USP
Sr, Rb, B, Pb, U, Cr, Ni	Interação	água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de polietileno de 100 mL	Filtração 0.45 µm, acidificação com ácido nítrico ultrapuro	ICP-MS	µg/L	BRGM
δ²H, δ¹⁸O	Origem da água, misturas e evaporação		Vial de vidro âmbar de 20 ml	Nenhum	Espectrometria de massas	% vs Standard Mean Ocean Water	USP
⁸⁷Sr/⁸⁶Sr	Interação	água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de polietileno de 100 mL	Filtração 0.45 µm, acidificação com ácido nítrico ultrapuro	Espectrômetria por termo-ionização	-	BRGM
δ¹¹B	Interação	água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de polietileno de 500 ou 1000 mL	Filtração 0.45 µm,	Espectrômetria por termo-ionização	% vs SRM 951	USP
²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb	Interação	água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de descontaminado de 1000 mL	Filtração 0.45 µm, acidificação com ácido nítrico ultrapuro	Espectrômetria por termo-ionização	-	USP

Elementos de terra rara	Interação água-rocha, contaminação, salinização	Frasco de polietileno de 100 ou 250 mL	Filtração 0.45 µm, acidificação com ácido nítrico ultrapuro	ICP-MS	ng/L	BRGM
$\delta^{34}\text{S}$ e $\delta^{18}\text{O}$ do SO_4^{2-}	Interação água-rocha, contaminação, salinização, processos biogeoquímicos	Frasco de polietileno de 100, 500, 1000, ou 2000 mL de acordo com a concentração de SO_4^{2-}	Adição de 25 mL/L de acetato de cádmio	EA-IRMS	‰ vs Standart Mean Ocean Water and Canyon Diablo meteorite	BRGM
Ar, Ne, N₂	Temperatura de recarga	Garrafas de vidro de 500 mL	Nenhum	Micro cromatografia	CCSTP/g ou mol/L	OSUR/Rennes University
CFC-11, -12 e -113	Datação	Ampolas de aço de 30 mL	Nenhum	Cromatografia	Mol/L	OSUR/Rennes University
SF₆	Datação	Ampolas de aço de 300 mL	Nenhum	Cromatografia	Mol/L	OSUR/Rennes University
^3H	Datação e contaminação por lixões	Frasco de polietileno de 500 mL	Nenhum	Cintilação líquida		BRGM
^{14}C	Datação	Frasco de polietileno de 1000 mL	Nenhum	AMS		BRGM

Tabela 5.2 – Sumário dos pontos de amostragem da 3ª campanha.

Poço	Profundidade	Nível	Prof.	Geofísica?	Amostragem	Amostragem m de água?	Coordenadas	
		piezométrico	Amostragem				Leste	Norte
Almirantina	82m	-22	48m/78m	Sim	Sim		287499,3 12	9109892,1 2
CPRM	--	-50	102m/114m	Sim	Sim		290144,1 98	9106184,5 9
TendTudo	112m	-23	94m/110m	Sim	Sim		289358	9102059
Cab-06	159m	--	--	Sim	Não		291373	9103389
DuploPina*	10m/110m/180 m	-2,33m/- 41,3m/43,23m	--	Não	Sim		292433,2 22	9104953,3 2
Norvidro	66m	--	--	Não	Sim		284049	9098193
Mangue	--	--	--	Não	Sim			

*trata-se de um poço multi-nível, portanto 3 profundidades.

Figura 5.1 – Localização dos pontos de amostragem nas três campanhas do Projeto COQUEIRAL.

6 – Superexploração em Recife

6.1 – Caracterização do bombeamento e fluxos de água em Recife

Por conta das faltas d'água históricas, em Recife é comum que cada grande empreendimento (e.g. condomínios, hotéis, hospitais, indústrias, shoppings etc.) tenha pelo menos um poço. Quando ocorre queda na qualidade da água do poço, a solução dos usuários é perfurar novos poços, elevando o seu número. Estimam-se que em Recife haja 15 mil poços perfurados, desse número 6209 estão cadastrados na base de dados do projeto COQUEIRAL. O restante está inoperante, não foi cadastrado ou se desconhece.

Os poços são perfurados preferencialmente nos aquíferos Cabo, Beberibe e Boa Viagem, como evidenciado na Figura 6.1, a qual traz a percentagem de poços por aquífero conforme consta na base de dados COQUEIRAL. Na mesma figura ainda é possível notar que a maior parte dos poços (28 %) não tem informações a respeito do aquífero explorado, refletindo diretamente a forma desordenada e mal gerida que ocorreu a expansão da rede de poços da cidade.

Figura 6.1 – Distribuição de poços do aquífero na cidade de Recife de acordo com a base de dados COQUEIRAL.

É sabido que a região à beira-mar (bairros de Boa Viagem e Pina, Figura 4.1) são regiões com alto número de poços, sendo seguidas pela área central da cidade (bairros de Torre, Aflitos, Prado, Derby), sendo essas as regiões que concentram a maior parte

dos condomínios e serviços da cidade (shoppings, hospitais etc). A Figura 6.2 mostra o número de poços por quadrícula de 500 m por 500 m (0,25 km²), onde é possível confirmar que as regiões de maior densidade de poços são a beira-mar e a região central.

Figura 6.2 – Número de poços por 0,25 km² na cidade de Recife.

Os poços da região de alta concentração à beira-mar exploram os aquíferos Cabo e Boa Viagem (predominância do primeiro). Por sua vez os poços na região

central estão localizados acima do Lineamento Pernambuco, explorando os Aquíferos Beberibe e Boa Viagem (predominância do primeiro).

Analisando a Figura 6.2, nota-se a ubíqua presença de poços por toda a cidade, uma vez que praticamente em toda ela tem-se pelo menos um poço a cada 0,25 km² (equivalente a 4 poços por km²). Isso caracteriza uma alta densidade geral de poços em Recife. Considerando os poços cadastrados na base de dados do projeto COQUEIRAL, em Recife e Olinda (região de maior concentração populacional) há 5970 poços, caracterizando uma densidade de 22,95 poços por km². De uma forma geral, na RMR são estimados cerca de 15 mil poços, como quase a totalidade dos poços da RMR está em Recife e Olinda, pode-se projetar que a densidade de poços na região possa alcançar 57,66 poços por km².

É importante notar que a situação de Recife é totalmente anômala em comparação ao observado em outras grandes cidades brasileiras. A fim de comparação, em São Paulo na Bacia do Alto Tietê estima-se que hajam 12 mil poços (Conicelli, 2014) atendendo uma população de 18 milhões de pessoas; na RMR são 15 mil poços atendendo 3,9 milhões de pessoas. A Bacia do Alto Tietê ocupa uma região de aproximadamente 431,96 km² contabilizando uma densidade geral de 27,78 poços por km². Considerando que somente parte dos poços existentes esteja cadastrados na base de dados COQUEIRAL, a densidade de poços em Recife supera a densidade de poços encontrada em São Paulo, região de maior concentração populacional do Brasil.

Recife tem uma antiga história com a perfuração de poços, a exemplo, na base de dados COQUEIRAL existem poços que datam de 1905. A Figura 6.3 traz o histórico de perfuração desde 1905 até 2002, compreendendo 2498 poços.

Figura 6.3 – Evolução do número de poços em Recife. Equação da curva: $0,0279x^3 + 0,2278x^2 - 0,2032x + 22,284$, $R^2 = 0,9964$.

É evidente o aumento crescente no número de poços, o qual foi mais bem modelado com uma equação polinomial de terceiro grau. Vale ressaltar que o gráfico apresentado é apenas qualitativo, uma vez que nele constam dados de apenas 2498 poços de um universo estimado de 15 mil. Apesar disso pode-se observar que até a década de 70 as perfurações eram insipientes e erráticas. A década de 70 começa a consolidar algumas perfurações (média anual de 36 poços). Na década de 80 a ritmo das perfurações se intensifica, atingindo, segundo o gráfico, 60 poços por ano. Na década de 90 as perfurações mais que dobram, chegando ao patamar de 143 poços por ano. No gráfico é possível notar o evidente aumento nas perfurações no biênio 1998-1999 devido às severas estiagens que atingiram a região nessa época.

