UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FERRO-BACTÉRIAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA
ESTUDO DE CASOS NO CEARÁ

MARIA AMÉLIA SOUZA MENEZES

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração: Recursos Minerais e Hidrogeologia

São Paulo
1992

MARIA AMELIA SOUZA MENEZES
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO
43
S.f
2

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FERRO-BACTÉRIAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA
ESTUDO DE CASOS NO CEARÁ

MARIA AMÉLIA SOUZA MENEZES

Orientador: Prof. Dr. Aldo da Cunha Rebouças

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

COMISSÃO JULGADORA

	nome	ass.
Presidente:	Dr. A.C.Rebouças	
Examinadores:	Drª D.C.P.Casarini	Dorothy C.P. Casarini
	Dr. S.M.Branco	

São Paulo
1992

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 637-1-2
U. S. P.

DEDALUS - Acervo - IGC
30900005284

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

FERRO-BACTÉRIAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA
ESTUDO DE CASOS NO CEARÁ

MARIA AMÉLIA SOUZA MENEZES

ORIENTADOR: Prof. Dr. ALDO DA CUNHA REBOUÇAS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Área de Concentração: Recursos Minerais e Hidrogeologia

São Paulo

1992

Instituto de Geociências
BIBLIOTECA
T 537-1.2
U. S. P.

Instituto de Geo... BIBLIOTECA T537-e.2 U. S. P.

ÍNDICE

PG

LISTA DE FIGURAS III

LISTA DE TABELAS IV

RESUMO V

ABSTRACT VI

AGRADECIMENTOS VII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. Objetivos 3

1.2. Localização 4

2. CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS 4

2.1. Características Climáticas 4

2.2. Sistemas Aquíferos 6

2.2.1 - Parâmetros hidrodinâmicos 11

2.3. Aproveitamento da Água Subterrânea 14

3. METODOLOGIA 16

3.1. Pesquisa Bibliográfica 16

3.2. Cadastramento das Captações 16

3.3. Aspectos Construtivos das Obras de Captações 17

3.4. Coleta e Análises Bacteriológicas e Físico-Químicas das Amostras 22

4. PROCESSOS GEOQUÍMICOS E BIOGEOQUÍMICOS DO FERRO NA ÁGUA 25

PG

4.1. Ocorrência do Ferro na Água..... 26

4.2. Oxidação e Redução..... 27

4.3. Diagrama Eh-pH..... 30

4.4. Ação dos Microorganismos..... 32

4.5. Processos Bioquímicos..... 35

4.6. Influência dos Microorganismos nas Transformações do Ferro..... 37

5. FERRO-BACTÉRIAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA..... 40

5.1. Características das Ferro-Bactérias..... 40

5.1.1 - Ocorrência..... 42

5.1.2 - Aspectos fisiológicos..... 44

5.1.3 - Classificação e morfologia..... 46

5.2. Processos de Corrosão e Incrustação..... 53

5.3. Métodos de Tratamento..... 55

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES..... 58

6.1. Análises Bacteriológicas..... 62

6.2. Análises Físico-Químicas..... 69

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... 75

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 77

LISTA DE FIGURAS

PG

FIGURA 01. LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS 5

FIGURA 02. MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO CEARÁ 7

FIGURA 03. PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR RASO 19

FIGURA 04. PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR AQUÍFERO MISSÃO VELHA 20

FIGURA 05. PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR AQUÍFERO MAURITI/SERRA GRANDE 21

FIGURA 06. PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR BARREIRAS/CRISTALINO 23

FIGURA 07. DIAGRAMA pH-Eh PARA ESPÉCIES DE FERRO E DE OUTROS ÍONS ESTÁVEIS EM SOLUÇÃO AQUOSA COM FERRO, ENXÔFRE, CARBONO E FERRO DISSOLVIDO 31

FIGURA 08. DIAGRAMA pH-Eh PARA ESPÉCIES DE FERRO EM RELAÇÃO A OCORRÊNCIA DE FERRO-BACTÉRIA NO MEIO AMBIENTE 43

FIGURA 09. FILAMENTOS DE CRENOTRHRIX 49

FIGURA 10. GALLIONELLA 51

FIGURA 11. SIDEROCOCCUS 52

FIGURA 12. PROCESSO DE CORROSÃO ELETROLÍTICA 54

FIGURA 13. PONTOS DE COLETAS DE ÁGUA 61

FIGURA 14. REDUÇÃO DE FERRO-BACTÉRIA PELA APLICAÇÃO CONTÍNUA DE CLORO LIVRE 66

FIGURA 15. HISTOGRAMA DE DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA PARA FERRO TOTAL E FERRO FILTRADO (Em mg/l) NO AQUÍFERO ALUVIAL 67

LISTA DE TABELAS

PG

TABELA 01. PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS FAVORÁVEIS AO CRESCIMENTO DE FERRO-BACTÉRIAS 45

TABELA 02. GÊNEROS DE BACTÉRIAS QUE PRECIPITAM O FERRO 48

TABELA 03. MÉTODOS DE TRATAMENTO PARA CONTROLE DO CRESCIMENTO DE FERRO-BACTÉRIAS 56

TABELA 04. QUANTIDADE DE COMPOSTOS DE CLORO REQUERIDA PARA PRODUZIR CONCENTRADOS DE CLORO POR LITRO DE ÁGUA 57

TABELA 05. PARÂMETROS HIDRÁULICOS DOS POÇOS DA ÁREA 59

TABELA 06. CONCENTRAÇÕES DE FERRO-BACTÉRIAS E FERRO TOTAL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA. 64

TABELA 07. CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA 71

RESUMO

Ferro-bactérias são microorganismos aeróbicos, encontrados comumente na água subterrânea.

A água contendo ferro-bactéria não é aceitável para consumo, apesar de as ferro-bactérias não serem consideradas organismos patogênicos de veiculação hídrica. Entretanto, provocam um desagradável sabor e odor, alteram a coloração e modificam sensivelmente as características naturais da água.

A presença de ferro-bactéria em poços causa sérios problemas para os serviços de abastecimento de água, com redução da sua capacidade específica e vida útil, além de deteriorar a qualidade da água do ponto de vista da potabilidade, e de afetar as redes de distribuição, adutoras e revestimentos metálicos dos poços, devido a ação dos processos de corrosão e incrustação.

O comportamento químico do ferro e a sua solubilidade dependem da intensidade da oxidação ou redução que ocorre no sistema, influenciados por fatores físico-químicos, tais como, pH, Eh, oxigênio dissolvido e microorganismos.

Os processos biogeoquímicos influenciam o comportamento do ferro na água e exercem um importante papel nas suas transformações.

ABSTRACT

Iron bacteria are aerobic micro organisms easily found in groundwater.

Groundwater containing iron bacteria is not acceptable for human consumption, even though iron bacteria are not considered as pathogenic organisms. However these bacteria may cause unpleasant taste, odour, turbidity and colour of the water, and also change its natural concentration.

The presence of iron bacteria in wells can cause serious problems for water supply services. They induce the reduction of hydraulic efficiency like the specific capacity and the useful life of wells. It can also damage the quality of water concerning potability.

In addition, it may affect the distribution net-work and the metallic lining of wells because of corrosion and incrustation.

The chemical behaviours and solubility of iron depends on the intensity of oxidation or reduction, influenced by physical and chemical factors, such as pH, Eh, dissolved oxigen and microorganisms.

The biogeochemical processes influence the behaviours of iron water. They also play an important role in the changes of iron.

AGRADECIMENTOS

Ao professor doutor Aldo da Cunha Rebouças pela orientação, estímulo e amizade conferidos ao longo das diferentes etapas do curso e da dissertação.

À Companhia de Água e Esgotos do Ceará - CAGECE, por ter permitido o meu afastamento para a pós-graduação e por ter apoiado e subsidiado as viagens de campo e a realização das análises em seu laboratório.

Ao Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, em particular ao Departamento de Geologia Econômica, Geofísica Aplicada e Hidrogeologia e ao Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas - CEPAS, pela franquia de suas instalações durante a pós-graduação.

Ao bioquímico Heitor Ribeiro Filho, responsável pelo Laboratório da CAGECE, que fez as análises de água com toda dedicação.

Aos professores doutores José Milton Benetti Mendes, Robert Cleary, Mária Szikszay, Reinholt Ellert, Annkarin Aurelia Kimmelmann e Silva, Alberto Pacheco, Uriel Duarte e Nelson Ellert, pelas sugestões, bibliografia e idéias pertinentes à dissertação.

Ao geólogo Mário Fracalossi Júnior pela valiosa colaboração no processamento dos dados no computador, na confecção das tabelas e nas discussões durante a realização deste trabalho.

À professora doutora Maria Marlúcia Freitas Santiago pela leitura, críticas e sugestões apresentadas ao texto.

Ao geólogo Seiju Hassuda pelo apoio, incentivo e sugestões em todas as idas e vindas a São Paulo.

Ao geólogo Ailton Salviano de Souza pelo cuidadoso trabalho de digitação e "design" das tabelas.

À professora Luzimar Monte Morais pela revisão final do texto.

À técnica Cláudia Rodrigues pelo levantamento e sistematização das análises de água.

Ao engenheiro civil e sanitarista Hascalon Rodrigues Lima, da Fundação SESP, por ter permitido a coleta de amostras de água nos sistemas de abastecimento administrados pela Fundação.

Aos amigos Sueli Yoshinaga, Mara Akie Iritani, João Raimundo de Araújo, Mário Sirou Kanehisa, Maria Tereza Castelo Branco Cleary, pelas discussões e ajuda mútua nos trabalhos durante a pós-graduação.

Aos amigos Francisco Lopes Neto e Francisco Camurça Teles pela gentileza de terem desenhado as figuras.

1 - INTRODUÇÃO

A pesquisa sobre ferro-bactéria, iniciada em 1986 no CEPAS - Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da USP, foi motivada pelas frequentes solicitações de usuários de poços que observavam a mudança na coloração e no sabor da água, manchas em roupas, em aparelhos sanitários, e em reservatórios, obstrução e corrosão de tubulações, além de redução na vazão dos poços.

Um levantamento bibliográfico constatou que, no Brasil, até aquela data, não havia trabalhos publicados sobre o assunto, e só recentemente vêm sendo investigados os problemas decorrentes do desenvolvimento de ferro-bactérias em água subterrânea e em poços.

A nível nacional ainda não há um inventário sobre o número de poços infestados, o grau de poluição e a sua distribuição espacial. Todavia, as informações veiculadas no meio técnico sugerem que existe um grande número de poços infestados por ferro-bactérias, praticamente em todo o País.

É importante ressaltar a participação da água subterrânea no Brasil como fonte de abastecimento público às populações de 70% dos núcleos urbanos de pequeno e médio portes, e até de cidades com quase um milhão de habitantes com captações realizadas através de poços, cujos custos são muito menores do que as captações superficiais (Rebouças e Menezes, 1989). Portanto, um grande esforço deverá ser empreendido no sentido de se desenvolverem métodos de tratamento eficazes no combate às ferro-bactérias, aliados a programas de manutenção periódica, de modo a não inviabilizar a construção de poços em diversas regiões do país.

Além do uso para abastecimento público, complexos industriais, situados em regiões onde as condições hidrogeológicas são favoráveis, também utilizam a água subterrânea como fonte de suprimento.

No Ceará, a água subterrânea é responsável pelo abastecimento de 108 municípios dos 178 existentes, ou seja 60% do total,

atendendo cerca de 30% da população urbana do Estado. A população rural também se abastece, praticamente, de água subterrânea através de poços.

No Brasil, o estudo pioneiro sobre ferro-bactéria, foi da Companhia de Saneamento de Minas Gerais - COPASA que executou um "Projeto de Pesquisa de Ferro-bactérias em Poços", no período de 84-87 (COPASA-1988). A pesquisa foi interrompida por falta de recursos financeiros.

No Ceará, também por contenção de despesas, um projeto idêntico em execução pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará - CAGECE, também foi suspenso em 1989.

A água contendo ferro-bactéria não é aceitável para consumo humano, embora as ferro-bactérias não sejam consideradas organismos patogênicos de veiculação hídrica. Entretanto, esses microorganismos são capazes de provocar forte alteração na coloração da água, elevação da turbidez e um desagradável sabor e odor, modificando sensivelmente as condições de potabilidade da água, seja para uso doméstico ou industrial.

As ferro-bactérias ocorrem praticamente em todo o sistema: poços, redes de distribuição, adutoras, reservatórios e equipamentos. Danificam as tubulações e revestimentos metálicos, devido a ação dos processos de corrosão e incrustação, e reduzem a capacidade específica e a vida útil dos poços, além de deteriorar a qualidade da água do ponto de vista da potabilidade. O que isto representa em termos de custo financeiro para o setor público e/ou privado ainda não foi avaliado.

A nível estadual, observou-se, a princípio, que diversos sistemas de abastecimento de água, notadamente das aluviões dos rios Jaguaribe e Acaraú, cujas captações são constituídas de poços tubulares, apresentavam sérios problemas de obstrução, corrosão e incrustação com reflexo direto no usuário que reclamava do sabor e da coloração da água. Em alguns casos, o processo de corrosão foi tão intenso que as secções filtrantes foram rompidas e todo o resto da estrutura metálica do poço foi atingida. É o exemplo de um poço de Santana do Acaraú, cidade localizada no vale do rio Acaraú.

Procedia-se , então, a construção de novos poços, substituindo-se os materiais de aço galvanizado por aço inoxidável e/ou PVC, pré-filtro mais bem selecionado e maior controle na desinfecção dos equipamentos de perfuração. A construção de uma nova captação resultava em um custo adicional elevado e o mais grave é que na maioria dos casos, as ferro- bactérias persistiam, a exemplo de Tabuleiro do Norte, uma cidade no vale do Jaguaribe.

Dentro do programa de desenvolvimento operacional da Empresa foi proposto um plano de trabalho para avaliar o nível de infestação nos sistemas potencialmente propensos e aplicar métodos de tratamento que melhor se adequassem a cada caso. O trabalho foi iniciado com a elaboração de diagnósticos de algumas captações, apoiados nas análises de laboratório. Entretanto, não houve condições de concluir nem mesmo a primeira fase.

A fase complementar, que seria a aplicação dos métodos de tratamento não pôde ser executada, dentre outros motivos, por mudanças na diretoria da Empresa, onde foram redefinidas as prioridades, e a falta de recursos financeiros.

1.1. Objetivos

Os principais objetivos de estudo são:

a) diagnosticar as ocorrências de ferro-bactérias, em poços construídos em diversos aquíferos, no Estado do Ceará;

b) propor a aplicação de métodos de campo para controle e desinfecção em poços e sistemas de abastecimento de água;

Para se atingir esses objetivos, analisam-se as condições hidrogeológicas e hidroquímicas relacionadas à ocorrência do ferro e do desenvolvimento de ferro-bactérias nos poços existentes nas áreas selecionadas.

Discutem-se os processos bioquímicos envolvidos. Propõem-se medidas preventivas e investigadoras.

1.2. Localização das Áreas

As localidades selecionadas abrangem os principais aquíferos do Estado do Ceará: aluviões, dunas, Formação Serra Grande (Bacia do Araripe); Grupo Barreiras, embasamento cristalino. Essas áreas localizam-se nas porções oeste, leste e centro-sul do Estado. (Figura 01)

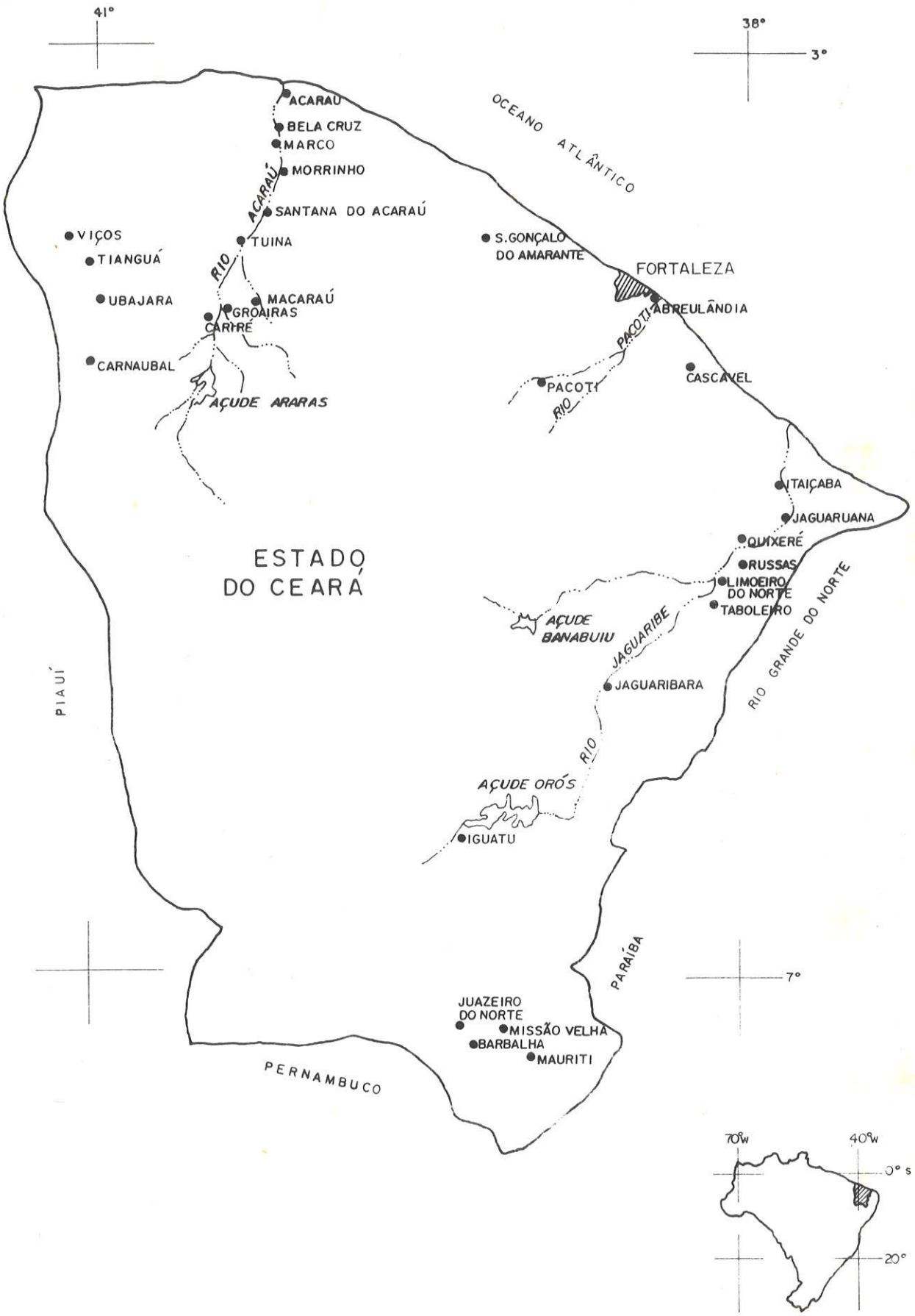
2 - CONDIÇÕES HIDROGEOLÓGICAS.

2.1. Características Climáticas

No Ceará, predomina o clima quente e estável com temperaturas elevadas, porém de pequenas amplitudes, forte evaporação e, principalmente a precipitação pluviométrica com distribuição espacial e temporal extremamente irregular.

Nos microclimas de regiões de altitudes elevadas (500-1000m), Chapada do Araripe, Serras da Ibiapaba, Baturité e Meruoca e em regiões próximas do litoral, as temperaturas são mais amenas e os índices pluviométricos são mais altos prevalecendo, entretanto, a irregularidade no regime pluviométrico que, no Ceará, se constitui na principal característica climática.

Os índices pluviométricos variam de mais de 400mm/ano nos sertões dos Inhamuns até 1800mm/ano na Serra da Ibiapaba, com predominância daqueles com mais de 800mm/ano. Na região litorânea, os índices pluviométricos superam a faixa de 1000mm/ano,



● LOCALIDADES COM POÇOS PESQUISADOS

FIGURA 01 — LOCALIZAÇÃO DAS ÁREAS ESTUDADAS.

decaindo consideravelmente para o interior, até cerca de 500-600mm/ano, onde não há influência litorânea.

A distribuição pluviométrica anual no Ceará estabelece nitidamente duas estações: uma chuvosa, denominada de "inverno" e outra seca, chamada "verão". O período de chuvas concentra-se, quase que exclusivamente no primeiro semestre do ano, sendo o trimestre fevereiro/abril ou março/maio o de pluviosidade mais elevada. As precipitações da estação chuvosa provocam, em anos de chuvas intensas, inundações de grande proporções, causando calamidades nas áreas de jusante das bacias, principalmente nas do Jaguaribe e Acaraú.

A estação da seca é caracterizada pela ausência quase total de precipitação, acarretando, consequentemente, a elevação das temperaturas e das taxas de evaporação que provocam perdas hídricas consideráveis e aumentam a concentração de sais solúveis na água. A taxa média anual de evaporação situa-se em torno de 2300mm para as zonas litorâneas até 2800mm para as regiões interiores.

O regime térmico caracteriza-se por temperaturas médias, máximas e mínimas em torno de 22° a 23°C para as zonas litorâneas e regiões altas com microclimas e 33° a 34°C para as zonas interiores.

A umidade relativa do ar é, em média, 60% nas regiões mais secas e nas zonas mais úmidas em torno de 75%, sendo que na estação chuvosa é quase sempre superior a 80%.

2.2. Sistemas Aquíferos

As formações geológicas que constituem os principais aquíferos do Ceará podem ser divididas em duas grandes províncias: uma cristalina (permeável por fissuras das rochas) e uma sedimentar (permeável por porosidade granular). O mapa geológico da Figura 02

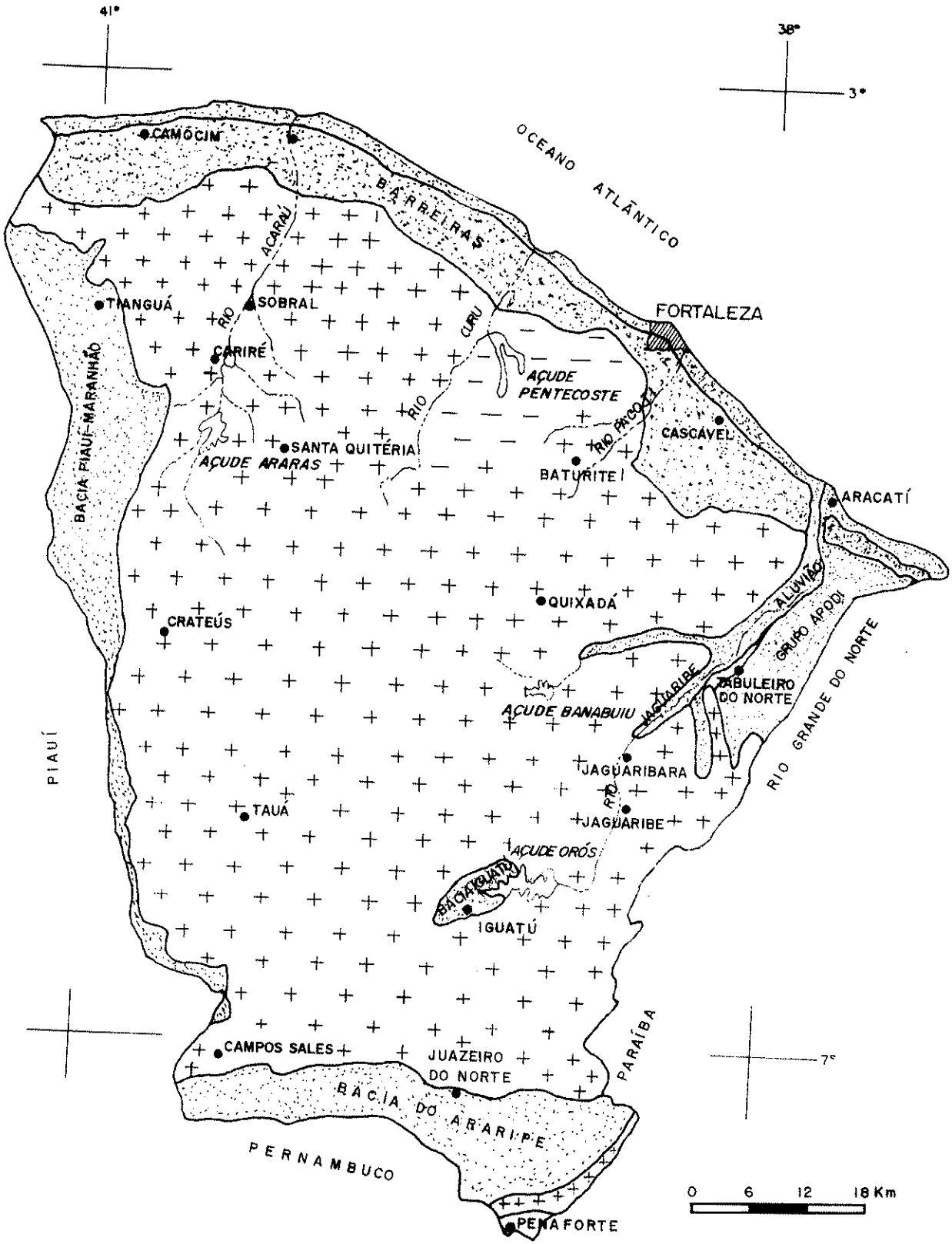


FIGURA 02 – MAPA GEOLÓGICO DO CEARÁ

(FONTE – *CPRM* PROJETO FORTALEZA – 1984)

– CRISTALINO

– SEDIMENTO

mostra a predominância das rochas cristalinas no Ceará.

Sob a denominação de rochas cristalinas estão reunidas todas as rochas de origem ígnea e metamórfica, de idade pré- cambriana, representadas por uma variada fácies petrográfica onde predominam migmatitos, xistos, granitos e gnaisses, que recobrem 70% dos terrenos do Ceará.

O sistema cristalino, considerado de fraca potencialidade, constitui um meio fraturado, descontínuo, heterogêneo, anisotrópico, cujas dimensões estão limitadas às zonas fendilhadas. Os poços construídos nesse sistema captam água das reservas acumuladas nas zonas de fraturamento e a maior ou menor vazão depende da interceptação e intensidade do sistema de fraturas.

As unidades geológicas da província sedimentar que se destacam como meio aquífero estão representadas pela Bacia Sedimentar do Araripe - Formações Cariri (SD) e Missão Velha (K); Formação Serra Grande (D), Aluviões (QHa) e Dunas (QHe).

A geomorfologia da sequência sedimentar da Chapada do Araripe, formações Santana (KIS) e Exu (KISe), é conformada em alti-plano com cotas de até 900m no topo da sequência, cujos estratos apresentam suaves mergulhos para norte, fazendo com que as águas infiltradas nos arenitos da formação Exu afiorem através de cerca de 100 fontes, que drenam vazões significativas para alimentar os aquíferos da bacia e os rios da região, além de constituirem formas de captação para abastecimento público de várias cidades e distritos do Cariri. A água é de excelente qualidade físico-química.

As formações Missão Velha e Cariri estão em áreas de pediplano com cotas em torno de 400m. Composta de arenitos friáveis, avermelhados, com granulometria variando de fina a grosseira e eventuais intercalações de níveis argilosos, a formação Missão Velha encerra o maior potencial hidrogeológico da bacia.

A formação Cariri é constituída por arenitos esbranquiçados, com granulometria entre média e conglomerática, silicificados próximos à base, com estratificação cruzada. Esse aquífero se comporta como um meio anisotrópico, caracterizando-se por uma

porosidade secundária.

A formação Serra Grande constitui a sequência basal da Bacia do Parnaíba, ocorrendo sobreposta às rochas do embasamento cristalino formando a borda da Serra da Ibiapaba. A topografia é ondulada e a litologia é exposta através de escarpas abruptas.

Esta formação se compõe de arenitos finos e conglomeráticos, com estratificação cruzada, ocorrendo níveis lenticulares de folhelhos síltico. O processo de recarga desta unidade consiste, principalmente, na infiltração direta a partir das precipitações pluviométricas. Na área de afloramento, comporta-se como aquífero livre.

As aluviões distribuem-se segundo faixas irregulares ao longo dos rios e riachos da região, preenchendo suas calhas em vales abertos e rasos, sobrepostas a rochas mais antigas.

Os aquíferos aluviais dos rios Jaguaribe e Acaraú são considerados os mais expressivos do Ceará, haja vista sua alta permeabilidade, espessura saturada considerável, elevada capacidade de armazenamento e alta transmissividade. São constituídos litologicamente por areias, argilas, sendo as areias grosseiramente selecionadas, com intercalações de seixos, de coloração cinza clara com variações para tonalidades escuras e espessuras variadas.

Dados de sondagens mecânicas executadas em Tabuleiro do Norte e Limoeiro do Norte, indicaram uma espessura do pacote sedimentar de 30m e 35m, respectivamente. No rio Acaraú, as variações de espessura do depósito são muito acentuadas (5 a 25m), ocorrendo frequentes intercalações de níveis, consequência da atividade deposicional em regime torrencial. Em geral, comportam-se como aquíferos do tipo livre e os poços construídos têm produzidos vazões, em regime de bombeamento constante, superiores a $50m^3/h/poço$.

A recarga das aluviões é realizada diretamente pelas precipitações pluviométricas e rede de drenagem, notadamente em épocas de enchentes. O fluxo de base também é mantido pelos próprios rios, perenizados pelo açude Orós - rio Jaguaribe e açude Araras - rio Acaraú. Os outros rios da região, na sua maioria, são

intermitentes. Como exutórios principais mencionam- se a evapotranspiração e as perdas para a rede hidrográfica nos períodos de estiagem.

As aluviões do rio Jaguaribe constituem uma extensa planície, ligeiramente inclinada em relação ao leito. A partir do açude Orós, o rio corre com largura média de 4km percorrendo aproximadamente 170km até a cidade de São João do Jaguaribe e daí mais 130km até a foz, na cidade de Aracati.

As aluviões do rio Acaraú formam uma extensa planície o que permite acumular grande quantidade de água subterrânea através da infiltração da recarga pluviométrica. A partir do açude Araras, o rio corre com largura média de 2km percorrendo 160km até desembocar no mar, na cidade de Acaraú.

O aquífero aluvial é largamente explorado para atender as demandas do consumo humano, irrigação e pecuária. A CAGECE e FSESP têm executado e operado com sucesso captações através de poços tubulares e amazonas em mais de trinta localidades ribeirinhas, cujas vazões exploráveis deverão suprir a demanda urbana projetada até o ano 2000. Em todas as cidades, as baterias de poços foram construídas segundo as linhas de fluxo, paralelamente ao eixo do rio.

Esse fato demonstra a importância do aquífero aluvial como fonte de suprimento hídrico à população e aos projetos agropecuários situados no vale, haja vista a sua extensão, a boa qualidade da água para consumo humano, irrigação e pecuária, vazões exploráveis superiores às vazões de poços no cristalino e os custos dos poços acessíveis a grande parcela da população.

As dunas são sedimentos eólicos inconsolidados, constituídos de areias quartzozas finas a médias, bem classificadas, com um pouco de argila e silte, que repousam diretamente sobre os sedimentos terciários areno-argilosos do grupo Barreiras. Caracterizam-se pela morfologia ondulada, formando cordões grosseiramente alinhados na direção leste-oeste, distribuídos pa ralelamente à linha de costa.

As dunas constituem um aquífero livre, de altíssima capacidade de infiltração potencial, com recarga assegurada essen-

cialmente pelas precipitações pluviométricas. A água do aquífero escoa principalmente para as lagoas, localizadas em depressões interdunas, mas a maior perda de água do aquífero é pela evapotranspiração que ocorre por conta da pequena profundidade da água subterrânea e da reduzida espessura das areias.

A exploração do aquífero dunas visando o abastecimento de água das cidades situadas na zona costeira, vem sendo feita pela CAGECE há vários anos. As captações são construídas através de poços tubulares rasos, perfurados em diâmetro de 10" e revestidos em 6". Do ponto de vista hidráulico, as unidades que estão em operação têm apresentado resultados plenamente satisfatórios.