Apesar de não existirem estudos recentes sobre o balanço hidrogeológico na RMR, Costa e Costa Filho (2001, 2004) apresentam o balanço hídrico entre as entradas e saídas de água nos aquíferos da RMR e ressaltam que o resultado é positivo em alguns domínios hidrogeomórficos e negativos em outros. O balanço foi avaliado diminuindo os exutórios naturais e artificiais da recarga anual. O balanço entre potencialidade e disponibilidade apresenta um déficit de $1,75 \text{ m}^3/\text{s}$ nos aquíferos da Planície do Recife, um superávit $0,57 \text{ m}^3/\text{s}$ nos aquíferos da Planície de Jaboatão dos

Guararapes, um déficit de $1,39 \text{ m}^3/\text{s}$ no aquífero Beberibe Inferior em Olinda e um superávit de $0,48 \text{ m}^3/\text{s}$ no aquífero Barreiras na região dos Tabuleiros.

No que tange à vazão de exploração, os poços situados na porção norte de Recife possuem maior vazão, pois exploram o Aquífero Beberibe. Esse aquífero chega a altíssimas vazões da ordem de $300 \text{ m}^3/\text{h}$. A Figura 6.4 mostra um mapa de medianas das vazões de exploração em quadriculas de 500 m por 500 m. Comparando esse mapa com o mapa da Figura 6.2, conclui-se que as regiões de maior número de poços não correspondem às regiões de maior vazão do aquífero, sendo as maiores vazões encontradas na porção norte de Recife e em Olinda. Esse fato já era esperado, pois na região do bairro de Boa Viagem o Aquífero Cabo tem baixa vocação hidrogeológica. Na região central, é explorado o Aquífero Beberibe, sendo este o melhor da região para captação de água. Apesar disso nessa região são encontradas menores vazões nesse aquífero, denotando que próximo ao Lineamento Pernambuco (divisor entre aquífero Cabo e Beberibe) o Aquífero Beberibe tem menor transmissividade.

Figura 6.4 – Mapa de medianas de vazões.

Apesar das menores vazões, a região beira-mar e central apresentam-se como as regiões onde há a maiores vazões totais de exploração (Figura 6.5).

Figura 6.5 – Vazão total por quadrícula de 500 m por 500 m.

Na Figura 6.5 é evidenciado o efeito do elevado número de poços à beira-mar e no centro, pois mesmo nessas regiões onde o aquífero proporciona baixas vazões têm-se altas vazões totais de extração.

Esse regime de exploração agressivo impacta o aquífero, alterando sua dinâmica. Tal alteração na dinâmica natural do aquífero pode ser evidenciada por meio dos mapas potenciométricos representando as décadas de 70, 80 e 90 do Aquífero Cabo (Figura 6.6).

O mapa potenciométrico do Aquífero Cabo dos anos 70 apresenta um aquífero próximo da sua dinâmica natural, sem grandes cones de depressão e cargas hidráulicas entre 10 e -5 msnm, resultado da presença de 431 poços na região (363 perfurados na década de 70). O fluxo é em geral do continente para o mar, com exceto por alguns pontos onde já havia influência de bombeamento.

Na década de 80 foram adicionados outros 608 poços à região, configurando um cenário de 1039 poços. Nessa configuração já é possível notar o pronunciado cone de rebaixamento próximo à beira-mar, onde as cargas hidráulicas atingem -60 msnm.

Com a intensificação das perfurações de poços é atingido o patamar de 2460 poços, refletindo diretamente no padrão potenciométrico da região, onde há vários cones, com os maiores atingindo -90 msnm, alterando totalmente as direções naturais de fluxo. Essa configuração de cargas pode induzir fluxo descendente de águas do aquífero livre Boa Viagem e salinizar o Aquífero Cabo. Segundo o mapa, há um cone de rebaixamento localizado próximo à área do estuário e mangue. Dessa forma uma provável influência marinha pode dever-se ao bombeamento excessivo, combinado à maior exposição do aquífero a água do mar na zona estuarina.

Os perfis mostram o formato do cone de rebaixamento e demonstram que ocorreu o rebaixamento progressivo e intenso do nível d'água. Os perfis longitudinais (perfis AA') apresentam um comportamento mais linear, tendo um patamar à leste e um intenso rebaixamento aproximando-se da linha costeira. Por sua vez, os perfis que têm direção transversal (perfis BB') apresentam um comportamento errático, onde há sucessivas áreas de rebaixamentos e recuperação da potencimetria. Tal comportamento dos perfis BB' deve-se a que esses perfis são paralelos à linha costeira, coincidindo com a linha de edifícios que possuem a maioria dos poços da região.

Figura 6.6 – Mapas potenciométricos históricos do Aquífero Cabo (Recife). As linhas dos perfis evidenciam o cone de rebaixamento.

O rebaixamento observado é fruto do aumento na retirada de água do aquífero. O aprofundamento do cone de rebaixamento poderia decorrer devido ao aumento no número de poços ou aumento da vazão dos poços já instalados. A Figura 6.7 evidencia através do histórico da potenciomетria e densidade de poços que o fator predominante no Aquífero Cabo é o aumento no número de poços.

Como já discutido anteriormente a potenciomетria da década de 70 é o mais próximo que se pode chegar do estado natural do aquífero, entretanto, como se pode observar na Figura 6.7 na região beira-mar já existiam alguns poços em operação. Na década de 80 ocorre o aumento nos poços em operação (concentrados na orla de praia de Boa Viagem), refletindo diretamente na potenciomетria (linhas adensadas, cone de rebaixamento aprofundado). O mapa potenciométrico da década de 90 revela a tendência da concentração dos poços na região de Boa Viagem, atingindo patamares de 59 poços numa quadrícula de 250m x 250m (236 poços/km²). Essa densidade de poços reflete no mapa potenciométrico, o qual se apresenta com uma densidade elevada das linhas equipotenciais, rebaixamentos da ordem de -90 m e fechamento de curvas potenciométricas.

Evidentemente que tal alteração na potenciomетria da área modifica o padrão de fluxo. Tendo em mente o modelo hidrogeológico conceitual (Figura 4.6), o qual estabelece fluxo ascendente ao Sistema Aquífero Cabo próximo à região do mar, pode-se constatar que atualmente há a inversão dos fluxos naturais. Tal inversão foi aferida diretamente por meio de uma sonda medidora de fluxo, os resultados encontram-se expressos na figura 6.8.

Os fluxos mostram que próximo a beira-mar (região de maior densidade de poços) os fluxos são descendentes no Sistema Cabo, fluxo resultante do cone de rebaixamento profundo que existe na região. Entretanto distanciando-se da linha costeira já é possível observar o retorno à condição natural, com fluxos ascendentes. Esse cenário configura uma forte vulnerabilidade do Sistema Cabo à contaminação superficial nessas áreas, uma vez que no caso da camada argilosa não exercer a função isolante o aquífero profundo fica sujeito a toda contaminação do aquífero superficial.

Figura 6.7 – Mapa potenciométrico histórico *versus* densidade de poços por década.

Figura 6.8 – Medidas de fluxo vertical em Recife (maio de 2014).

A inversão dos fluxos apresenta ainda o agravante que a cidade de Recife está sujeita a influências da maré, que somadas à baixa topografia, permite que as águas salgadas adentrem o continente. Em medidas realizadas pela Universidade Federal de Pernambuco foi possível encontrar águas salinas até 12 km adentro do Rio Capibaribe (Figura 6.9).