Os aquíferos de dunas requerem cuidados especiais, desde o dimensionamento das vazões de exploração dos poços até a operação do sistema, como forma de prevenir o avanço da intrusão salina para o continente. Em regiões densamente povoadas, também há riscos de poluição decorrentes, dentre outros, da ausência de esgotamento sanitário.

2.2.1 - Parâmetros hidrodinâmicos

Os valores dos parâmetros para cada aquífero foram obtidos dos ensaios de bombeamento realizados em poços existentes, operados pela CAGECE, já que são os poços que dispõem de ensaios confiáveis.

No aquífero Missão Velha, as propriedades hidráulicas foram determinadas a partir da interpretação dos ensaios de bombeamento realizados em 28 poços, onde se considerou o aquífero livre, em regime transitório, com penetração parcial e porosidade efetiva média de 10%. Assim sendo os valores foram calculados segundo a equação modificada de Jacob:

$$T = \frac{Q}{4\pi\ sw}\left\{ \ln \frac{2{,}25Tt}{rwS} + \frac{2 - 2p}{p} \ln \frac{(1-p)hs}{rw} \right\}$$

Onde os valores médios encontrados, admitidos para o aquífero, são os seguintes (Fracalossi, 1986):

$T = 4{,}93.10^{-3} m^2/s$

$k = 4{,}99.10^{-5} m/s$

O aquífero Cariri ou aquífero Mauriti é caracterizado por uma permeabilidade predominantemente de fraturas e exibe um comportamento anisotrópico. Para fins de cálculo empregou-se um ajuste linear evidenciando a evolução do rebaixamento específico com o tempo, uma vez que os testes foram efetuados sempre com vazão variável. Desta forma, os parâmetros hidrodinâmicos foram obtidos a partir dos dados de ensaios de bombeamento de 14 poços, através da seguinte equação:

$\left(\frac{S}{Q}\right) = a + b \log t$ (t = tempo em minutos), onde

$$t = \frac{2{,}303}{4\pi\ b}$$

Os valores médios calculados, admitidos para o aquífero, são os seguintes (Fracalossi, 1986):

$T = 2{,}43.10^{-3} m^2/s$

$k = 2{,}97.10^{-6} m/s$

No aquífero dunas, os valores dos parâmetros hidrodinâmicos obtidos foram determinados a partir dos ensaios de bombeamento realizados em 63 poços existentes. Os testes foram interpretados segundo os seguintes métodos:

- Jacob (regime transitório)

$$T = \frac{Q}{4\pi\ sw} \ln \frac{2{,}25Tt}{rw^2 s} + \frac{1-p}{p} \ln \frac{(1-p)hs}{rw}$$

- Dupuit (regime estacionário)

$$k = \frac{\pi}{Q} \{ ho^2 - [(1-\alpha)ho]^2 \} \ / \ \{ \ln(\frac{ri}{rw}) + \frac{1-p}{p} \ln \frac{1-p}{r-w} \}$$

Como representativo do aquífero foram considerados os seguintes valores médios (Campos e Menezes, 1982):

$T = 1{,}79.10^{-3} m^2/s$

$k = 2{,}00.10^{-4} m/s$

Na definição dos parâmetros hidrodinâmicos do aquífero aluvial, uma importante característica diz respeito à porosidade eficaz que representa o volume de água livre da rocha.

As aluviões são rochas porosas formadas, ora de materiais grosseiros de alta permeabilidade, ora de materiais finos por vezes argilosos, de baixa permeabilidade. Essa complexidade lhes confere

um caráter de heterogeneidade que pode estar relacionada às condições naturais do meio, tais como as variações climáticas sazonais, espessuras saturadas irregulares, variações faciológicas acentuadas, dentre outras.

Portanto, os valores dos parâmetros hidrodinâmicos não correspondem a um valor médio para o aquífero, pois refletem basicamente a composição litológica da aluvião e o tipo do rio/riacho onde se desenvolve.

Para o cálculo dos parâmetros do aquífero Serra Grande foi utilizada a equação de Jacob, considerando a porosidade de 1%. Os valores médios encontrados resultam dos ensaios de bombeamento de 13 poços existentes:

$T = 2{,}98.10^{-4} m^2/s$

$K = 1{,}53.10^{-5} m/s$

A transmissividade encontrada para o Barreiras/Cristalino é muito variável ($1{,}00.10^{-3}$ - $8{,}10.10^{-4}$) em função do nível de fraturamento do cristalino na área. O valor calculado refere-se aos ensaios de bombeamento realizados em 10 poços na cidade de Cascavel - CE, obtido pelo método gráfico de Jacob.

$T_{médio} = 4{,}93.10^{-4} m^2/s$

2.3. Aproveitamento da Água Subterrânea

A água subterrânea é largamente utilizada na função nobre do abastecimento público das cidades do interior do Ceará. Das 178 sedes municipais, 108 são abastecidas por mananciais subterrâneos, aí incluindo-se comunidades de pequeno porte e sedes municipais

com até 200 mil habitantes, como é o caso da cidade de Juazeiro do Norte.

Na zona rural, a água subterrânea é utilizada pela população não apenas para o consumo humano mas também para dessedentar rebanhos e irrigar pequenas áreas agrícolas, seja através de poços tubulares com chafarizes, cacimbões e cacimbas.

Inexistem informações sanitárias elementares que orientem a obtenção de água de boa qualidade.

Na indústria e na irrigação, o uso da água subterrânea, a nível estadual, ainda é incipiente.

As melhores rochas aquíferas no Ceará estão representadas pelos sedimentos que constituem a bacia sedimentar do Araripe, com cerca de 11.500km^2, ou seja menos de 8% do território do Estado, ocupado predominantemente por rochas cristalinas (70%). Os poços perfurados nesse domínio apresentam um ótimo rendimento (vazões de 15-200m^3/h poço), possibilitando o fornecimento de água de boa qualidade para consumo humano, industrial e agro-pecuário.

As aluviões dos principais rios da região são exploradas intensamente através de poços tubulares rasos, amazonas, drenos horizontais ou cacimbões, tanto para áreas urbanas quanto rurais.

No domínio das rochas cristalinas, há dezenas de milhares de poços construídos ao longo das últimas décadas como forma de atender às populações carentes de água e os pequenos rebanhos, principalmente no meio rural.

Com um custo relativamente baixo em relação as obras de captações superficiais, aliada a excelente qualidade da água subterrânea em geral, os poços vêm sendo construídos em rítmo crescente em função do aumento de demanda, favorecido pelas migrações para os centros urbanos mais desenvolvidos e pela degradação progressiva da qualidade da água dos mananciais de superfície, consequência do crescimento populacional e do desenvolvimento industrial e agro-pecuário desordenado.

Na região semi-árida do nordeste, no Ceará em particular,

onde as condições climáticas propiciam a escassez pluviométrica e as condições geológicas e hidrogeológicas restringem os recursos hídricos, a participação da água subterrânea como fonte de suprimento às populações assume um papel de primordial importância na região, por apresentar menor custo, menor prazo de execução e menor risco de poluição.

3 - METODOLOGIA

3.1. Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica identificou vários trabalhos técnicos sobre ferro-bactérias possibilitando uma melhor compreensão dos diversos aspectos relativos às condições ambientais mais favoráveis ao desenvolvimento desses organismos.

Outras referências obtidas dizem respeito aos processos biogeoquímicos aplicados ao ferro e sua importância na água subterrânea.

Foram pesquisados também os aspectos geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos que permitiram caracterizar as condições hidrodinâmicas dos aquíferos e a classificação química da água.

3.2. Cadastramento das Captações

Foi feito um levantamento sobre os poços em alguns dos sistemas de abastecimentos de água, levando em conta o aquífero, os perfis litológicos e construtivos e os tipos de revestimento utilizados nos poços. Também foram selecionados poços do tipo amazonas

(sem revestimento metálico).

De posse desses dados foi possível adotar alguns critérios para iniciar a amostragem. O primeiro foi a incidência do ferro detectada anteriormente em análises físico-químicas periódicas realizadas pela CAGECE.

A partir dos resultados das análises físico-químicas, observou-se que as aluviões eram as áreas onde havia teores de ferro (em mg/l) mais elevados e por isso, concentrou-se a amostragem nesse aquífero, embora outros aquíferos também tenham sido analisados. Nas aluviões estão implantadas várias captações através de poços sejam tubulares rasos e/ou amazonas, operados pela CAGECE e Fundação SESP/SAAES (atual Fundação Nacional de Saúde).

Foram então cadastrados 55 poços em 29 localidades, sendo 29 tubulares rasos, 15 tubulares profundos e 11 amazonas, distribuídos nos seguintes aquíferos: aluviões - 33 poços; Missão Velha - 10 poços; Serra Grande - 03 poços; dunas - 07 poços; Barreiras/cristalino - 01 poço; Cariri - 01 poço.

3.3. Aspectos Construtivos das Obras de Captação

Nas áreas investigadas, as captações para abastecimento público são constituídas por poços tubulares rasos, poços tubulares profundos e poços amazonas. As profundidades das unidades produtoras variam de conformidade com o aquífero.

Os poços tubulares rasos construídos em aquíferos de dunas e aluviões têm profundidade média da ordem de 10m, excepcionalmente chegam a 30m de profundidade. Foram construídos pelo método de percussão ou com trado mecânico, em diâmetro de 10". Os furos são inteiramente revestidos com tubos de 6" e filtros de aço galvanizado ou de aço inoxidável, do tipo espiralado com ranhuras contínuas e abertura igual ou inferior a 1mm. Possuem envoltório de cascalho quartzoso, selecionado na calibração de 1,5 a 3,5mm, colocado no espaço anular compreendido entre as paredes do poço

e o revestimento definitivo e em seguida são cimentados (Figura 03).

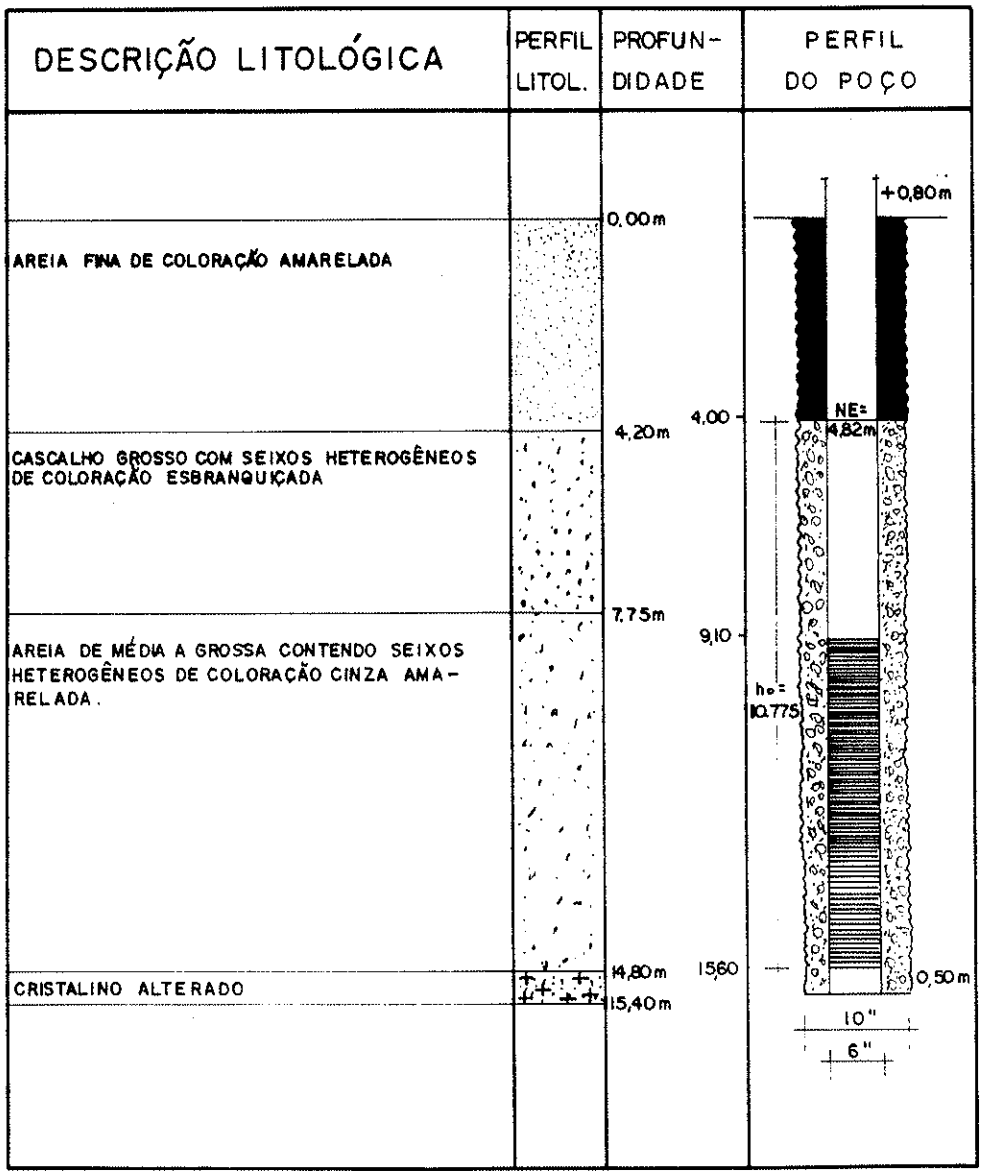
Os poços amazonas, também conhecidos como poços escavados construídos em terrenos aluviais, têm na escavação manual o seu principal método de construção. O diâmetro de um poço de seção circular é bastante variável, sendo que o diâmetro mínimo que permite um operário trabalhar com certa liberdade, dentro do poço, não deverá ser inferior a 1,5m. O limite da profundidade é o topo do embasamento rochoso. Os materiais utilizados são cimento, areia, brita, ferro, madeira e tijolos.

Para a perfuração dos poços na formação Missão Velha (Bacia Sedimentar do Araripe) utilizou-se uma sonda rotativa. Os furos foram realizados inicialmente em diâmetro de $9^{7/8}$" a título de sondagem e após análise das amostras de calha e dos perfis elétricos foram alargados para os diâmetros 22" ou $17^{1/2}$" e 15" até uma profundidade julgada conveniente, na inteira dependência do perfil litológico das camadas atravessadas. Aí então, os poços foram revestidos com tubos de aço preto "schedule" 40 de 10" e 6", sem costura. Os filtros são de aço inoxidável, em ranhuras contínuas de 1mm. O pré-filtro é quartzoso, calibrado na faixa granulométrica de 1,5 a 3,5mm.

O espaço anular entre as paredes do poço e a rocha foi cimentado para proteção da água dos poços contra possíveis infiltrações de água poluída. (Figura 04).

Na formação Cariri/Mauriti (Bacia Sedimentar do Araripe) as perfurações foram executadas por uma sonda rotativa. Os furos foram realizados inicialmente em diâmetro de $8^{5/8}$" a título de reconhecimento e posteriormente alargados para $12^{1/4}$" após caracterização da formação Cariri/Mauriti. Os revestimentos são de aço galvanizado de 6" (DIN 2440) e os filtros também são de aço galvanizado com ranhuras de 1mm. O pré-filtro utilizado é exclusivamente de quartzo calibrado na fração de 1,5 a 3,5mm. Como proteção sanitária é feita a cimentação no espaço anular, no intervalo não preenchido por cascalho (Figura 05).

Na formação Serra Grande (Bacia Sedimentar do Parnaíba) adotou-se o mesmo procedimento da perfuração utilizada para os poços da formação Mauriti.



LEGENDA

- CIMENTAÇÃO
- FILTRO
- PRE-FILTRO
- TUBO GALVANIZADO.

FIGURA 03 — PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR RASO

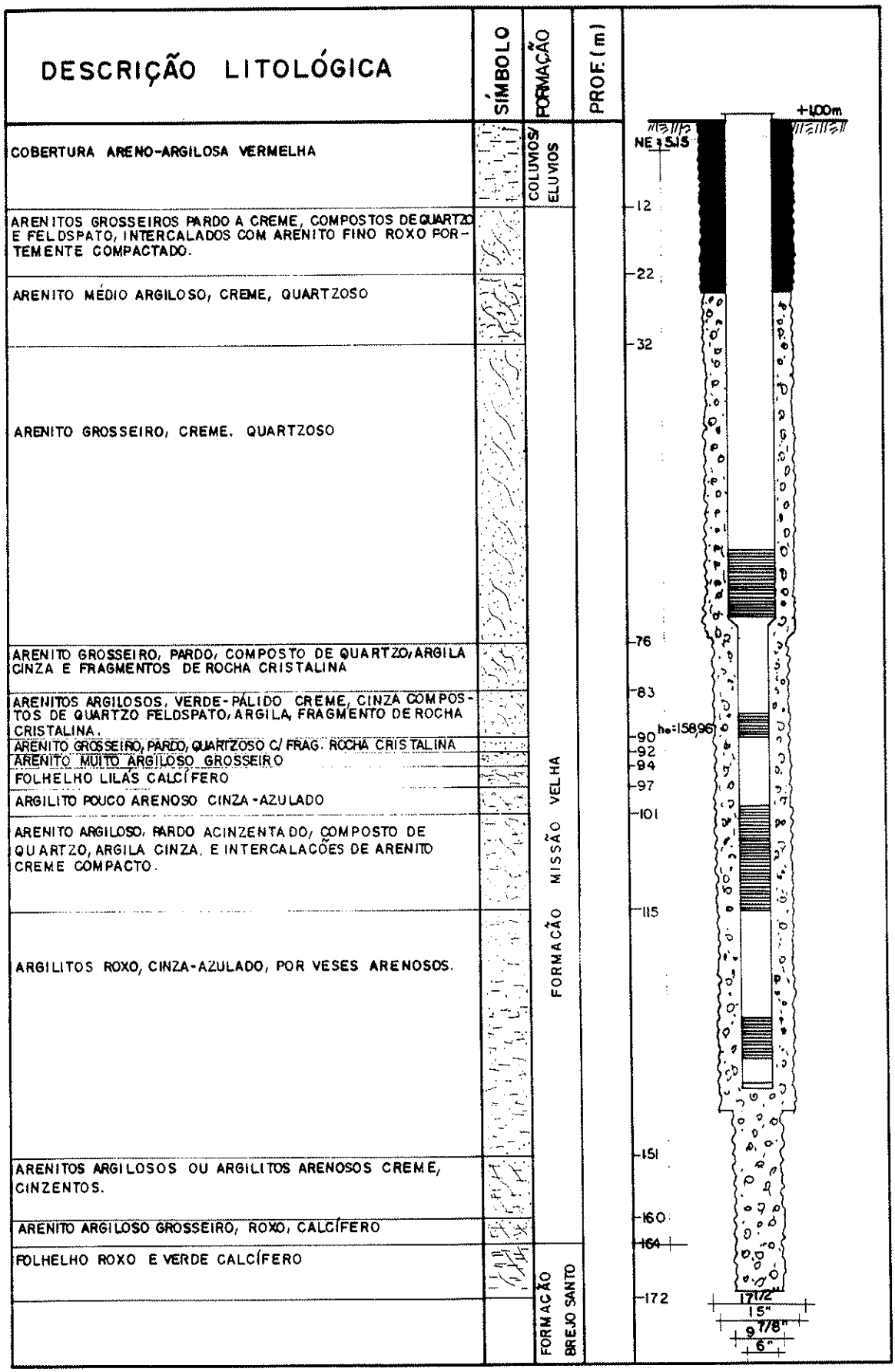
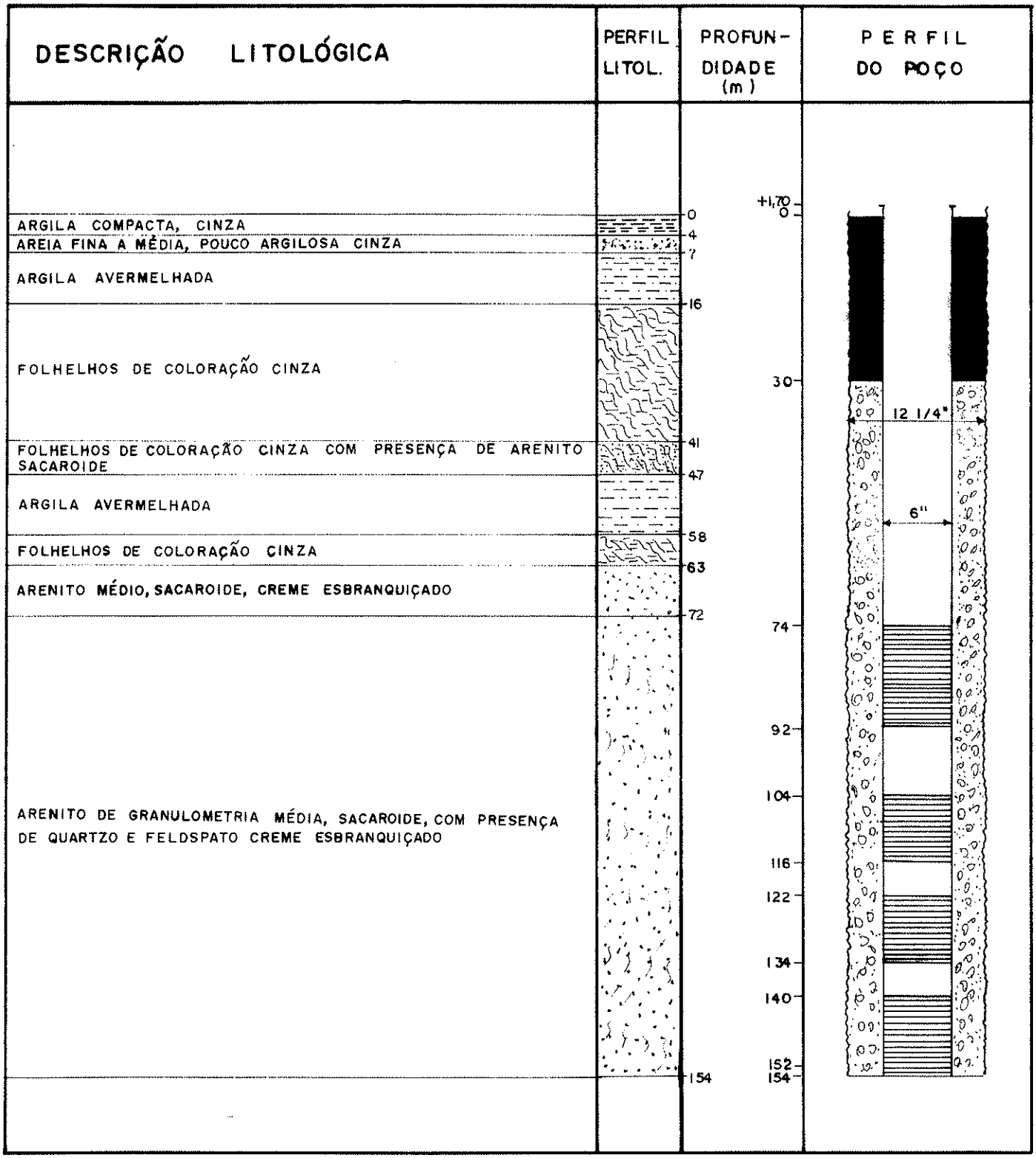


FIGURA 04 — PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR AQUÍFERO MISSÃO VELHA



LEGENDA

- TUBO GALVANIZADO
- FILTRO GALVANIZADO
- PRE-FILTRO
- CIMENTAÇÃO

FIGURA 05 – PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR AQUÍFERO MAURITI/SERRA GRANDE

No Barreiras/Cristalino, os poços são construídos utilizando-se uma sonda percussora para perfurar até o topo do cristalino e a seguir uma pneumática. Os poços, em geral, só têm revestimento na parte superior, correspondente à rocha alterada (Figura 06).

3.4. Coleta e Análises Bacteriológicas e Físico-Químicas das Amostras

A coleta de amostras de água para análises de ferro- bactéria e parâmetros físico-químicos foi dividida em três etapas, abrangendo 32 localidades e 64 amostras.

Na primeira etapa, realizada entre março e setembro de 1988, foram coletadas 43 amostras em poços tubulares rasos, profundos e, amazonas, redes e reservatórios. Na segunda fase, realizada em julho/89, além da coleta de água em poços, incluiu- se açudes e adutoras de água bruta, num total de 11 amostras. A última etapa foi efetuada em janeiro/90, em poços tubulares rasos e uma lagoa.

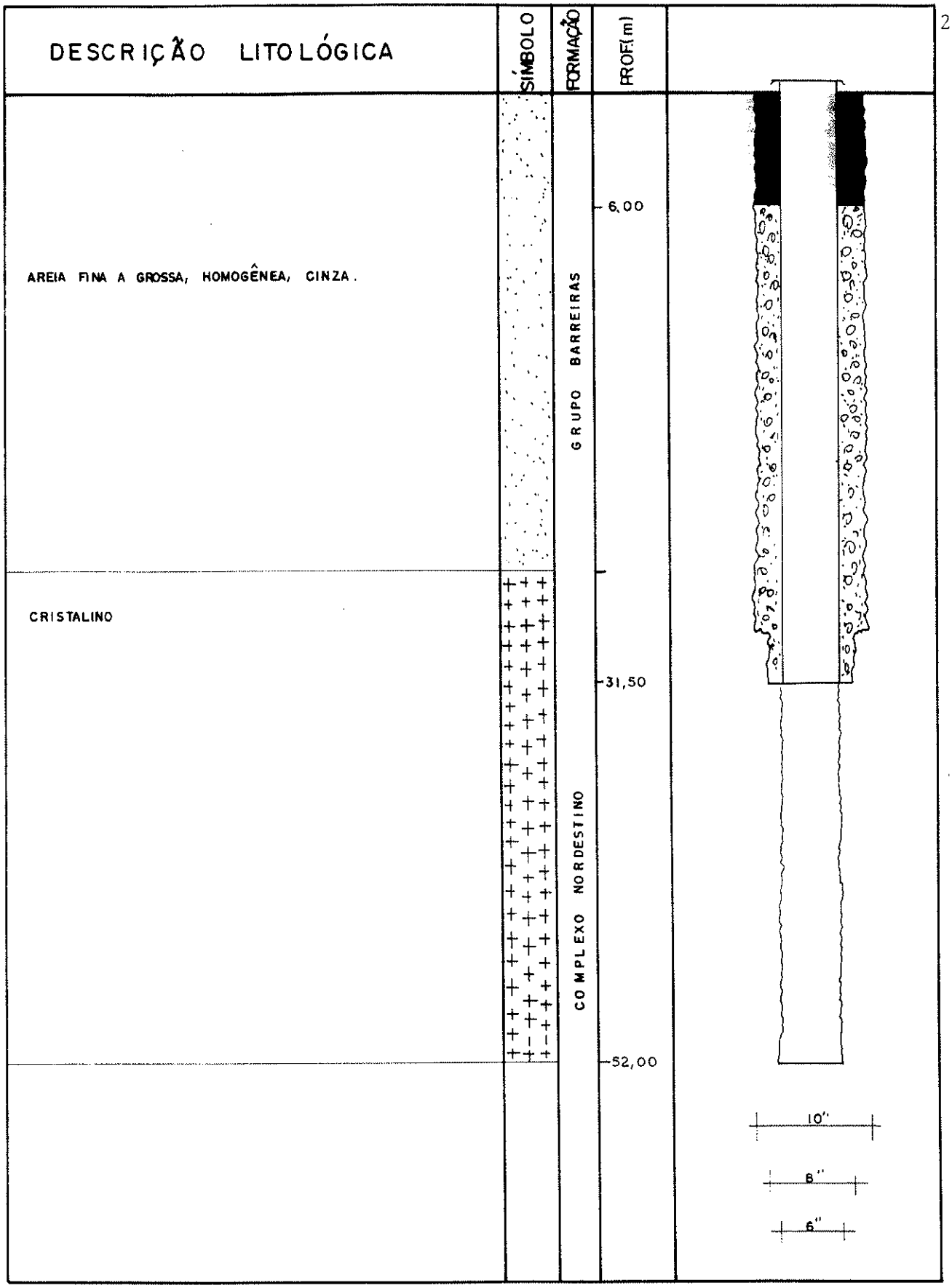
As amostras de água foram coletadas com auxílio de um amostrador manual ou diretamente através de bombeamento ou de torneiras de saída dos poços.

Nas amostras para medir o teor de ferro dissolvido, foi adicionado HCl para baixar o pH e manter o ferro em solução, evitando a precipitação de hidróxido de ferro. Após a realização das coletas, as amostras foram acondicionadas em garrafas plásticas de 1 litro e em frascos de vidro de 250ml, rotuladas e preservadas em caixas de isopor com gelo. A seguir, encaminhadas ao laboratório da CAGECE que adota os procedimentos de análises do *Standard Methods*.

Nas análises de campo foram determinados pH, Eh, condutividade elétrica específica e temperatura da água.

Os aparelhos utilizados em campo foram um medidor de pH e um condutivímetro portáteis, fabricados pela DIGIMED.

As análises para identificação de ferro-bactérias foram feitas



LEGENDA

- TUBO GEOMECÂNICO
- CASCALHO
- CIMENTAÇÃO

FIGURA 06– PERFIL LITOLÓGICO E CONSTRUTIVO POÇO TUBULAR BARREIRAS/CRISTALINO

no laboratório da CAGECE, segundo Normalização Técnica CETESB L5-207 - contagem de colônias de bactérias que precipitam o ferro (CCBPF), pela técnica de semeadura de placas em meio de cultura de agar citrato férrico amoniacal.

A preparação do meio de cultura para a amostra requer a utilização de reagentes, como o tiossulfato de sódio, sulfato de magnésio, sulfato de amônio, nitrato de sódio, fosfato de potássio diabásico, água destilada, cloreto de cálcio, citrato férrico amoniacal, agar e hidróxido de sódio que são diluídos pelo acréscimo de 1000ml de água destilada e trabalhados até completa fusão do meio que, a seguir, é guardado em tubos fechados, de 15 X 150mm fora do alcance da luz, por um período de 15 dias.

Para determinar a densidade de bactérias que precipitam o ferro em uma amostra, o princípio básico é que estejam definidas as condições de nutrição, temperatura e tempo de incubação e, se houver bactérias que possam desenvolver-se nessas condições, haverá a formação de colônias típicas que serão visualizadas após determinado período de incubação (15 dias).

Assim, volumes decimais da amostra são inoculados em placas de petri, adicionando-se a seguir, agar citrato férrico amoniacal e após o período estabelecido para incubação, é feita a contagem das colônias típicas com o auxílio de um contador tipo Quebec ou similar (CETESB, 1978).

As análises físico-químicas das amostras de água foram feitas no laboratório da CAGECE, sendo os íons determinados por espectrometria de absorção atômica.

As amostras foram coletadas em poços tubulares operados pela CAGECE, sendo levantadas inicialmente 75 análises físico-químicas e selecionadas 40, pelo balanço iônico, com erro de até 10%.

A caracterização hidrogeoquímica da água dos aquíferos foi realizada através dos seguintes procedimentos: teste do balanço iônico para quantificar o erro relativo ao peso, em meq, dos cátions em relação aos ânions; classificação da água segundo a composição química pelo diagrama de Piper; potabilidade para consumo humano

a partir do diagrama logarítmico de Schoeller- Berkaloff; classificação para irrigação segundo o U.S. Salinity Laboratory Staff - USSLS; determinação do índice de saturação (águas corrosivas e incrustantes); cálculo do índice de troca de base (ITB); cálculo das relações características entre os íons dissolvidos.

4 - PROCESSOS GEOQUÍMICOS E BIOGEOQUÍMICOS DO FERRO NA ÁGUA

O ferro é um dos elementos mais abundantes da crosta terrestre, depois do oxigênio, silício e alumínio, e um dos mais importantes metais. É essencial no metabolismo dos animais e das plantas. As principais fontes de ferro são os minerais das rochas ígneas tais como piroxênios, anfibólios, biotitas, magnetitas e olivinas. A forma mais comum do ferro desses minerais é o ferro ferroso, embora o ferro férrico também possa estar presente, a exemplo da magnetita.