Figura 6.9 – Perfil de salinidade do Rio Capibaribe, outubro de 2013.

Essa tendência da ingressão de águas marinhas cidade pode ser completamente evidenciada pelo mapa de unidades de paisagem (Figura 6.10), o qual mostra que a zona estuarina estende-se pela maior parte de sua área de ocupação.

Dessa forma os aquíferos superficiais bem como os corpos d'água superficiais estão sujeitos à salinização direta pela ingestão da água do mar.

Unidades de Paisagem

Figura 6.10 – Mapa das unidades de paisagem em Recife.

6.2 – Superexploração em Recife: Aspecto Hidráulico

Para avaliação da possibilidade de haver interrupção no abastecimento por exaustão do aquífero ou incapacidade técnica foram utilizados os mapas potenciométricos e o banco de dados das bombas EBARA®.

Como visto anteriormente a situação de Recife é caracterizada por um pronunciado cone de rebaixamento na região de Boa Viagem. Esse cone chega a 90 m abaixo do nível do mar em seu centro. No que diz respeito à capacidade técnica foram pesquisadas bombas de seis polegadas (diâmetro mais comum em Recife) que conseguissem vencer o maior rebaixamento da área (90 m) com uma vazão de 3 m³/h e 10 m³/h. Essas vazões foram escolhidas tendo como base as medianas de vazões para o aquífero.

A altura manométrica limite para um poço de seis polegadas bombeando a 3 m³/h foi de aproximadamente 350 m (bombedor BHS222 com equipado com a bomba M4AD/M4PD, 50 estágios, motor de 9 hp), de forma similar para a vazão de 10 m³/h o limite encontrado foi de 450 m de altura manométrica (bombedor BHS412 com equipado com a bomba M6G, 35 estágios, motor de 25 hp). Dessa forma pode-se concluir que o rebaixamento atual do aquífero está distante do máximo permitido pelas bombas existentes atualmente, não constituindo um risco à continuidade da exploração na área.

Considerando que a espessura média do Sistema Cabo em Recife é de 90 m (Leite, 2000) e que sobreposto a esse aquífero ocorre o Aquífero Boa Viagem (espessura média de 50 m, sendo que sua espessura é de 80 m na região do bairro de Boa Viagem [Borba *et al* 2010]); os limites do Sistema Cabo seriam de aproximadamente -80 m até -170 m. Tendo em vista que o maior rebaixamento encontrado na área é de 90 m, não há risco de interrupção do bombeamento por conta do nível d'água atingir o fundo do aquífero ou não haver coluna d'água suficiente para propiciar as condições adequadas de bombeamento.

Dessa forma conclui-se que em Recife não há condições que possam caracterizar um cenário de superexploração de águas subterrâneas pelo aspecto

hidráulico. Entretanto, mais estudos devem ser feitos, pois a idade das águas indica que a sua reposição pode levar um período muito longo para ser reposta.

6.3 – Superexploração em Recife: Aspecto de Qualidade da Água

O aspecto de qualidade da água leva em conta alterações na qualidade da água, o que pode levar a um estado onde a sua utilização fica impedida ou se restringe. Em última instância a qualidade da água é regida pelos valores orientadores determinados pelos órgãos responsáveis (e.g. MS Portaria 2914). Particularmente em Recife, há a preocupação de contaminação a partir da salinização de suas águas. Sendo a condutividade elétrica (CE) uma medida diretamente proporcional à quantidade de íons dissolvidos na água, pode ser uma ferramenta para caracterizar um cenário de salinização. Uma análise histórica da evolução da CE no SAC foi feita entre as décadas 70 e 2000 (Figura 6.11).

Assim, na década de 70 houve poucas medidas de CE, refletindo o pequeno número de poços existentes na região, mas também com baixos valores, consoante com o estado pouco alterado do aquífero. Na evolução, a década de 80 apresentou mais dados, mas com o mesmo padrão de CE. Por sua vez, a década de 90 revelou alterações na condutividade elétrica, atingindo patamares bem elevados em alguns poços. Ademais nesse período há um aumento intenso no número de medidas registradas, refletindo mais uma vez o aumento nas perfurações e a preocupação pela salinização. Por fim, o perfil das medidas de CE nos anos 2000 é idêntico ao da década anterior, consumando alguns pontos de alta CE no eixo da Avenida Boa Viagem.

Diante dos indícios de salinização, num primeiro momento poderia-se concluir que esse processo ocorreria ubiquamente em toda cidade. Entretanto, em uma análise mais criteriosa observa-se que o fenômeno é pontual. A Figura 6.12 mostra que a mediana das medidas de CE em quadrículas de 500 m por 500 m, onde esta é menor que $1000 \mu\text{S}/\text{cm}^2$ em quase toda a área, exceto em uma quadrícula, onde os valores extremos são superiores a $5 \text{ mS}/\text{cm}$.

Figura 6.11 – Série histórica da década de 70 a 2000 das medidas de condutividade elétrica no Sistema Cabo.

Figura 6.12 – Mediana das condutividades elétricas no Sistema Cabo.

Notadamente as quadriculas com maior mediana de CE abrigam somente três, o que afeta a apreciação dos dados. As características pontuais da salinização evidenciadas pela condutividade elétrica provavelmente devem-se a: (1) poços mal construídos, os quais conectam o aquífero superficial com o SAC; (2) discontinuidades na Formação Paraíso, as quais permitiriam a passagem de águas salinizadas do aquífero superficial; (3) bombeamento causando a mobilização de águas salinas antigas estagnadas no aquífero. Tratando-se da quadricula de extrema CE, a

alternativa mais provável são poços mal construídos; uma vez que das três medidas na área, duas são relativas ao mesmo poço em diferentes épocas do mesmo ano. Assim sendo, um ponto influenciou exacerbadamente mediana da área.

A fim de avaliar a tendência da evolução da CE, a Figura 6.13 traz o histórico da condutividade elétrica por quadrículas de 500 m x 500 m. Nessa figura é possível notar que apesar das condutividades manterem-se relativamente baixas se observa, principalmente no intervalo 1990 – 2000, o aumento das quadrículas com maior mediana de condutividade elétrica na região mais ao norte. Esse cenário pode dever-se a influências do estuário, poços mal construídos, descontinuidades na camada impermeabilizante, mobilização de águas por conta do bombeamento ou alguma combinação desses fatores.

Na região mais ao norte da área de pesquisa nota-se o aumento na condutividade elétrica da década de 90 para 2000, constituindo uma região importante para estudos mais detalhados sobre a qualidade da água. Vale ressaltar que mesmo a região apresentando sinais de salinização, os valores de condutividade elétrica evoluíram da faixa 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para a faixa 600 $\mu\text{S}/\text{cm}$ – 1300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, estando levemente salgada, situando-se entre o valor para água doce (0 a 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) e águas salobras (1600 a 4800 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Figura 6.13 – Evolução das medidas de condutividade elétrica por quadrículas. A) Anos 70, B) Anos 80, D) Anos 90, D) Anos 2000.

Do exposto, vê-se que em Recife, a salinização seria um fenômeno muito mais pontual que geral. Entretanto em algumas regiões é possível notar um ligeiro aumento nas medidas de condutividade com o tempo, podendo ser um indício de salinização e, portanto, uma região susceptível à superexploração.

Mesmo que as medidas de CE indiquem um aumento das concentrações de sais, isso não implica necessariamente deterioração na qualidade da água, uma vez que haveria necessidade de confirmação analisando-se os parâmetros de potabilidade das águas. No âmbito do projeto COQUEIRAL as águas subterrâneas de toda a cidade de Recife foram amostradas em duas campanhas (setembro de 2012 e março de 2013) (Figura 6.14).

Figura 6.14 – Pontos de amostragem dos poços, projeto COQUEIRAL.

Para cada ponto de amostragem foram aferidos parâmetros físico-químicos (pH, Eh, C.E. T, O.D.) e obtidas as concentrações iônicas (íons maiores, menores e traço). Dessa forma foi possível traçar o perfil hidroquímico do aquífero (Figura 6.15).

Figura 6.15 – Diagrama de Piper para as amostras do Sistema Aquífero Cabo e os poços com excesso de Cl e Na.

As concentrações iônicas revelam águas com baixo teor de sais dissolvidos com baixas concentrações de nitratos, ademais em geral os teores de NaCl são baixos, indicando pouca influência marinha, excetuando-se os poços 24, 5, 17, 13, 114, 23, 16. O diagrama de Piper aponta amostras com fácies variando de Na-HCO₃ a Ca-Cl, passando por Na-Cl. Sendo Recife uma cidade costeira, as chuvas da região são influenciadas pelo *spray* marinho, portanto têm assinatura do mar (NaCl). Dessa forma as águas de recarga caracterizam-se por fácies Na-Cl com baixa mineralização, como observado em grande parte dos pontos do SAC. Interações com a matriz rochosa podem acarretar alteração no perfil hidroquímico, como observado no diagrama de Piper. O componente carbonático da Formação Cabo pode levar a água do aquífero ao enriquecimento em carbonatos por meio de reações de intemperismo químico; outra possível fonte para carbonatos seria a decomposição de matéria orgânica, o que não deve ocorrer no SAC por tratar-se de um aquífero profundo. Processos de troca iônica com a matriz rochosa (argilas) podem enriquecer a água do aquífero em Ca²⁺ (equação 6.1), justificando o aparecimento de fácies cálcicas.

Com relação à Figura 6.15, no gráfico de Na vs Cl, observa-se novamente a tendência de aproximação da linha referente à água do mar, entretanto com baixas concentrações de sódio e cloreto, indicando pouca ou nenhuma influência da água do mar. Apesar disso há pontos com alta concentração de Na e Cl, a figura 6.16 traz o mapa desses poços juntamente com a condutividade elétrica.

Figura 6.16. – Condutividade elétrica vs pontos de alta salinidade no Sistema.

Na figura 6.16 pode-se notar certa correlação entre os pontos de alta salinidade e quadrículas de maior salinidade, estando os poços mais a norte da área de pesquisa.

A figura 6.17 mostra que exatamente a região com maior queda potenciométrica apresenta também os menores medidas de condutividade elétrica. Assim fica descartada a hipótese de salinização induzida pelo bombeamento, devendo haver outras causas para a salinização na área. Estudos específicos devem ser realizados para caracterizar adequadamente as origens do aumento na concentração de sais. Além das possibilidades para já citadas, outra a ser explorada seria o aquífero ter águas salgadas remanescentes de períodos de ingressão marinha, conforme a rede de poços foi expandindo-se os poços foram alocados nessa área.

Figura 6.17 – Pontos de alta salinidade do Sistema Cabo vs mapa potenciométrico dos anos 2000.

Destarte, após analisar os resultados químicos do Sistema Cabo, pode-se concluir que em geral não há deterioração da qualidade da água; podendo ser caracterizado pontos de alta salinidade que devem ser investigados com maior atenção. Dessa forma para a região estudada do Sistema Aquífero Cabo não se pode caracterizar um cenário de superexploração de águas subterrâneas pelo aspecto de qualidade da água.

6.4 – Superexploração em Recife: Aspecto Econômico

Faz-se necessária uma análise dos incrementos no custo de bombeamento associadas a extrações intensas. Sabendo-se que a energia elétrica consumida no bombeamento é proporcional à vazão de exploração e ao aumento da altura manométrica (Equação 3.7), pode-se avaliar o incremento nos custos pela variação desses parâmetros. A figura 6.18 mostra as quedas manométricas entre as décadas de 70 e 80, 80 e 90 e a queda acumulada de 70 a 90.

Figura 6.18 – Quedas manométricas no Sistema Aquífero Cabo.

Ao analisar o incremento da altura manométrica (associada a queda do nível potenciométrico) pode-se verificar que entre as décadas de 70 e 80 há uma diminuição da carga hidráulica da ordem de 20 m somente na região de maior densidade de poços. Como deveria ser esperado, o intervalo de tempo seguinte (de 80 para 90) traz uma queda manométrica pronunciada. O mapa acumulado mostra que em geral somente na região de maior concentração de poços que se localizam as quedas manométricas maiores (até 90 m). Além disso, na cidade como um todo há uma queda da superfície potenciométrica da ordem de 20 m.

Evidentemente que o aumento da altura manométrica necessária para a bomba vencer e retirar água do poço aumenta o custo da extração, entretanto tais incrementos não são lineares. Isso ocorre pelo fato que as bombas são ajustadas para trabalharem em um determinado regime fixo onde é utilizada toda a sua potência. Dessa forma a quantidade de água é regulada pelo tempo que a bomba fica ligada e pelo registro de vazão. Na prática os empreendimentos possuem dispositivos que acionam a bomba quando o reservatório atinge um determinado nível.

A fim de gerar uma estimativa do consumo foi tomado como exemplo um edifício de 15 andares com 4 apartamentos por andar e 4 moradores por apartamento. Segundo o código de obras de Recife deve-se considerar o consumo diária de 150 L por pessoa para edifícios (Prefeitura de Recife, Lei No 7427 de 1961). De acordo com esses dados, a tabela 6.1 resume o consumo de água nesse edifício fictício.

Tabela 6.1 – Consumo de água no edifício exemplo

Consumo por pessoa	
Consumo de diária de água (L)	150
Dias por mês	30
Consumo médio por pessoa por mês (L)	4500
Consumo médio por pessoa por mês (m³)	4,5
Consumo por apartamento	
Pessoas por apartamento	4
Consumo mensal por apto (m³)	18
Total de aptos	60
Consumo do edifício (m³)	1080

Para o cálculo do custo dessa quantidade de água pelo abastecimento público deve-se lançar mão da tabela de tarifas de água praticadas pela COMPESA (2015). A tabela 6.2 traz as tarifas vigentes em Recife a partir de maio de 2015.

Tabela 6.2 – Tarifas para usuários residenciais em Recife (COMPESA 2015)

Consumo	Tarifa
Tarifa social	6,96
até 10 m³	32,51
10 a 20 m³	3,73/m ³
20 a 30 m³	4,43/m ³
30 a 50 m³	6,10/m ³
50 a 90 m³	7,23/m ³
90 a 99999 m³	13,89/m ³

A concessionária escalona os valores a partir do consumo médio por unidade residencial (economia). Para o consumo de 18 m³ por economia a conta de água seria:

$$\text{Conta por economia (em reais)} = 32,51 + 8 \cdot 3,73 = 62,35$$

Dessa forma para o valor por metro cúbico de água cobrado para o consumo estimado será de R\$ 3,46. Sabendo que o edifício possui 50 apartamentos, será pago o valor de R\$ 3741,00.