Os óxidos férricos hidratados presentes nas rochas e nos solos são responsáveis pelas colorações marron, vermelha e amarelada. A solução de ferro a partir de minerais silicáticos pode produzir acumulações de óxidos e hidróxidos de ferro que são os principais compostos precipitados (Hem, 1985).

O ferro está presente em quantidades significativas em quase todas as rochas sedimentares. As rochas ricas em ferro apresentam características físico-químicas bastante diversificadas devido a grande habilidade do ferro para formar diferentes minerais em diferentes condições ambientais. O ferro pode precipitar como óxido (hematita, goetita, lepdocrosita); como óxido férrico ferroso (magnetita); como silicato férrico ferroso (glauconita); como carbonato (siderita) ou como sulfeto (pirita, marcassita); (James, 1966).

Elevada concentração de ferro dissolvido na água subterrânea pode estar associada com a oxidação de minerais de ferro redutores (Smith e Tuovinem, 1985). Sob condições altamente redutoras, como no carvão, por exemplo, o ferro ocorre como pirita (FeS_2) que é

insolúvel.

4.1. Ocorrência do Ferro na Água

O ferro ocorre na água em dois estados de oxidação. O divalente ou forma ferrosa e o trivalente ou forma férrica. Em condições de redução, o ferro tende ao estado ferroso e os sais ferrosos formados, instáveis na presença do oxigênio atmosférico, oxidam-se para o estado férrico e saem da solução.

O ferro está presente praticamente em todas as águas, principalmente na água subterrânea. Na água natural, o ferro pode estar presente na forma de compostos como bicarbonato ferroso - $Fe(HCO_3)_2$, fluoreto férrico - FeF_3, hidróxido férrico - $Fe(OH)_3$, cloreto ferroso - $FeCl_2$, carbonato ferroso - $FeCO_3$, sulfato ferroso - $FeSO_4$. A presença do oxigénio dissolvido torna instáveis o carbonato ferroso e o sulfato ferroso que são convertidos em compostos férricos. O hidróxido férrico pode também permanecer na água como colóide (Rankama e Sahama, 1950).

O comportamento químico do ferro na água depende da intensidade da oxidação ou redução do ferro que ocorre no sistema, influenciado por fatores físico-químicos tais como pH, Eh, oxigênio dissolvido, dióxido de carbono, compostos orgânicos e ainda os microorganismos que podem afetar as condições de pH - Eh.

As espécies de minerais de óxidos e sulfetos são as principais fontes que originam o ferro dissolvido na água subterrânea. O íon ferroso Fe^{2+} é a forma mais comum de ferro em solução presente na água subterrânea. Esse íon é instável em presença do oxigênio e o ferro dissolvido passa então para o íon férrico Fe^{3+} quando a água entra em contato com o ar, na forma de óxido ou hidróxido férrico.

O ferro é encontrado na água subterrânea no estado Fe^{2+} em condições favoráveis de Eh400mV e pH 7. Este ferro é a forma utilizada na oxidação bacteriana quimiautotrófica (Smith e Tuovinem, 1985).

Na faixa de pH usual da água natural (5 a 9) e o Eh se mantendo abaixo de 0,20 e acima de 0,10mV, poderá haver uma concentração elevada de Fe^{2+} em equilíbrio (Hem, 1985). Havendo oxidação devido as condições do poço ou da atividade bacteriológica, ocorrerá a precipitação de produtos insolúveis de Fe^{3+}.

Na água natural, em condições favoráveis de Eh e pH, o ferro ferroso é estável enquanto a água permanece em ambiente fora do contato com o oxigênio atmosférico, pois em presença do ar, o ferro oxidará para o estado férrico. esta reação pode ser lenta em meio fortemente ácido, mas poderá ser rápida na faixa de pH normal de água natural (Hem e Cropper, 1959).

O ferro-férrico na água natural é encontrado comumente na forma de hidróxido férrico, $Fe(OH)_3$. Água superficial e subterrânea podem conter ferro férrico em suspensão.

O íon férrico é solúvel sob baixos valores de pH. Na faixa de ph 5 a 8, a quantidade de ferro férrico que pode permanecer na solução é geralmente menor que 0,01 ppm (Hem, 1985). Na forma de íons complexos ou colóides é possível manter o ferro férrico em solução nesta mesma faixa de pH.

O ferro férrico pode formar complexos orgânicos e inorgânicos. Complexos inorgânicos formados por íons de fosfatos, cloreto, carbonato e sulfato são os mais prováveos de serem encontrados em água natural, embora os complexos orgânicos também possam estar presentes (Hem e Cropper, 1959).

4.2. Oxidação e Redução

As reações de oxidação e redução que aparecem na água natural caracterizam-se pela influência de elétrons transferidos de um para outro íon. Uma transferência de elétrons significa uma corrente elétrica e assim uma equação de redox tem um potencial elétrico. Os valores são expressos a 25°C e 1 ATM de pressão e o potencial E° (em volts) é usualmente medido em muitas reações.

Quando a reação é oxidante, o potencial é positivo, se redutora, o potencial é negativo.

O potencial de oxidação de uma solução aquosa é conhecido como Eh e a equação que fundamenta as relações das espécies oxidada e reduzida é conhecida como equação de Nernst (Hem e Cropper, 1959).

$$Eh = E^{o} + \frac{RT}{nF} \ln \frac{A\ ox}{A\ red}$$

Onde:

Eh = Potencial redox

E^{o} = Potencial padrão de oxidação

R = Constante universal de gás

T = Temperatura (graus Kelvin)

n = Número de elétrons envolvidos na reação química.

F = Constante de Faraday (96,484coulomb)

Aox = Atividade de oxidação de íons

Ared = Atividade de redução de íons

O potencial de oxidação (E^{o}) para o ferro é 0,771V, definido pela seguinte equação:

$$Fe^{2+} \longrightarrow Fe^{3+} + e = + 0{,}771V$$

Nas reações de oxidação de ferro ferroso Fe^{2+} para ferro

férrico Fe^{3+}, a 25°C, a reação é a seguinte (Hem e Cropper, 1959):

$$Eh = 0,771 + 0,0592 \log \frac{Fe^{3+}}{Fe^{2+}}$$

Outros potenciais de oxidação para as reações em que o ferro participa são, de acordo com Krauskopf (1972):

$$Fe \rightleftharpoons Fe^{2+} + 2e^{-} \quad E^{o} = -0,44V$$

$$Fe^{2+} + 3H_2O \rightleftharpoons Fe(OH)_3 + 3H^{+} + e- \quad E^{o} = 0,77V$$

A atividade do elétron e o equilíbrio do potencial redox permitem fazer uma analogia entre as reações ácido-base e oxidação-redução.

Ácidos e bases são considerados como prótons doadores e elétrons receptores, da mesma forma que oxidantes e redutores são definidos como elétrons doadores e elétrons receptores. Não há elétrons livres, cada reação de oxidação é acompanhada por uma de redução e vice-versa (Stumm e Morgan, 1981).

$$O^{2} + 4H^{+} + 4e = 2H_2O \quad \text{(redução)}$$

$$4Fe^{2+} = 4Fe^{3+} + 4e \quad \text{(oxidação)}$$

$$O^{2} + 4Fe^{2+} + 4H = 4Fe^{3+} + 2H_2O \quad \text{(reação redox)}$$

Em água natural, as reações de oxidação-redução tendem a ser muito mais lentas que as reações ácido-base, especialmente na ausência de catalizadores bioquímicos.

Nos processos de redox na água, alguns elementos químicos têm participação predominante, como o carbono, nitrogênio, oxigênio, enxôfre, ferro e manganês.

A intensidade das condições oxidantes ou redutoras em uma solução é representada pelo seu potencial redox ou Eh, cujo valor é expresso em volts. As condições oxidantes aumentam a proporção que aumentam os valores positivos de Eh.

O potencial redox ou Eh, sob condições de equilíbrio químico, de uma solução contendo ferro ferroso e ferro férrico é função das atividades das formas de ferro oxidadas e reduzidas que estão presentes e o grau de dissociação do hidróxido férrico ou ferroso é função da concentração do íon hidrogênio ou pH da solução (Hem e Cropper, 1959).

4.3. Diagrama pH - Eh

O comportamento químico do ferro pode ser considerado, do ponto de vista teórico, como uma função do pH, Eh e da atividade de outros íons na solução (Hem, 1985). Essas relações de estabilidade podem ser representadas através do diagrama pH-Eh (Figura 07), onde os campos da estabilidade para o ferro, em forma sólida e dissolvida, são uma função de pH-Eh a 25° e 1 atmosfera de pressão, desenvolvido a partir da utilização da equação de Nernst e de equações pertinentes a ação da lei das massas.

O diagrama representa duas áreas distintas: o topo e a base onde, teoricamente, a água se oxidará ou se reduzirá respectivamente. Espécies de minerais estáveis em solução aquosa com ferro, enxôfre e carbonato podem ser visualizados, incluindo- se aí Fe^{3+},

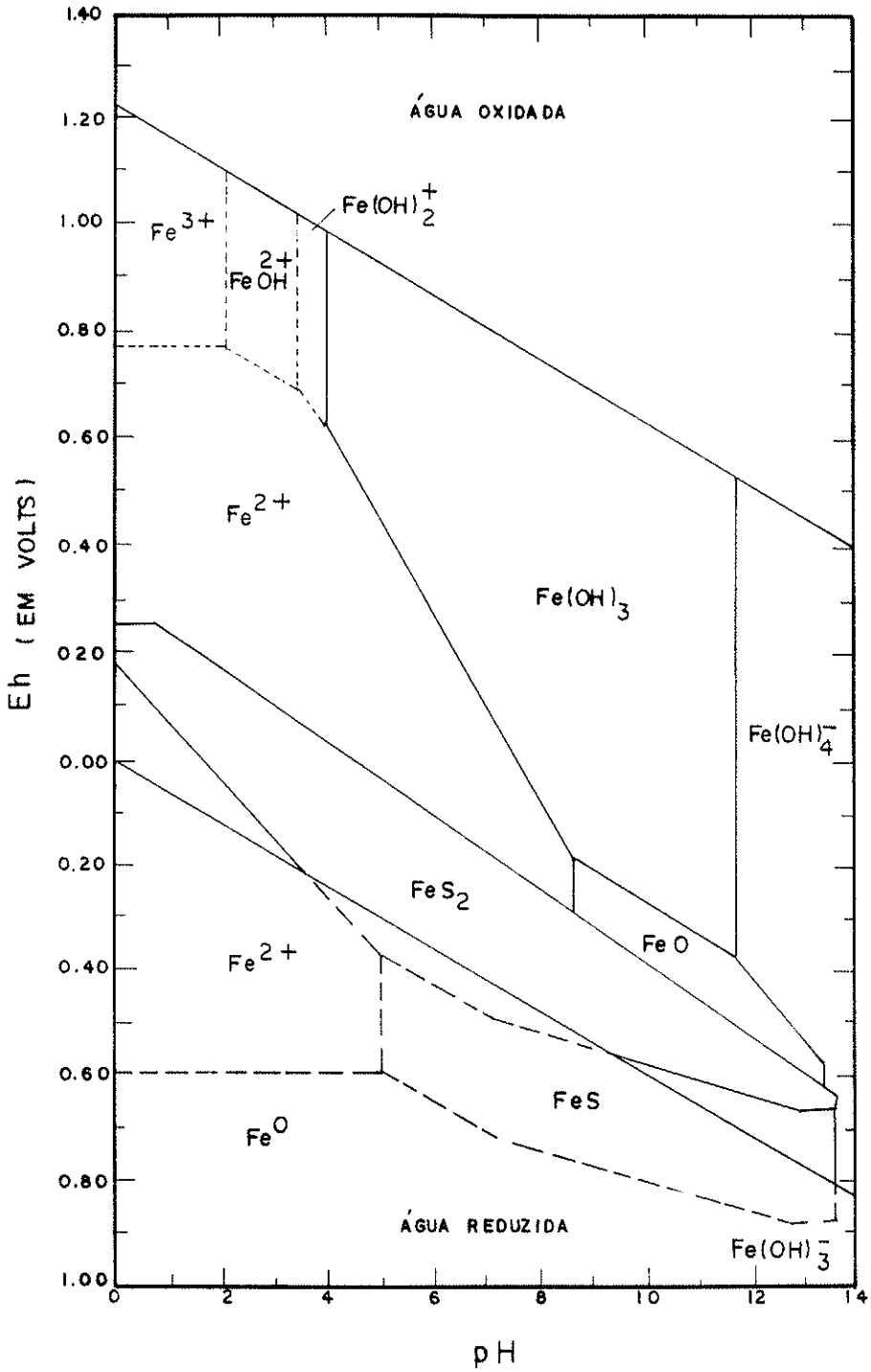


FIGURA 07 – DIAGRAMA pH – Eh PARA ESPÉCIES DE FERRO E DE OUTROS ÍONS ESTÁVEIS EM SOLUÇÃO AQUOSA COM FERRO, ENXOFRE, CARBONO E FERRO DISSOLVIDO.

(HEM, 1985)

Fe_2O_3, Fe_3O_4, $FeCO_3$, FeS_2.

A pirita, siderita ou magnetita são estáveis em ambientes redutores, enquanto a hematita é estável em ambiente oxidante. A posição da linha que separa as espécies férricas e ferrosas no diagrama foi definida a partir do cálculo de Eh para cada valor de pH de 0 a 14, utilizando-se a equação de Nernst.

A quantidade de ferro dissolvido na água é função das condições de Eh e pH. O íon Fe^{3+} só é solúvel em ambientes onde o pH é menor que 2,5. Se as concentrações de Fe^{3+} e Fe^{2+} forem iguais o Eh é de 0,77 volts. Com pH entre 2,5 e 4,8, o Fe^{3+} permanece em solução.

Em pH maior que 4,8 o Fe^{3+} precipita como $Fe(OH)_3$ e acima de 6,5, com Eh igual a 0,80 volts, o ferro atinge o oxigênio formando o composto solúvel FeO_4^{2-}. Quando o pH é neutro o Fe^{3+} precipita e sai da solução, permitindo uma maior concentração de Fe^{2+} e um Eh inferior a 0,77 volts.

Em pH menor que 8,5, o Fe^{2+} é solúvel em água natural. À medida que o pH diminui, a solubilidade do Fe^{2+} aumenta. O Fe^{2+} precipita na presença do enxôfre em qualquer valor de pH e Eh menor que 0,20 volts formando o FeS (sulfeto de ferro). Precipita também como $FeCO_3$ (carbonato ferroso) com pH alcalino entre 8,3 e 11,2 e Eh menor que zero. O Fe^{2+} é solúvel na forma de $HFeO^{2-}$ em pH maior que 11,2 e Eh variando entre 0,40 e -0,6 volts (Piuci, 1978).

Em pH abaixo de 3, a conversão de Fe^{2+} para Fe^{3+} é muito lenta, inclusive para formar complexos de Fe^{2+} (Hem, 1985).

Em água subterrânea, o Eh é normalmente baixo devido a diminuição do oxigênio que é quimicamente reduzido pelo contato com espécies redutoras.

4.4. A Ação dos Microorganismos

A atividade dos microorganismos começou a ser estudada no

final do século XIX com a colaboração de alguns microbiologistas como Wilnogradsky, Nadson, Beijerinck, dentre outros.

O papel dos microorganismos na circulação de materiais no interior da crosta terrestre, bem como na formação e desintegração de minerais e rochas tem sido objeto de investigações pela microbiologia, geoquímica e hidrogeologia (Back, 1989).

Os microorganismos são responsáveis pelos processos de decomposição de matéria orgânica, oxidação de hidrogênio e formas reduzidas de nitrogênio, formação de sulfetos de hidrogênio, etc., processos esses que só acontecem na presença de microorganismos.

Outros processos, como a oxidação e redução de compostos de enxôfre e de ferro, por exemplo, podem ocorrer tanto quimicamente quanto com a participação de microorganismos (Yakhontova & Karavaiko, 1977).

Nas últimas décadas, a evolução do conhecimento de microbiologia, hidrogeologia e geoquímica tem contribuído para o esclarecimento de aspectos fundamentais que envolvem os processos geoquímicos na água subterrânea, a exemplo da interação água/rocha; mecanismos de geração de gases, de reações do tipo redução de sulfeto e de ferro, e precipitação de ferro e de manganês; controle das características químicas da água.