Para efeito de comparação é admitido um poço bombeando a 5 m³/h (média de vazão do SAC). Na estimativa foram pesquisados modelos de bomba da marca Ebara®, os quais são muito similares aos outros disponíveis no mercado. Foram avaliados as condições onde para manter a vazão de 5 m³/h seria necessária troca do conjunto bombeador. O custo por kWh foi obtido na Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) perfazendo um valor de 0,5805 R\$/kWh (CELPE 2015). Dessa forma com a potência da bomba, o regime de bombeamento e a tarifa cobrada pela empresa foi possível estimar o custo operacional do bombeamento de águas subterrâneas (Equação 6.1). A tabela 6.1 expressa o custo e potência média da bomba em função da altura manométrica.

$$C \text{ (R\$)} = P(\text{kW}) \cdot t(h) \cdot V\left(\frac{\text{R\$}}{\text{kWh}}\right), \text{Equação 6.1}$$

Nessa equação C é o consumo em reais, P é a potência da bomba em kW, t é o tempo de operação da bomba e V é o valor da tarifa de energia elétrica (tarifa em vigência atualmente 0,5805 R\$/kWh). Para extrair os mesmos 1080 m³ de água a bomba deveria operar por 216 horas por mês (aproximadamente 7,2 horas por dia). Dessa maneira foram calculados os custos de operação em função da altura manométrica (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 – Custo mensal de bombeamento em função da altura manométrica

Altura manométrica (m)	Potência (HP)	Potência (kW)	Consumo (R\$)
5	0,5	0,37285	R\$ 46,75
10	0,5	0,37285	R\$ 46,75
15	0,75	0,559275	R\$ 70,13
20	0,75	0,559275	R\$ 70,13
25	1	0,7457	R\$ 93,51
30	1	0,7457	R\$ 93,51
35	1,5	1,11855	R\$ 140,26
40	1,5	1,11855	R\$ 140,26
45	1,5	1,11855	R\$ 140,26
50	2	1,4914	R\$ 187,02
55	2	1,4914	R\$ 187,02
60	2,5	1,86425	R\$ 233,77
65	3	2,2371	R\$ 280,53
70	3	2,2371	R\$ 280,53
75	3,5	2,60995	R\$ 327,28
80	3,5	2,60995	R\$ 327,28
85	3,5	2,60995	R\$ 327,28
90	3,5	2,60995	R\$ 327,28
95	4	2,9828	R\$ 374,04
100	4	2,9828	R\$ 374,04

Para avaliação total dos custos deve-se considerar os custos de perfuração e manutenções. A perfuração de um poço profundo em Recife custa hoje aproximadamente R\$ 60.000,00. O custo de manutenção pode ser estimado atualmente como R\$ 2000,00 de análises químicas a cada cinco anos e uma manutenção com troca de bomba no valor de R\$ 10.000,00 a cada cinco anos. Considerando a vida útil de um poço como 30 anos pode-se avaliar o custo total pela exploração do aquífero (Tabela 6.4).

Tabela 6.4 – Custo fixo médio por poço em Recife.

Natureza	Frequência	Valor unitário	Total
Perfuração	1	R\$ 60.000,00	R\$ 60.000,00
Análises químicas	6	R\$ 2.000,00	R\$ 12.000,00
Troca de bomba e manutenção	5	R\$ 10.000,00	R\$ 50.000,00
Total			R\$ 122.000,00
Custo anual			R\$ 4.066,67
Custo mensal			R\$ 338,89

Na tabela 6.4 a frequência corresponde ao número de vezes que aquela operação ocorre no período de 30 anos, os valores de cada serviço foram estimados com base em consulta com profissionais da área.

Assim, a fim de verificar o incremento do custo da água foram consideradas duas alturas manométricas: 20 m e 95 m. O valor a ser pago pelo condomínio foi calculado somando o custo fixo mensal (R\$ 338,89), incluindo a amortização do poço e a sua manutenção, ao custo mensal de bombeamento (Tabela 6.3). Para a altura manométrica de 20 m o custo mensal seria de R\$ 409,02 (custo de 0,379 R\$/m³), já para a altura manométrica de 90 m o custo sobe para R\$ 666,17 (custo de 0,617 R\$/m³).

Ante os valores calculados fica clara a vantagem da utilização da água do Aquífero Cabo ao invés da água da concessionária. Mesmo para o caso da água de poço com maior custo o valor da COMPESA ainda é 4,7 vezes superior ao valor da água bombeada. Vale ressaltar que as estimativas feitas foram conservadoras, considerando o consumo mínimo de água.

Apesar dos benefícios econômicos da exploração das águas subterrâneas frente aos valores pagos pela água pública, os dados mostram que há um aumento no custo de bombeamento devido ao rebaixamento da superfície potenciométrica. Os valores são R\$ 666,17 para os maiores rebaixamentos, representando a operação de uma bomba de 4 hp, e R\$ 409,02 para os valores de menor rebaixamento, relativos ao custo de uma bomba de 0,75 hp. A diferença desses custos é de R\$ 257,15 reais. Tal valor ao

longo de 30 anos de operação do poço corresponde à um custo extra de R\$ 92.574,00. O custo extra devido ao rebaixamento ao longo de 30 anos é da mesma ordem de grandeza do custo fixo total de operação de um poço por 30 anos.

Para valorar o custo extra real pode-se utilizar um simulador de investimento, onde os R\$ 257,15 de custo extra seriam investidos numa aplicação financeira a juros de 0,7% ao mês, considerando uma inflação mensal de 0,4%, por 30 anos. Tal investimento renderia o valor aproximado de R\$ 164.588,63 reais. Desconsiderando a inflação o valor seria de R\$ 412.644,99 reais. Assim sendo fica evidente que o rebaixamento causado pelo bombeamento impõe aos usuários de poços um custo extra que pode atingir mais de 400 mil reais.

Ante o exposto fica demonstrado que em Recife não há aumento no custo de bombeamento que faça com que a água subterrânea tenha maior custo que outras fontes (no caso água do abastecimento da COMPESA). Foi caracterizada um cenário de aumento no custo de exploração, entretanto mesmo considerados todos esses custos, o abastecimento por água subterrânea teve custo 5 vezes menor que a água do abastecimento público. Assim sendo não se configura superexploração pelo aspecto econômico.

6.5 – Superexploração em Recife: Aspecto Ecológico

O SAC configura-se como um aquífero confinado, com águas antigas, estando distante da superfície e isolado por uma camada argilosa. Sendo assim sua interação com rios, lagos e outras feições tipicamente superficiais é extremamente limitada.

Ainda que seja considerada uma possível porção aflorante na região do bairro do Barro, sua interação com o ecossistema superficial seria diminuta, pois no topo do SAC encontra-se a Formação Paraíso, a qual figura-se como um aquitarde. O isolamento do SAC em relação à superfície é evidenciado pela idade de suas águas, as quais são datadas de 10 a 15 mil anos; em contraste com o aquífero superficial com água de recarga recente.

Ademais Recife é uma região de deságue de diversos rios de grande volume (e.g. Rio Capibaribe e Rio Beberibe). Mesmo num cenário de intenso bombeamento de

um aquífero associado aos rios seria muito difícil se gerar um cenário de intensa diminuição da vazão desses rios. As regiões de mangues e matas ciliares sofrem forte agressão no meio urbano de Recife, entretanto esses danos ambientais são impetrados devido à expansão urbana e não devido ao bombeamento de nenhum aquífero.

Por isso não é possível caracterizar um regime de superexploração pelo aspecto ecológico no SAC em Recife.

6.6 – Superexploração em Recife: Aspecto Geotécnico

Estudos sobre alteração da estabilidade de terrenos e subsidência no Brasil são escassos e restringem-se a afundamentos cársticos. Entretanto, considerando-se que esse não é um escopo deste projeto, as considerações tecidas a esse respeito serão baseadas em publicações científicas.

Em Recife há esparsos estudos sobre subsidência devido ao bombeamento de águas subterrâneas. Estudos conduzidos pelo Prof. Jaime Cabral (Cabral 2001, 2006; Luna 2003, Santos 2005) na Universidade Federal de Pernambuco não têm encontrado indícios de subsidência por conta do bombeamento de água. Vale ressaltar, entretanto, que pesquisas ainda são necessárias para tal confirmação; mas até o momento não tem havido problemas perceptíveis na cidade.

6.7 – Superexploração em Recife: Aspecto Ético e Social

Como discutido anteriormente, o aspecto ético e social leva em consideração a equidade no acesso ao recurso. No caso do SAC os poços perfurados estão em sua maioria na região beira-mar, onde se concentram condomínios (figura 6.19).

A região de Boa Viagem e a região central de Recife detém a maior renda média da cidade. Além disso, o bairro de Boa Viagem concentra parcela expressiva da população. Comparando o mapa de população com o mapa de moradores por domicílio observa-se que apesar da região de Boa Viagem deter parte expressiva da população da cidade, o número de moradores por domicílio é baixo quando comparado ao restante da cidade, devido basicamente à intensa verticalização.

A região de Boa Viagem apresenta a maior densidade de poços do SAC e é também onde localizam-se os maiores rebaixamentos dos níveis potenciométricos. Como todos os moradores e usuários de água possuem poder aquisitivo semelhante, não se configura um impedimento do acesso ao recurso de um grupo de usuários pelo outro. A figura 6.20 demonstra que o cone de rebaixamento restringe-se ao bairro de Boa Viagem, sendo assim o bombeamento do SAC na região não impede o acesso de usuários de outros bairro. Entretanto em áreas como Brasília Teimosa, onde o poder aquisitivo da população é nitidamente menor, não há poços tubulares extraindo água do Cabo e o uso da água subterrânea se dá pelo uso de poços no Aquífero Boa Viagem, que não é influenciado pelo bombeamento do SAC (Figura 6.20). Assim, na região estudada, não há problemas de equidade de acesso relacionado ao maior bombeamento de água do SAC nessa região ou mesmo em outras.

Perfil social dos bairros de Recife

Figura 6.19 – Perfil dos bairros de Recife.

Figura 6.20 – Renda média vs potenciometria em Recife.

6.8 – Afinal, existe superexploração em Recife?

Após analisar o conceito de superexploração em seis aspectos, não foi possível caracterizar a superexploração do SAC em Recife. Apesar disso o aquífero está sob intenso bombeamento, abrigando milhares de poços numa área de poucos quilômetros quadrados.

O fato que tem alarmado a comunidade científica é o rebaixamento dos níveis d'água registrado sobretudo no bairro de Boa Viagem, que entretanto é um fato normal, associado ao bombeamento do aquífero. Como discutido anteriormente os níveis rebaixarão até que seja estabelecido o equilíbrio entre recargas e descargas do aquífero, tal equilíbrio é atingido após algumas décadas de bombeamento.

A modelagem apresentada por Brito (2000) mostrou que, mantidas as vazões de bombeamento naquela época, os níveis potenciométricos estabilizar-se-iam em 2010. Curiosamente mesmo com a projeção da estabilização das cargas hidráulicas o aquífero foi caracterizado como superexplorado. Dessa forma fica clara a necessidade de uma ampla discussão sobre o tema, haja vista que os estudos realizados na região são base para o estabelecimento de diretrizes e resoluções, como a SRH portaria nº 04 de 2003.

Adicionalmente são necessários estudos para que seja refinado o modelo geológico de Recife, haja vista que muitas das discussões sobre a hidrodinâmica baseiam-se numa geologia que ainda não está consolidada. Juntamente ao modelo geológico é necessária a implementação de uma ampla rede de monitoramento dos recursos subterrâneos em Recife. Dessa forma haverão bases sólidas para dirigir as decisões sobre o uso dos recursos da região.

7 – Conclusão

Superexploração de aquíferos é um termo mal definido que acaba sendo utilizado de maneira irrestrita por pesquisadores, comunicadores e gestores. O termo carece de precisão para poder ser aplicado de forma tecnicamente correta. Entretanto o seu uso é aqui defendido, pois o termo traz consigo um aspecto de alerta à sociedade, que outros termos, como exploração intensa, não o faz. Assim, o seu uso pode ser justificado desde que se reconheça essas limitações e se refira a um uso intenso do aquífero, que provoque efeitos negativos a sustentabilidade do recurso subterrâneo em si ou prejuízos aos ambientes dele dependentes. Assim, advoga-se aqui que o termo deva abranger os seguintes aspectos: :

- I. hidráulico, ou seja, quando o rebaixamento atinge um ponto onde é fisicamente impossível retirar mais água (exaustão do aquífero);
- II. qualidade da água, ou seja, o bombeamento mobiliza águas de baixa qualidade, tornando a água bombeada imprópria;
- III. econômico, ou seja, o rebaixamento do nível d'água chega a níveis onde o custo de outras fontes de água é menor que a água subterrânea ;

- IV. geotécnico, ou seja, a retirada de água do armazenamento do aquífero altera a estabilidade do terreno ;
- V. ecológico, ou seja, a queda na descarga ou recarga induzida do aquífero interferem em sistemas aquáticos vizinhos ao aquífero num nível inaceitável; e
- VI. ético e social, ou seja, grandes usuários impedem o acesso de usuários menores ou usuários a jusante (distribuição desigual de recursos) .

Cada aspecto apresenta sua particularidade, sendo possível caracterizar o regime de superexploração segundo cada um destes aspectos ou nos efeitos conjuntos de vários deles. É importante que a constatação do problema para cada um desses aspectos seja bem limitado em sua abrangência em área e no tempo.

Águas subterrâneas são de vital importância para o abastecimento da RMR, nesse cenário o SAC desempenha o papel de abastecer complementarmente edifícios residenciais com água de qualidade. Ao longo dos últimos anos a região de Boa Viagem (Recife) vem apresentando quedas dos níveis de água, em até 90 metros devido ao incremento da perfuração de poços tubulares, sobretudo no final do último século. Esse fato levou os gestores e pesquisadores da região a apontarem um regime de superexploração do SAC. Entretanto, ainda que a dinâmica de tal aquífero tenha sido alterada, devido ao bombeamento, acredita-se que não se configura a sua superexploração, devido a seguintes evidências:

- I. Aspecto hidráulico: Apesar dos níveis d'água do aquífero atingirem até -90 m os limites físicos para a exploração das águas não foi atingido. As bombas disponíveis atualmente operam com alturas manométricas de até 450 m e o limite inferior do aquífero é da ordem de -170 m.
- II. Aspecto qualidade da água: O histórico de condutividade elétrica evidenciou que na maior parte da cidade não é possível caracterizar salinização no SAC. Foi possível identificar uma região ao norte da área de pesquisa que carece de estudos mais detalhados, havendo indícios de salinidade. Entretanto a região norte não coincide com o cone de rebaixamento, não estando relacionada ao bombeamento.

- III. Aspecto econômico: No que tange ao aspecto econômico o custo da água subterrânea do SAC variou de 0,379 R\$/m³ até 0,617 R\$/m³, para a água da concessionária foi calculado o valor de 3,46 R\$/m³ (4 a 7 vezes superior ao valor da água do SAC). O incremento no custo de operação foi valorado em até 400 mil reais no período de vida útil do poço. Entretanto mesmo considerando o custo extra a água subterrânea mostrou-se vantajosa em relação à água da concessionária, não caracterizando superexploração pelo aspecto econômico.
- IV. Aspecto geotécnico: Os trabalhos de geotecnia em Recife são escassos, não obstante nos estudos realizados até o momento não foi possível caracterizar alterações na estabilidade dos terrenos devido ao bombeamento.
- V. Aspecto ecológico: O Sistema Cabo constitui um aquífero profundo, estando muito distante da superfície. Ademais no SAC são encontradas águas antigas, provando que não há conexões fortes entre o aquífero superficial (recarga recente) com o aquífero profundo. Dessa forma a exploração do aquífero profunda não interfere no meio ambiente.
- VI. Aspecto ético e social: No aspecto ético e social ficou demonstrado que a exploração no SAC é realizada por usuários de maior poder aquisitivo, sendo assim possuem meios de ter acesso à água. Ademais o cone de rebaixamento localiza-se quase em sua totalidade no bairro de Boa Viagem, não interferindo na possibilidade de usuários de outras regiões terem acesso ao aquífero.

Finalmente, um item associado a estratégia adaptativa seria a outorga condicionada ao monitoramento dos poços. Os dados do monitoramento seriam utilizados para confecção de um modelo de fluxo, o qual configura-se como uma ferramenta de gestão.