Historicamente, de acordo com Back (1989), as primeiras observações sobre a existência de bactérias em água subterrânea datam de 1677, quando Antony Van Leeunwenhoek, cientista holandês, desenvolveu o microscópio e em seus estudos verificou a presença de bactérias em água subterrânea, água de chuva e água do mar.

Em 1777, o cientista Volta, reconhece a importância do metano no processo de fermentação. Em 1838, Ehrenberg reconheceu que algumas bactérias eram capazes de precipitar ferro na água e que esses organismos poderiam interferir nas reações químicas.

A partir de 1860, inúmeras contribuições científicas foram dadas por grandes cientistas como Pasteur, Koch, Lister, dentre outros. Destaque de 1889 para o trabalho desenvolvido por um grupo

de cientistas alemães sobre as bactérias redutoras de sulfato. Em 1889, é criada a Sociedade Americana de Bacteriologistas. Por essa época, foram desenvolvidas técnicas de análises de água e alguns princípios de bacteriologia foram incorporados aos estudos de geoquímica e de hidrogeologia.

Em 1917, Rogers constata a presença de bactérias em análise química de água de um poço petrolífero na Califórnia.

Harder, 1919 demonstrou a importância dos depósitos de ferro e estudou a precipitação do ferro em amostras de água obtidas de minas de carvão.

A existência de bactéria em água subterrânea foi comprovada através dos estudos de Bastin em 1926, em poços de petróleo de Illinois e Califórnia. Outros estudos realizados pelo American Petroleum Institute, divulgados em 1952, por Zobell, comprovaram a existência de bactéria em amostras de água do mar a uma profundidade de mais de 10 mil metros, demonstrando assim que bactéria pode existir em muitos ambientes, sob condições variáveis de pH e Eh.

Entre 1957 e 1960, alguns eventos foram importantes, tais como o uso de isótopos para o estudo de bactéria em domos salinos na costa do Golfo; as relações entre bactéria e processos geológicos e o estudo das condições ambientais que favorecem o desenvolvimento de bactérias, com ênfase para potencial redox e pH.

O trabalho de Gurevich publicado em 1962, trata dos processos biogênicos na água subterrânea mostrando, dentre outros aspectos, a questão da composição química da água subterrânea que pode ser alterada não somente pelos processos inorgânicos mas também através da atividade dos microorganismos.

McNabb & Dunlap, em 1975, avaliaram a subsuperfície como um habitat para microorganismos e suas relações com a poluição da água subterrânea.

4.5. Processos Bioquímicos

Os principais processos bioquímicos que interferem na química da água foram definidos por Hem (1985), com base nas suas relações de energia:

- processos que usam a energia solar ou outra fonte de energia para promover reações químicas (a fotossíntese, por exemplo, produz matéria orgânica utilizando a energia solar);

- processos que redistribuem energia quimicamente armazenada (reações de metabolismo);

- processos que transformam energia quimicamente armazenada em outras formas energéticas (reações de oxidação ou redução);

- processos sem transferência de energia significante (fixação de colóides inorgânicos na água por substâncias orgânicas solúveis).

Há ainda os processos bioquímicos que modificam os minerais, descritos por Silverman e Ehrlich (in Maciel Filho, 1982) como enzímicos e não enzímicos, representados pelas reações redox e digestão de complexos metálicos (processos enzímicos) e produtos metabólicos e adsorção na superfície das células (processos não enzímicos).

Os microorganismos podem ser classificados, segundo o modo de assimilação de nutrientes, em 3 grupos principais (Fenzil, 1989):

- autótrofos, que não dependem de compostos orgânicos para viver, assimilando o carbono de compostos inorgânicos (O_2, $CaCO_3$);

- mixtótrofos, usam compostos orgânicos ou CO_2 mineral como fonte de carbono para seu crescimento;

- heterótrofos, que só podem viver na presença de compostos orgânicos.

As bactérias, consideradas como principal grupo dos microor-

ganismos, são classificadas em 3 tipos, segundo suas relações com o oxigênio (Fenzil, 1988):

- anaeróbicas, que podem viver somente em ambiente sem oxigênio;

- anaeróbicas facultativas, vivem na presença ou ausência de oxigênio;

- aeróbicas, que só sobrevivem com oxigênio.

As reações de oxidação influenciadas por microorganismos processam-se rapidamente. Os organismos autotróficos fotossintéticos usam CO_2 como fonte de carbono para o metabolismo e obtêm energia da luz solar ou da oxidação de substâncias inorgânicas, provavelmente ferro ferroso e manganês (Matthess, 1982).

A fotossíntese é considerada como um processo localizado em que há produção de Eh negativo e reserva de oxigênio. Os organismos não fotossintéticos tendem a restituir o equilíbrio pela decomposição catalítica dos produtos instáveis da fotossíntese através das reações redox (Stumm e Morgan, 1981).

A qualidade química da água subterrânea pode ser modificada pela atividade microbiológica. Há organismos que vivem na água subterrânea e utilizam os materiais em suspensão e sólidos dissolvidos em seu metabolismo e, ao mesmo tempo, devolvem à água os produtos desse mesmo metabolismo. Outros, promovem a troca de sais solúveis do solo, removem temporariamente nutrientes das plantas com aumento de CO_2 na zona de aeração das raízes e também utilizam resíduos produzidos pela atividade humana e animal que podem chegar à água subterrânea na forma de poluentes (Matthess, 1982).

Bactérias redutoras de sulfato foram encontradas em uma sequência de rochas compostas de calcário, anidrita e enxôfre a aproximadamente 400m de profundidade e em poços petrolíferos a 1000m de profundidade (Vorob'eva, 1957, in Matthess, 1982).

A presença de bactérias encontradas a grande profundidade

indica que as condições favoráveis à vida orgânica podem ser mantidas. É provável que esses organismos tenham sido depositados há milhões de anos, ou seja, tenham a mesma idade das rochas.

As bactérias redutoras de sulfato desenvolvem-se em , ambiente anaeróbico, na presença de hidrogênio e matéria orgânica, suportam altos níveis de acidez e alcalinidade, e potencial redox de 600 a 400mV (Bass-Becking et all, 1960).

Na água subterrânea, o enxôfre e seus compostos podem ser oxidados pelas bactérias dos gêneros *Thiobacillus*, *Beggiatoa*, *Crenothrix*, *Thiotrix* e *Thioploca*, as quais, como organismos autotróficos, obtém a energia da assimilação do carbono por quimiossíntese.

Thiobacillus denitrificans vivem em águas alcalinas e obtêm o oxigênio necessário para oxidação do enxôfre a partir da redução do nitrato (Matthess, 1982).

4.6. A Influência dos Microorganismos nas Transformações do Ferro

A importância dos processos biológicos na formação geoquímica de depósitos sedimentares é reconhecida desde o século passado, através de pesquisas iniciadas por Ehrenberg (1836), reiterada por outros pesquisadores que estudaram a influência da bactéria na deposição e precipitação do ferro e manganês. Esse tipo de bactéria foi denominado "ferro bactéria".

As bactérias vivem na natureza em condições extremamente variadas, pois conseguem desenvolver-se tanto em água superficial, quanto em água subterrânea, em água estagnada e ainda em água corrente.

A quantidade de ferro e de matéria orgânica requerida na solução para que a bactéria deposite o ferro, também é variável, dependendo do tipo da bactéria.

Espécies de ferro-bactérias quimiautotróficas, a exemplo de

Gallionella, Crenothrix, Ferrobacillus provocam oxidação do ferro ferroso para férrico produzindo a energia requerida pela síntese da matéria orgânica (Matthess, 1982).

As atividades dos microorganismos, principalmente das bactérias que tomam parte nos processos de deposição, oxidação e redução do ferro, têm relação com o contexto geológico já que se constituem em fatores importantes na formação de muitos depósitos de minerais e rochas, tais como, hidróxido férrico, sulfeto de ferro, carbonato de cálcio, etc. (Harder, 1919).

Dos processos de sedimentação que acumulam compostos de ferro na natureza, os microorganismos influenciam diretamente a deposição de hidróxidos férricos e sulfetos ferrosos e, indiretamente, podem interferir na deposição de carbonato ferroso e silicato ferroso.

A água subterrânea que contém minerais de ferro oxidados e compostos orgânicos pode propiciar um ambiente favorável a redução do ferro. Concentrações elevadas de ferro dissolvido na água podem estar associadas com a oxidação de minerais de ferro redutores.

Segundo Hem (1985), a forma como a bactéria pode influenciar o comportamento do ferro na água, está relacionada aos seguintes processos:

- aqueles em que a bactéria exerce um efeito catalítico para acelerar as reações que são termodinamicamente favoráveis, mas que ocorrem lentamente na ausência de bactéria. Nesses processos, estão envolvidos gêneros de ferro-bactérias como *Gallionella, Crenothrix* e *Leptothrix* que requerem oxigênio e tomam parte na oxidação de ferro ferroso dissolvido. As bactérias redutoras de sulfato podem exercer um efeito indireto no comportamento do ferro pelas reações catalizadoras que trazem ferro na solução, a exemplo da oxidação da pirita;

- os que requerem uma contribuição de uma outra fonte para alterar o estado do ferro e estimular a bactéria que consome uma substância como fonte de energia. Esses processos envolvem espécies de ferro e de enxôfre que requerem uma substância oxidável, usualmente orgânica, como fonte de alimento e de energia. Redução

ou oxidação do ferro pode ocorrer, mas o ferro pode não ter papel essencial nos processos de vida da bactéria. A precipitação do ferro no estado oxidado, causado pela bactéria, ocorre devido às modificações nas condições de redox, tanto direta como indiretamente. Em sistemas onde o pH eo Eh são baixos, o ferro permanecerá em solução. Entretanto, se o Eh tornar-se muito baixo e estiverem presentes bactérias redutoras de sulfato, o ferro pode ser precipitado como sulfeto (Hem, 1960a).

A atividade metabólica das bactérias presentes na água influencia a solubilidade do ferro, particularmente ferro complexado por matéria orgânica usado por algumas bactérias.

Nos processos chamados enzimáticos ou de ação direta, os microorganismos podem interagir com compostos de ferro e de manganês de várias formas. *Thiobacillus ferrooxidans*, por exemplo, oxida o ferro ferroso para ferro férrico sob pH neutro, onde as reações são extremamente lentas, enquanto a *Gallionella* pode oxidar o ferro em pH neutro, onde a autooxidação é bastante rápida.

Já nos processos não enzimáticos, os microorganismos podem oxidar compostos de ferro e de manganês causando a precipitação de óxidos de ferro e de manganês pela formação de um ambiente redutor, ou acumular ferro e manganês já oxidados (Maciel Filho, 1982).

Os microorganismos podem catalizar inúmeros processos bioquímicos que ocorrem na água subterrânea e no solo, incluindo- se aí as reações de oxidação e redução do ferro, através dos principais estados de valência do ferro. Sob determinadas circunstâncias, o ferro em contato com o solo e a matéria orgânica, carreado pela água pode estar na forma coloidal.

5 - FERRO-BACTÉRIAS EM ÁGUA SUBTERRÂNEA

5.1. Características das Ferro-Bactérias

As ferro-bactérias fazem parte do grupo de microorganismos com características morfológicas, genéticas, químicas, culturais, metabólicas que possibilitam identificar e classificar um microorganismo (bactéria, alga, fungo, protozoário).

Ferro-bactérias, portanto, são microorganismos. São aeróbicas, estão amplamente distribuídas na natureza e são encontradas comumente em água subterrânea, solos, açude, pântanos, lagoas, águas de drenagem de minas.

Ocorrem também em poços e sistemas de distribuição de água, causando graves problemas de obstrução de sistemas hidráulicos e corrosão de tubulações.

As ferro-bactérias caracterizam-se por depositar grandes quantidades de hidróxido de ferro extra celular, produzindo massas flocosas que são depositadas nas bainhas e/ou filamentos das diversas espécies. O termo "ferro-bactéria" refere-se a espécies completamente diferentes em morfologia, metabolismo celular, na forma de ocorrência no meio ambiente e na forma de precipitação do ferro (Smith, 1982).

Desde o século XIX que se discute a influência da bactéria na deposição do ferro e sua importância na formação de depósitos de minerais de ferro e nos corpos de água.

Ehrenberg (1836) descreveu a *Gallionella ferruginea*. Àquela época foram reconhecidas em ambiente natural algumas bactérias como *Gallionella* e *Leptothrix*.

Trabalho subsequentes foram sendo realizados tanto em laboratórios quanto no campo. Entretanto, muitas bactérias foram isoladas mas bem poucas foram estudadas efetivamente em culturas axênicas. Essa falta de estudos específicos caracteriza o limitado

conhecimento acerca da deposição do ferro por essas bactérias, principalmente nos seus aspectos genéticos e morfológicos.

Microbiologistas e geoquímicos têm discutido a deposição de grandes quantidades de ferro e manganês por microorganismos admitindo que os mesmos podem exercer um importante papel na formação de acumulações de óxido de ferro e manganês ocorrendo normalmente na forma de concreções.

No início deste século, Harder e Chamberlin (1915) sugeriram que a bactéria poderia ter sido responsável pela precipitação do óxido de ferro no itabirito de Minas Gerais.

O fato de as ferro-bactérias não se constituirem em risco à saúde pública, talvez justifique a carência de estudos experimentais com culturas das diversas espécies.

Os conhecimentos sobre os diversos aspectos de ocorrência das ferro-bactérias na água natural fazem supor que não houve evolução significativa nas pesquisas iniciadas no século XIX. Por isso, o desenvolvimento de técnicas e métodos de tratamento adequados ao controle e a destruição desses microorganismos em água subterrânea, poços e sistemas de distribuição de água é extremamente prejudicada pela carência de dados científicos.

Há atualmente, um novo incentivo para a pesquisa biológica sobre a deposição do ferro e manganês. Citam-se os impactos de ordem econômica que estão preocupando pesquisadores, empresários e técnicos envolvidos na construção e recuperação de poços e sistemas de distribuição de água; as transformações de metais por microorganismos que a geoquímica vem discutindo; a questão do meio ambiente relacionado à deterioração da água para consumo e à degradação do aquífero; e, fortes indicadores de que as ferro-bactérias podem ser úteis na recuperação de metais tóxicos diluídos em sistemas aquosos (Ghiorse, 1984).

5.1.1 - Ocorrência

As condições ambientais mais propícias ao desenvolvimento de ferro-bactérias em água subterrânea e em poços ainda carece de fundamentos científicos. Sabe-se entretanto, que a água favorece o seu crescimento seja pela concentração de ferro ferroso, de oxigênio dissolvido, dióxido de carbono, conteúdo de matéria orgânica, condições de oxidação e redução da solução, influência de pH e Eh, temperatura da água, dentre outros. O diagrama da Figura 08 mostra as espécies de ferro em relação a ocorrência de ferro-bactéria no meio ambiente.

O desenvolvimento de ferro-bacteria é resultado da combinação de muitos fatores (físicos, químicos, físico-químicos, biológicos) que influenciam as condições naturais do meio ambiente nas quais as ferro-bactérias podem ser encontradas.

Experiências realizadas por Hasselbarth e Ludemann (1972) revelam que o crescimento de ferro-bactérias em poços pode estar associado com alguns fatores químicos, aí incluindo-se pH, Eh, ferro ferroso dissolvido, dióxido de carbono.

Valkenburg et all. (1975) compararam a ocorrência de ferro-bactérias com condutividade, pH, oxigênio dissolvido, temperatura e profundidade, encontrando resultados idênticos em outras áreas de estudo.

A característica básica da ferro-bactéria é a sua habilidade de precipitar grandes quantidades de ferro. Segundo Harder (1919), três grupos distintos de ferro-bactérias podem ser considerados: aqueles que requerem bicarbonato ferroso para seus processos de vida, precipitando o hidróxido férrico; os que não requerem bicarbonato ferroso mas podem causar a deposição de hidróxido férrico proveniente de sais de ferro orgânico ou inorgânico; e aqueles que agem sobre os sais orgânicos de ferro, usando radical orgânico como alimento e precipitam hidróxido férrico.