8 – Referências

-Adams, B. & MacDonald, A. M. *Aquifer susceptibility to side-effects of groundwater exploitation*. In: Robins, N. S. *Groundwater Pollution, Aquifer Recharge and Vulnerability*. Geological Society, London, Special Publications, 130, 71-76, **1998**.

-Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC – www.apac.pe.gov.br, acesso em 02/02/2012.

- Alley, W. M.; Reilly, T. E.; Frank, O. L. *Sustainability of ground-water resources*. U. S. Geological Survey Circular 1186, **1999**.
- Alley, W. M.; Leake, S. A. *The journey from safe yield to sustainability*. Groundwater, Vol 42, No 1, p 12 – 16, **2004**.
- Anton, D. J.; Thirsty Cities, Urban Environments and Water Supply in Latin America, Ottawa, Ont., IDRC, **1993**.
- Base de Dados do Estado de Pernambuco -www.bde.pe.gov.br, acesso em 08/2014.
- Bell, F. G. *Subsidence associated with the abstraction of fluids*. In: Bell, F. G.; Culshaw, M. G.; Cripps, J. C.; Lovell, M. A. Engineering Geology of Underground Movements, Geological Society, Engineering Geology Special Publication No 5, p 363 – 376, **1988**.
- Borba, A. L. S.; Costa Filho, W. D.; Mascarenhas, J. C.; *Configuração Geométrica dos Aquíferos da Região Metropolitana do Recife*, XVI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, ABAS, São Luís -Ma, **2010**.
- Bredehoeft, J. D.; Papadopoulos, S. S.; Cooper Jr, H. H. *The water budget myth*. In: Scientific Basis of Water Resource Management, Studies in Geophysics, Washington D.C., National Academy Press, 51-57, **1982**.
- Bredehoeft, J. D. *Safe yield and the water budget myth*. Groundwater, Vol 35, No 6, editorial p. 929, **1997**.
- Bredehoeft, J. D. *The water budget myth revisited: Why hydrogeologists model*. Groundwater, Vol 40, No 4, 340-345, **2002**.
- Brown, R. H. *The cone of depression and the area of diversion around a discharging well in an infinite strip aquifer subject to uniform recharge*. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1524C, **1963**.
- Cabral, J. J. S. P.; dos Santos, S. M.; Demétrio, J. G. A.; Filho, I. D. S. P. *Considerações sobre a possibilidade de ocorrência de subsidência devido a superexploração de água subterrânea*. IV Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste, Recife, **2001**.
- Cabral, J. J. S. P.; dos Santos, S. M.; Filho, I. D. S. P. *Bombeamento Intensivo de Água Subterrânea e Riscos de Subsidência do Solo*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol 11, No 3, 147 – 157, **2006**.
- CELPE, acessado em 04/2015 <http://servicos.celpe.com.br/residencial-rural/Pages/Baixa%20Tens%C3%A3o/tarifas-grupo-b.aspx>
- Chatton, E. *Modélisation des conditions de recharge à partir des gaz nobles atmosphériques dissous: application aux aquifères côtiers de Recife (Brésil)*. Dissertação de mestrado apresentada à Université de Rennes, **2013**.

- Companhia Pernambucana de Saneamento (Compesa) -www.compesa.com.br, acesso em 08/2014.
- Conicelli, B. P.; *Gestão das Águas Subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Alto Tietê (SP)*. Tese de doutoramento apresentada ao Instituto de Geociências –USP, **2014**.
- Costa, W.D. & Santos, A.C. *Zoneamento para Utilização de Água Subterrânea no Município de Recife*. Anais do Seminário de Engenharia Civil do Nordeste. "Civil 90", Recife-PE., p. 519-530, **1990**.
- Costa, W. D.; Manoel Filho, J.; Santos, A. C.; Costa Filho, W. D.; Monteiro, A. B.; de Souza, F. J. A.; *Zoneamento De Exploração Das Águas Subterrâneas Na Cidade Do Recife*. Proc. X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, Brazil, **1998**.
- Costa, W. D. *Estudo Hidrogeológico de Recife, Olinda, Camaragibe e Jaboatão dos Guararapes (HIDROREC II)*. Recife, **2002**.
- Costa, W. D. & Costa Filho, W. D. *Recarga artificial dos aquíferos da planície do Recife*. IV Simpósio de Hidrogeologia do Nordeste, Recife, **2001**.
- Costa, W. D. & Costa Filho, W. D. *A gestão dos aquíferos costeiros de Pernambuco*. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, São Paulo, **2004**.
- Costa, W. D., dos Santos, M. A. V., Costa Filho, W. D. *Novos elementos sobre a geologia e a hidrogeologia do município do Recife*. XV Congresso de Águas Subterrâneas, ABAS, Natal, **2008**.
- Costanza, R.; Patten, B. C. *Defining and predicting sustainability*. Ecological Economics, 15, 193 – 196, **1995**.
- Custodio, E.. *Hydrogeological and Hydrochemical Aspects of Aquifer Overexploitation*. In: Selected Papers in Hydrogeology, Simmers *et al.* International Association of Hydrogeologists, Heise, Hannover, Vol. 3, p. 3 – 28, **1992**.
- Custodio, E. *Effects of groundwater development on the environment*. In: 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza. Anais do 1st Joint World Congress on Groundwater,v.1, **2000**.
- Custodio, E. *Aquifer overexploitation: what does it mean?* Hydrogeology Journal 10, 254–277, **2002**.
- Devlin, J. F.; Sophocleous, M. *The persistence of the water budget myth and its relationship to sustainability*. Hydrogeology Journal, 13, p 549–554, **2005**.
- Dominguez, J.; Bittencourt, A.; Leão, Z.; de Azevedo, A. *Geologia do Quaternário costeiro do Estado de Pernambuco*. Revista Brasileira de Geociências, 20, 208 – 215, **1990**.
- Fornes, J. M.; de la Hera, A.; Llamas, M. R. *The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain*. Water Policy, 7, 253 – 268, **2005**.

- Foster, S.; Hirata, R.; Misra, S.; Garduno, H. *Urban groundwater use policy: balancing the benefits and risks in developing nations*. 1. ed. Washington, DC: The World Bank, 36p, **2010**.
- Foster, S.; Chilton, J.; Nijsten, G.; Richts, A. *Groundwater — a global focus on the 'local resource'*. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, p 685 – 695, **2013**.
- Fundação Joaquim Nabuco (<http://basilio.fundaj.gov.br/pesquisaescolar>), acesso em 08/2013.
- Glavic, P.; Lukman, R. *Review of sustainability terms and their definitions*. *Journal of Cleaner Production*, 15, p 1875 – 1885, **2007**.
- Glennon, R. J. *Water Follies: Groundwater Pumping And The Fate Of America's Fresh Waters*. Island Press, Washington D.C., **2004**.
- Gutiérrez, F.; Parise, M.; De Waele, J.; Jourde, H.; *A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst*. *Earth Science Reviews*, 138, 61 – 88, **2014**.
- Hardin, G. *The tragedy of the commons*. *Science*, Vol. 162, No 3859, p. 1243 – 1248, **1968**.
- Hirata, R. C. A. *Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais*. *Revista do Instituto Geológico*, 14, 1, 39 – 62, **1993**.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), censo de **2010** - www.ibge.gov.br, acesso em 08/2014.
- Kalf, F. R. P.; Woolley, D. R. *Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems*. *Hydrogeology Journal*, 13, 295 – 312, **2005**.
- Lima Filho, M. F.; *Análise Estratigráfica e Estrutural da Bacia Pernambuco*. Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, **1998**.
- Llamas, M. R. & Custodio, E. *Intensive Use of Groundwater:: Challenges and Opportunities*. A. A. Balkema, Netherlands, **2002**.
- Llamas, M. R. *Ethical Considerations in Water Management Systems*. *Journal of Water Resources Development*, Vol 9, No 1, 13 – 27, **2003**.
- Llamas, M. R. *Water and Ethics: Use of Groundwater*. In: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Series on Water and Ethics, Essay 7, Paris, **2004**.
- Llamas, M. R.; Martínez-Santos, P.; *Intensive groundwater use: a silent revolution that cannot be ignored*. *Water Science and Technology Series*, Vol 51, No 8, 167-174, **2005**.