As concentrações de ferro dissolvidas na água podem ser bastante variáveis. As ferro-bactérias podem ocorrer tanto em águas

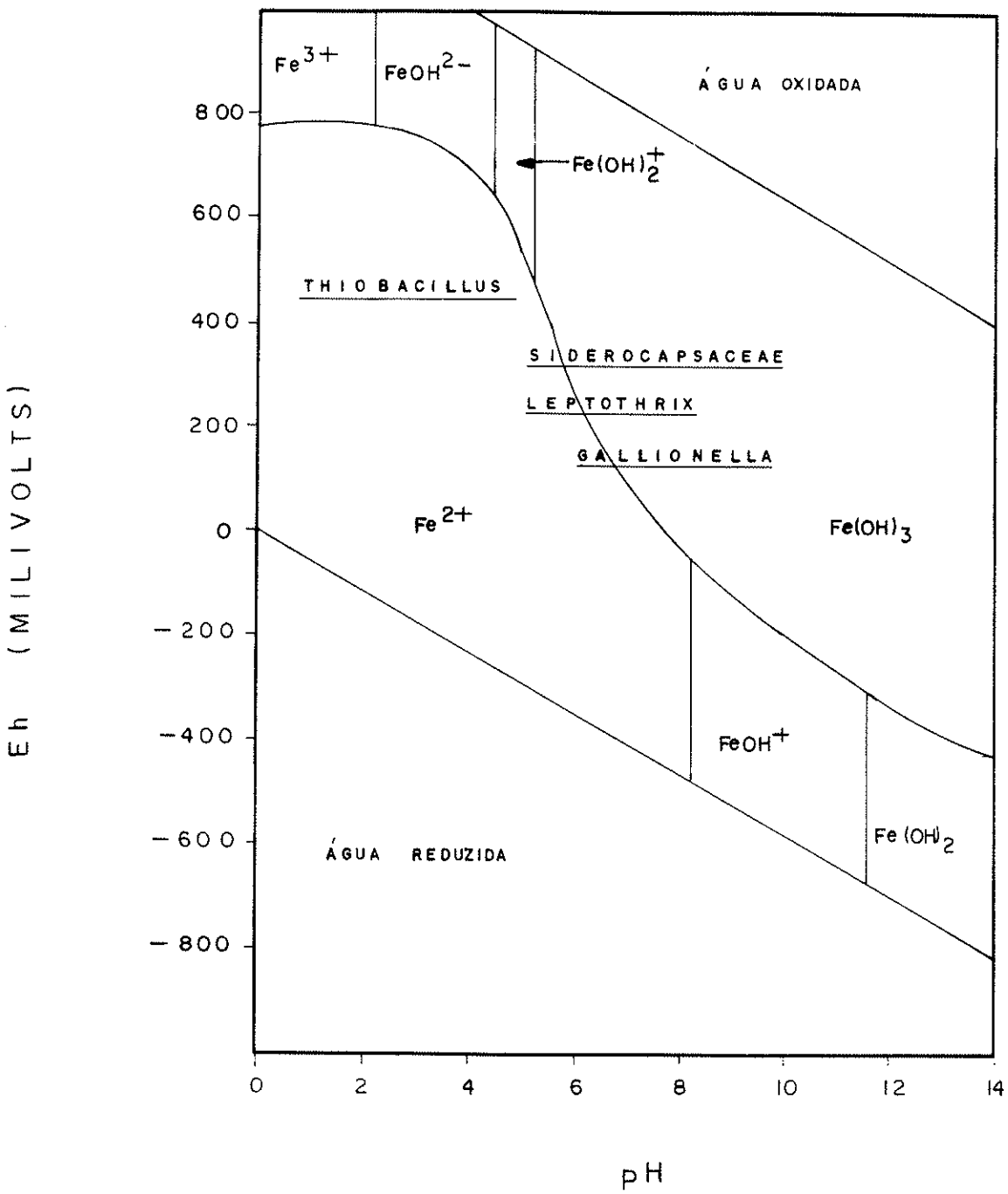


FIGURA 08 – DIAGRAMA pH-Eh PARA ESPÉCIES DE FERRO EM RELAÇÃO A OCORRÊNCIA DE FERRO-BACTÉRIA NO MEIO AMBIENTE
(SMITH E TUOVINEN, 1985)

contendo elevada concentração de ferro (1-10 e 10-30ppm) quanto em água com pequeno teor (0,2 - 0,5ppm).

A *Gallionella* é um exemplo de ferro-bactéria que ocorre nas duas situações referidas.

A Tabela 01, a seguir mostra as condições ambientais que caracterizam o crescimento de ferro-bactérias, do ponto de vista de vários pesquisadores.

5.1.2 - Aspectos fisiológicos

Inúmeros trabalhos sobre ferro-bactérias têm sido desenvolvidos ao longo dos últimos 100 anos, objetivando elucidar questões fundamentais relativas aos aspectos biológicos de deposição do ferro e manganês pela ferro-bactéria.

Historicamente, a evolução do conhecimento desses microorganismos inicia com Ehrenberg (1836), seguido de Winognadsky (1888) que investigou os aspectos fisiológicos de ferro-bactérias, observando que os filamentos de *Leptothrix ochracea* prosperavam em culturas ricas em ferro sem adição de nutrientes e que, a energia produzida pela oxidação do ferro era utilizada para fixar o dióxido de carbono e crescer autotroficamente (Ghiorse, 1984).

Harder (1919) observou a diferenciação das espécies de ferro-bactérias pela morfologia influenciada por certas condições naturais da água subterrânea, como a presença de carbono orgânico dissolvido, substâncias viscosas de ferro hidratado, tipos de poços, fontes e minas.

Starkey (1945), estabeleceu a relação entre ferro- bactérias filamentosas e seus ambientes bióticos e abióticos. Observou também que diferentes gêneros de ferro-bactérias poderiam crescer por processos quimioautotróficos, dependendo de algumas condições do meio, tais como a necessidade de carbono orgânico, níveis de pH e presença de carbono.

TABELA 01 - PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS FAVORÁVEIS AO CRESCIMENTO DE FERRO-BACTÉRIAS

PARÂMETRO	VARIAÇÃO	ORGANISMO	REFERÊNCIA
Eh	+200 a 320 mV	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	≥10mV ± 20 mV	*Gallionella e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
pH	6,5 a 7,6	*Gallionella e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
	6,0 a 8,0	*Gallionella e Sphaerotilus*	Valkenburg et al (1975)
	6,0 a 7,6	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	6,0 a 8,7	*Siderocapsaceae*	Hanert (1981b)
	6,7 a 7,7	*Clonothrix, Crenothrix, Leptothrix e Siderocapsa*	Rao (1970)
rH	>14,5 ± 1	*Gallionella e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
	19 a 21	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	< 19	*Siderocapsaceae*	Hanert (1981b)
Ferro ferroso dissolvido	5 a 25mg/l	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	>0,2 a 0,5mg/l	*Gallionela e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
	>0,25 mg/l	*Gallionella Sphaerotilus*	Valkenburg et all. (1975)
	1,0 a 2,0mg/l	*Siderocapsaceae*	Hanert (1981b)
	0,2 a 5,0mg/l	*Clonothrix, Crenothrix, Leptothrix e Siderocapsa*	Rao (1970)
Oxigênio dissolvido	0,1 a 1,0mg/l	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	<5mg/l	*Gallionella e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
	1,0 a 3,0mg/l	*Gallionella e Sphaerotilus*	Valkenburg et all. (1975)
	<1,0mg/l	*Siderocapsaceae*	Hanert (1981b)
Demanda química de oxigênio	<12mg/l	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	>5 a 25mg/l	*Gallionella e Siderococcus*	Hasselbarth & Ludemann (1972)
Temperatura	8 a 16°C	*Gallionella*	Hanert (1981a)
	10°C	*Gallionella e Sphaerotilus*	Valkenburg et all. (1981a)
Dióxido de Carbono	>20mg/l	*Gallionella*	Hanert (1981a)

FONTE: HACKETT & LEHR (1985)

Na década de 40, novos estudos foram realizados. Pringsheim (1949) fez uma avaliação da bibliografia disponível até então, constatando que havia certas discordâncias entre pesquisadores sobre as teorias que explicavam os aspectos fisiológicos de deposição do ferro pela bactéria.

A *Gallionella*, por exemplo, é considerada estritamente autotrófica, embora nunca tenha sido comprovado, por falta de cultura pura desses organismos (Ghiorse, 1984).

Gallionella pode-se desenvolver em meio orgânico contendo sais minerais, dióxido de carbono e sulfato ferroso, usado como fonte de energia pela ferro-bactéria (Kucera and Wolf, 1957).

Sphaerotilus e Siderocapsa são ferro-bactérias heterotróficas. Segundo Hanert (1981), a *Siderocapsa* depende de matéria orgânica para seu crescimento. *Crenothrix e Leptothrix* são classificadas como bactérias autotróficas facultativas.

O processo quimioautotrófico entre membros do grupo de ferro-bactérias *Sphaerotilus - Leptothrix* é questionado por Van Veen et all. (1978), mas eles mesmos consideram difícil essa determinação pela falta de estudos de culturas dessas bactérias. Concluem apenas que alguns desses microorganisnmos podem crescer na presença de compostos orgânicos, requerendo matéria orgânica para seu crescimento.

5.1.3 - Classificação e morfologia

A taxonomia das ferro-bactérias é bastante complexa. Não tem base científica, haja vista serem as descrições feitas tão somente pelos caracteres morfológicos, obtidos de espécies isoladas de diversos ambientes.

Bergey's Manual of Determinativa Bacteriology (1964), idenfica 18 gêneros de bactérias que têm a habilidade de depositar hidróxido de ferro ou óxido de manganês em estruturas fora de suas células. A

Tabela 02 mostra a descrição dessas espécies, bem como o modo de nutrição e o ambiente favorável ao seu desenvolvimento.

As ferro-bactérias estão incluídas nos seguintes grupos morfológicos:

- grupo das filamentosas, caracterizado pelo arranjo filamentoso de suas células que são envolvidas por uma bainha. As bainhas da maioria das espécies são incrustadas com hidróxido de ferro ou óxido de manganês. Essas bainhas podem ramificar-se dando a impressão de que as células é que são ramificadas. Alguns exemplos do grupo são as ferro-bactérias *Crenothrix, Leptothrix, Sphaerotilus, Clonothrix.*

Em espécies como a *Crenothrix,* os filamentos apresentam células envolvidas por uma bainha e falsas ramificações (Figura 09). As bainhas são impregnadas de hidróxido de ferro.

Esses organismos caracterizam-se por ter, inicialmente, um formato tipo bastonete curto, mas, à medida que vão crescendo, as células se dividem transversal e longitudinalmente formando uma grande quantidade de células esféricas na extremidade do filamento. Essas células chamadas conídia, são liberadas do filamento por ruptura da bainha e cada uma começa a desenvolver um novo filamento (Pelczar et all, 1980).

A *Crenothrix* é encontrada comumente em poços e tubulações de água, ocorrendo frequentemente junto com *Gallionella.* Crescem em água contendo matéria orgânica e compostos de ferro, produzindo espessas massas de coloração marron.

O gênero *Leptothrix* tem a forma de um simples filamento, envolvido por uma bainha incrustada com hidróxido férrico. A coloração das bainhas é amareio castanho proveniente do hidróxido férrico. A *Leptothrix* ocorre normalmente em águas de poços e fontes, pobres em matéria orgânica, contendo somente uma pequena quantidade de ferro em sua bainha e, provavelmente, não produz energia para oxidação do ferro (Driscoll, 1987).

Ferro-bactérias do gênero *Sphaerotilus* exibem filamentos incolores e falsas ramificações. É geralmente encontrada em água

TABELA 02 - GÊNEROS DE BACTÉRIAS QUE PRECIPITAM O FERRO

CLASSIFICAÇÃO	GÊNERO	MODO DE NUTRIÇÃO	AMBIENTE FAVORÁVEL
BACTÉRIAS DESLIZANTES	*Toxothrix*	Heterotrófico	Nascentes frias, lagos e pântanos contendo ferro ferroso. Culturas impuras.
BACTÉRIAS COM BAINHAS	*Sphaerotilus*	Heterotrófico	Água corrente, plantas submersas e rochas. Seu crescimento causa problemas em poços. Culturas puras para algumas espécies.
	Leptothrix	Heterotrófico/ Autrotófico	Água corrente e rochas. Causa problemas em poços. Culturas puras para algumas espécies.
	Lieskella	Heterotrófico	Lamas das camadas superiores dos corpos de água. Culturas impuras.
	Crenothrix	Heterotrófico	Água corrente e estagnada contendo matéria orgânica e sais de ferro. Culturas impuras.
	Clonothrix	Heterotrófico	Águas de poços. Culturas impuras.
BACTÉRIAS GEMULADAS E/OU APENDICULADAS	*Gallionella*	Autotrófico	Água com ferro coloidal e em solos. Causa problemas poços. Culturas puras.
	Pedomicrobium	Heterotrófico	Solos e águas. Culturas puras.
	Seliberia	Heterotrófico	Solos. Culturas puras.
	Planctomyces	Heterotrófico	Superfícies de lagoas. Culturas puras.
	Metallogenium	Heterotrófico	Solos e água. Culturas puras.
	Caulococcus	Heterotrófico	Lamas do fundo dos lagos. Culturas impuras.
	Kusnezovia	Heterotrófico	Amostras de lamas e lagos. Culturas impuras.
BACTÉRIAS NEGATIVAS QUIMIO-LITOTRÓFICAS	*Thiobacillus*	Autotrófico	Águas ácidas com alto teor de ferro e em solos com pirita e marcassita. Culturas puras.
	Siderocapsa	Heterotrófico	Água natural. Culturas impuras.
	Naumanniella	Heterotrófico	Água com ferro coloidal. Culturas puras.
	Ochrobium	Heterotrófico	Água com ferro coloidal. Culturas impuras.
	Siderococcus	Heterotrófico	Água natural. Culturas impuras.

FONTE: BERGEY(1974); SILVERMAN & EHRLICH(1964)

Instituto de Geociencias - Biblioteca
TOMBO T 537-E/2

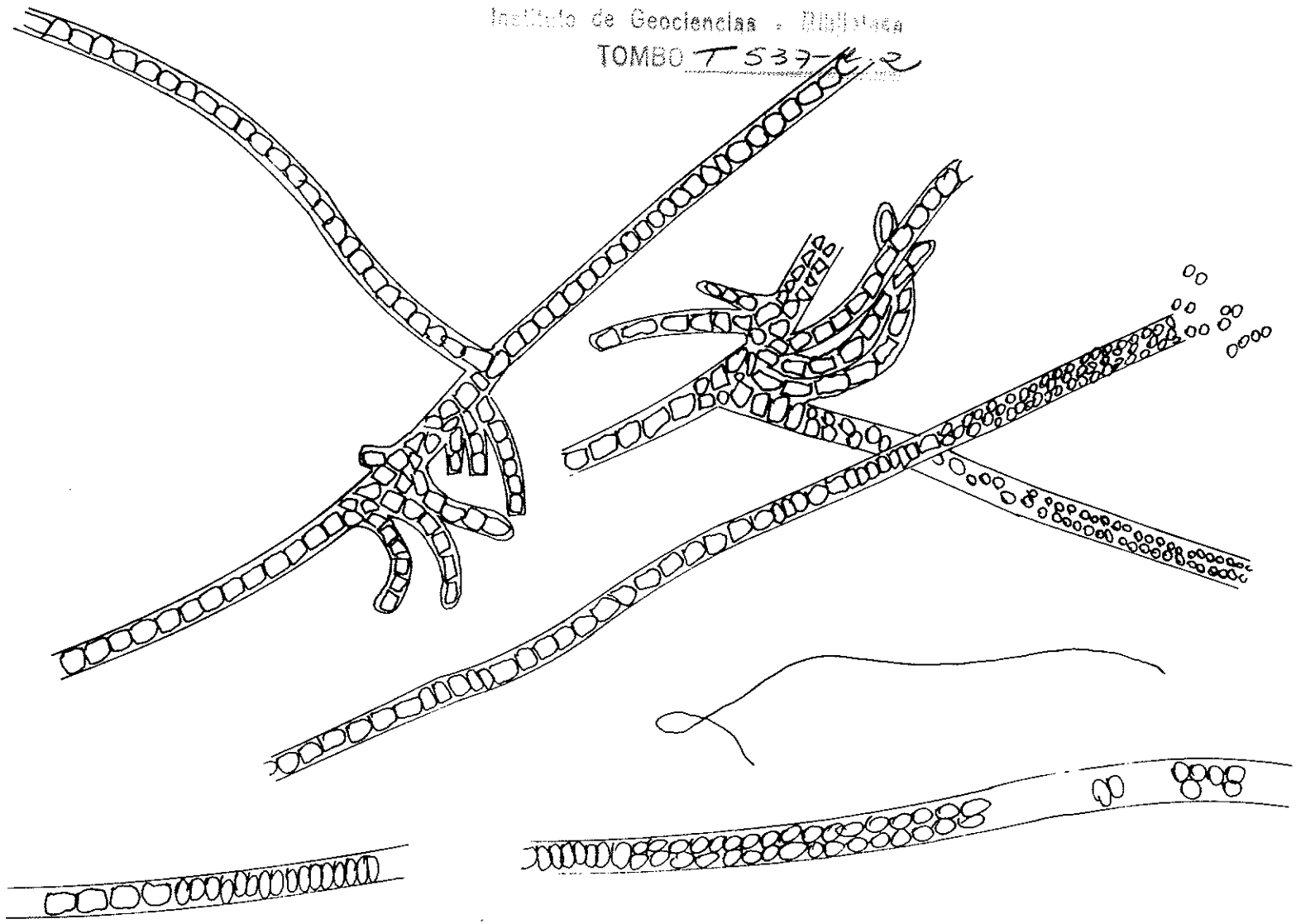


FIGURA 09 – FILAMENTOS DE *CRENOTHRIX* COMPOSTOS DE CÉLULAS INCLUSAS NA BAINHA
(HARDER, 1919)

contendo elevada quantidade de matéria orgânica e também em água não poluída que contenha ferro. O hidróxido férrico é depositado na bainha.