- Llamas, M. R.; Martinez-Santos, P.; de la Hera, J. A. *Dimensions of sustainability in regard to groundwater resources: an overview*. In: International Symposium on Groundwater Sustainability, Alicante, **2006**.
- Llamas, M.R. *Sustainable groundwater use and overexploitation*. IN Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), UNESCO, Eolss Publishers, Paris, France, (<http://www.eolss.net>), **2011**.
- Leal, O. Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas da Região Metropolitana do Recife. Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife –Projeto SINGRE I, Série Recursos Hídricos, **1994**.
- Loáiciga, H. A. *Analytic game—theoretic approach to ground-water extraction*. Journal of Hydrology, 297, p. 22– 33, **2004**.
- Lohman, S. W. *Definitions of selected ground-water terms – revisions and conceptual refinements*. US Geological Survey, Water Supply Paper 1988, p 21, **1972**.
- Luna, R.; Cabral, J. J. S. P.; Garnés, S.; Marques, H.; Santos, S. *Resultados preliminares da estimativa de subsidência no campus UFPE através do monitoramento com uso do GNSS*. XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Bento Gonçalves, **2013**.
- Maia, M. F. B.; Barbosa, J. A.; Mort, H. P.; Santana, F. R.; Lima Filho, M.; Neumann, V. H.; Moraes, M. A. *Caracterização da Formação Suape na faixa costeira da bacia de Pernambuco*. 6º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás, Florianópolis, **2011**.
- Maia, M. F. B.; Barbosa, J. A.; Lima Filho, M. D.; Mort, H. P.; Santana, F. R. *Características petrográficas e geoquímicas das formações siliciclásticas (Aptiano – Albiano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil*. Estudos Geológicos, 22, 1, p. 55-75, **2012**.
- Marsal, R. J.; Mazari, M., 2. *El subsuelo de la Ciudad de Mexico, The subsoil of Mexico city*. 2nd ed. Universidad Autonoma de Mexico, Facultad de Ingenieria, **1962**.
- Meinzer, O. E. *Quantitative methods of estimating groundwater supplies*. Bulletin of the Geological Society of America, Vol 31, p. 329 – 338, **1920**.
- Monteiro, A. B.; *Modelagem do Fluxo Subterrâneo nos Aquíferos da Planície do Recife e seus encaixes*. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, **2000**.
- Montenegro, S. M. G., Montenegro, A. A. D., Cabral da Silva Pereira, J. J., and Cavalcanti, G. L. *Intensive exploitation and groundwater salinity in Recife Coastal Plain (Brazil) : monitoring and management perspectives*. Joint Saltwater Intrusion Conference, Cagliari-Chia Laguna, Italy, **2006**.
- Montenegro, S. M. G., Cabral da Silva Pereira, J. J., Ribeiro de Paiva, A. L., Montenegro, A. A. d. A., Demetrio Alves, J. G., and Cavalcanti, G. L. *Águas Subterrâneas na Zona Costeira da Planície do Recife*

(PE): *Evolução da Salinização e Perspectivas de Gerenciamento*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 14, 81-93, **2009**.

-Mook, W. G.; *Environmental Isotopes in the hydrological cycle –Principles and applications*. Technical Documents in Hydrology | No 39, UNESCO, Paris, **2000**.

-MS, Portaria No 2.914, de 12 de Dezembro de 2011, disponível em http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html

-Perroni, J. C. A. *Avaliação do consumo de energia elétrica para produção de água subterrânea – o caso do abastecimento público da cidade de São Carlos – SP. Dissertação de mestrado apresentada ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005*.

-Pezzey, J. C. V.; Tomam, M. A. *The Economics of Sustainability: A Review of Journal Articles*. In: The Economics of Sustainability, Ashgate, Aldershot U.K., **2002**.

-Prefeitura de Recife, Lei No 7427 de 1961. Disponível em: <http://www.legiscidade.recife.pe.gov.br/lei/07427/>

-ReCESA. *Abastecimento de água: gerenciamento de perdas de água e energia elétrica em sistemas de abastecimento: guia do profissional em treinamento: nível 2*. Salvador, ReCESA, Secretaria de Saneamento Ambiental?ReCESA, p 139, **2008**.

-Rogers, P. *Water governance, water security and water sustainability*. In: Rogers, P.; Llamas, M. R.; Martínez-Cortina, L *Water Crisis: Myth or Reality?* Taylor & Francis/Balkema, Grã Bretanha, **2006**.

-Sandoval, S. *A participatory approach to integrated aquifer management: The case of Guanajuato State, Mexico*. Hydrogeology Journal, 12, 6 – 13, **2004**.

-Santos, S. M. *Investigações metodológicas sobre o monitoramento da subsidência do solo devido à extração de água subterrânea – Caso da Região Metropolitana de Recife*. Tese de doutoramento apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, **2005**.

-SINGRE II, Projeto (Sistema de Informações para Gestão Territorial da Região Metropolitana do Recife), Série Degradação Ambiental –Volume 2, CPRM, **2001**.

-Sophocleous, M. *Managing water resources systems: Why “safe yield” is not sustainable*. Groundwater, Vol 35, No 4, p 561, **1997**.

-Sophocleous, M. *From safe yield to sustainable development of water resources: The Kansas experience*. Journal of Hydrology, 235, p 27 – 43, **2000**.

- SRHE (Secretaria de Recursos Hídricos Energéticos do Estado de Pernambuco) – Dado de **2006**
www.sirh.srh.pe.gov.br, acesso em 08/2013.

-Stute, M.; Clark, J. F.; Schlosser, P.; Broecker, W. S.; *A 30,000 yr Continental Paleotemperature Record Derived from Noble Gases Dissolved in Groundwater from the San Juan Basin (New Mexico)*. Quaternary Research, 43: 209-220, **1995a**.

-Stute, M.; Forster, M.; Frischkorn, H.; Serejo, A.; Clark, J. F.; Schlosser, P.; *Cooling of Tropical Brazil (5 degrees C) during the Last Glacial Maximum*. Science, 269(5222): 379-383, **1995b**.

-Sugisaki, R.; Taki, K.; *Simplified analyses of He, Ne and Ar dissolved in natural waters*. Geochemical Journal, 21, 21, 23-27, **1987**.

-Theis, C. V. *The source of water derived from wells essential factors controlling the response of an aquifer to development*. American Society of Civil Engineers, 10, 277-280, **1940**.

-Thermo Finnigan, Gas Bench II Operation Manual, **2004**. Disponível em:
http://es.ucsc.edu/~silab/ThermoManuals/Gas%20Bench/1118342_GasBench_II_Operating_Manual.pdf

-van Steenberg, F. & Shah, T. *Rules rather than right: self-regulation in intensively used groundwater systems*. In Llamas, M. R. & Custodio, E. *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*, Chapter 12, A. A. Balkema, Netherlands, **2002**.

-Wester, P.; Sandoval, R.; Hoogesterger, J. *Assessment of the development of aquifer management councils (COTAS) for sustainable groundwater management in Guanajuato, México*. Hidrogeology Journal, 19, 889 – 899, **2011**.

-White, M. A. *Sustainability: I know it when I see it*. Ecological Economics, 86, 213 – 217, **2013**.

-Zhou, Y. *A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability*. Journal of Hydrology 370, p 207–213, **2009**.