A *Clonothrix* ocorre em filamentos inclusos na bainha, semelhante à *Crenothrix*. As células são cilíndricas e se reproduzem na forma de conídia esférica. A bainha é orgânica e incrustada com ferro (Starkey, 1945).

- grupo em forma de haste caracteriza-se pela formação de hastes ou pedúnculos provenientes das substâncias de excreção. A *Gallionella* é considerada o exemplo do Gênero. As células dessas ferro-bactérias são consideradas reniformes e secretam continuamente hidróxido férrico na forma de filamentos, formando estruturas longas, entrelaçadas e impregnadas com hidróxido férrico (Figura 10). As ferro-bactérias desse grupo são largamente distribuídas em água que contém ferro, em solos e em minas. São consideradas organismos autotróficos;

- grupo em forma de cocos desenvolvem-se em uma cápsula extracelular onde os compostos de ferro-manganês podem ser depositados. Essa cápsula é composta de um denso material gelatinoso.

Na família *Siderocapsaceae* incluem-se os gêneros *Siderocapsa, Naumanniella e Siderococcus*. Apenas a *Siderocapsa* foi estudada por microscopia eletrônica. A figura 11 mostra um exemplo do gênero.

Alguns pesquisadores acreditam que esses organismos provavelmente utilizam a fração orgânica dos complexos de ferro-férrico na água e o ferro liberado precipita como hidróxido férrico.

Além dos grupos morfológicos de ferro-bactérias acima referidos, há outros microorganismos que metabolizam o enxôfre e seus compostos. São as bactérias redutoras de sulfato. Essas bactérias são responsáveis por várias transformações do ferro. Algumas bactérias conduzem o ferro na solução, outras o precipitam e, em determinados momentos as bactérias são responsáveis pela corrosão de metais (Starkey, 1945).

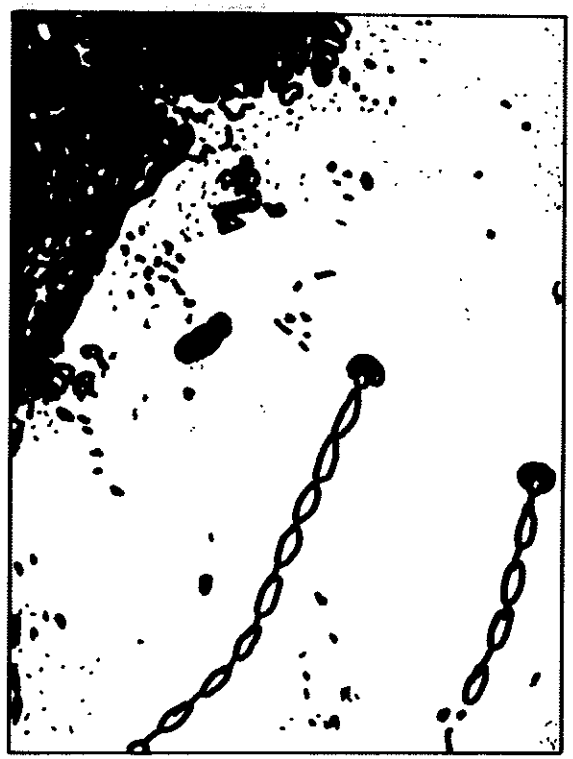


FIGURA 10 – *GALLIONELLA*, CÉLULAS ENTRANÇADAS INCRUSTADAS COM HIDRÓXIDO DE FERRO

(STARKEY, 1945)

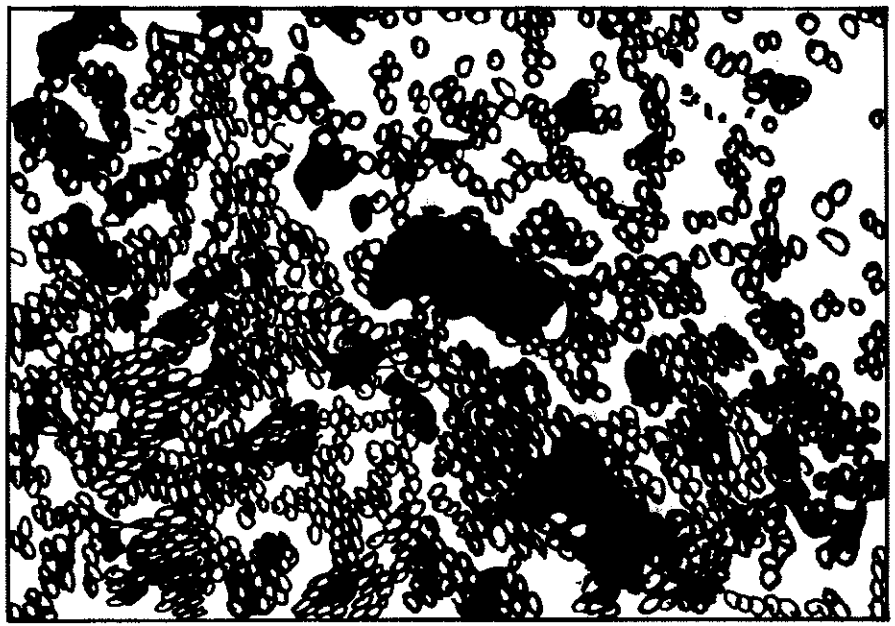


FIGURA 11 – *SIDEROCOCCUS*, ORGANISMOS EM FORMA CONCOIDAL, EM GRUPOS IRREGULARES COM PRECIPITAÇÃO DE HIDRÓXIDO DE FERRO.

(HASSELBARTH E LUNDMANN, 1972)

Thiobacillus é o gênero mais conhecido desse grupo de bactérias. A espécie *Thiobacillus ferrooxidans* requer grandes quantidades de ferro na solução, condição favorável ao seu crescimento. São bactérias que se desenvolvem na faixa de pH de 1,5 a 3,0, raramente encontradas em aquíferos e poços, ocorrendo tipicamente em ambientes ácidos, associadas com águas ácidas de drenagem de minas.

Um outro tipo de ferro-bactéria constitui o grupo das bactérias deslizantes. Não produzem corpo de frutificação e as células podem apresentar-se como individuais ou filamentos, impregnados com manganês. Algumas espécies produzem uma bainha que envolve as células individuais. O grupo está representado pela *Toxothrix*.

5.2. Processos de Corrosão e Incrustação

Os processos de corrosão, principalmente em poços em aluviões, acontecem com muita frequência e seus efeitos são danosos. De modo geral, a água das aluviões é corrosiva, atacando as partes metálicas dos poços e equipamentos de bombeamento.

A corrosão é provocada por um desgaste químico ou eletroquímico de determinados metais, como consequência de fatores externos ambientais agressivos. A ação eletrolítica envolve áreas catódicas e anódicas. A ação básica da corrosão, qualquer que seja a fonte e a quantidade de células corrosivas, acontece da seguinte forma: o metal é dissolvido no ánodo para formar átomos carregados eletricamente; o átomo libera elétrons que passam para o cátodo através do metal; os elétrons reagem com o íon hidrogênio (H^+) na água para formar o hidrogênio atômico (H^o); o hidrogênio atômico é depositado sobre o cátodo tendendo a polarizá-lo (Clarke, 1980). A Figura 12 mostra como acontece a corrosão eletrolítica.

As reações que desencadeiam a corrosão são influenciadas por diversos fatores químicos, físicos e biológicos, como temperatura da água, potencial redox, pH, quantidades e tipos de minerais e gases dissolvidos na água subterrânea. Algumas espécies de bactérias que

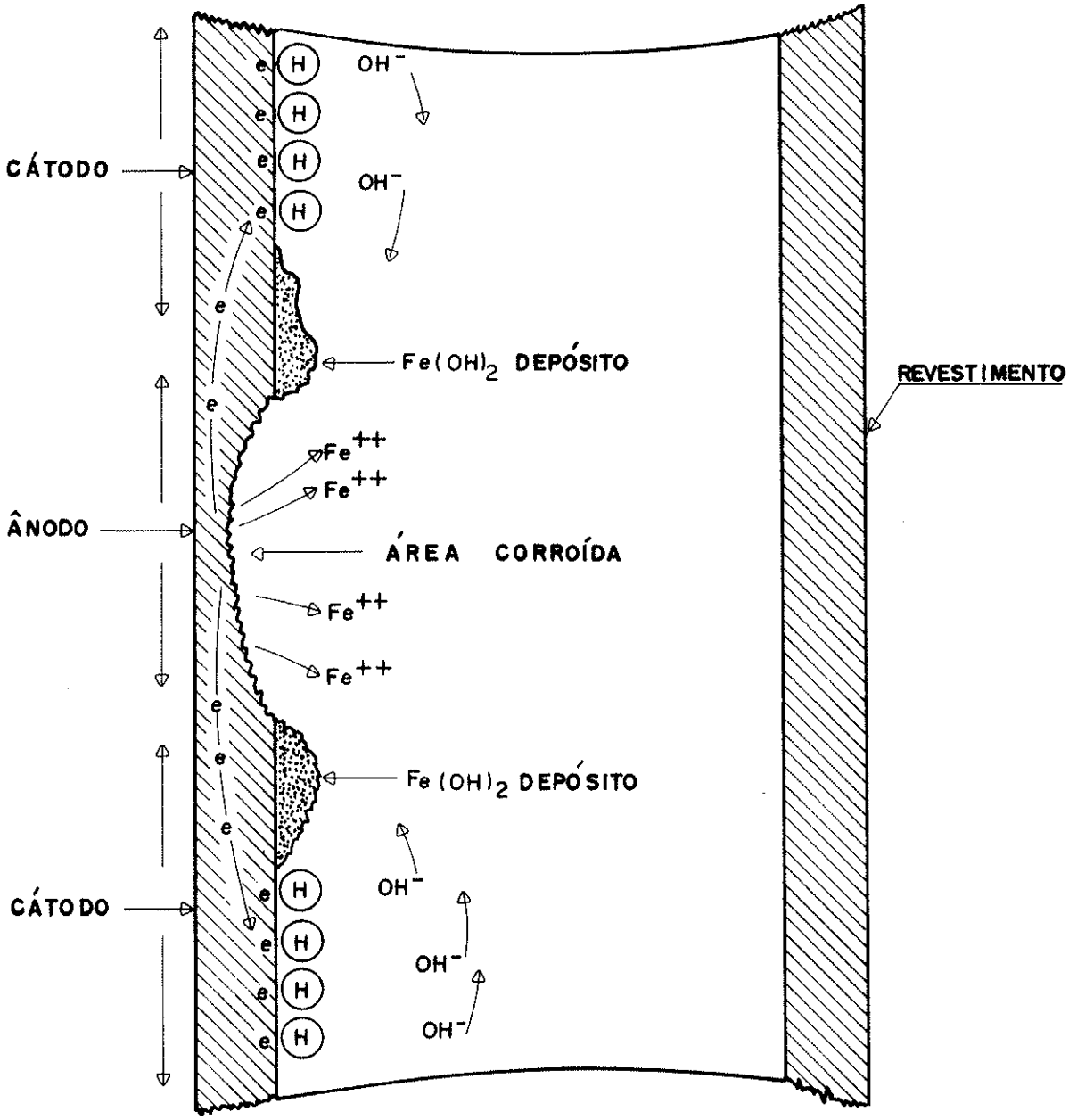


FIGURA 12 _ PROCESSO DE CORROSÃO ELETROLÍTICA

(CLARKE, 1980)

produzem para conversão do íon ferroso para composto férrico insolúvel, a exemplo das ferro-bactérias, podem induzir à corrosão por serem capazes de desenvolver condições apropriadas ao crescimento de outros organismos que estão envolvidos diretamente nos processos de corrosão de metais.

O desgaste dos filtros dos poços decorre da incrustação provocada pela precipitação de carbonatos e sulfatos de cálcio e magnésio, de compostos de ferro e de manganês (hidróxidos ou óxidos hidratados); da deposição de materiais tais como areias, siltes e argilas transportados em suspensão; das substâncias gelatinosas e massas flocosas produzidas pelas ferro-bactérias.

5.3. Métodos de Tratamento

Os métodos de tratamento para controlar o crescimento de ferro-bactérias em poços, são aqui abordados sucintamente, considerando a avaliação de desempenho de cada um deles, segundo Smith (1981), Hackett e Lehr (1985) e Driscoll (1987).

A Tabela 03 a seguir, mostra os métodos químicos e físicos disponíveis que podem ser usados para conter o crescimento de ferro-bactérias em poços de água.

Em geral, os métodos químicos são os mais usados haja vista apresentarem menor custo em relação aos métodos físicos. Por outro lado, os métodos físicos também vêm sendo aplicados com sucesso nos Estados Unidos - pasteurização e "vyredox method".

O "vyredox method" ou modificação do potencial redox, foi desenvolvido na Finlândia em 1955. A modificação do Eh da água subterrânea é obtida pela injeção de água aerada no aquífero. Segundo Armstrong (1978) esse método deve ser usado apenas para aquíferos porosos.

A técnica de uso do cloro para desinfecção de poços é usada desde o século XIX. Os compostos de cloro requerem alguns cuidados

TABELA 03 MÉTODOS DE TRATAMENTO PARA CONTROLE DE FERRO-BACTÉRIAS

MÉTODO	PRODUTO	APLICAÇÃO	CARACTERÍSTICA	OBSERVAÇÃO
QUÍMICO	AGENTES OXIDANTES			
	Desinfetantantes	Ácido hipocloro	-Baixo custo	Conhecimentos basicos requeridos p/ uso dos compostos de cloro: - nível de infestação - dosagem adequada - tempo de contato - forma de aplicação
		Hipoclorito de Ca	-Disponibil. no mercado -Aceito p/órgãos de saúde pública	
		Hipoclorito de Na	-Forte natureza oxidante -Destrói grande número de bactérias	
	Ácidos	Clorídrico	-Dissolve materiais incrustantes	
		Sulfâmico		
	Surfactantes	Polifosfatos	-Dispersa óxidos e hidróxidos de ferro e manganês, silte e argila	
	COMPOSTOS DE AMÔNIO QUATERNÁRIO - (QACs)	Detergente	-Eficácia como desinfetante. -Usado largamente em hospitais p/ dispersar lodos superficiais.	-Requer longo tempo de contato, tem efeito inibidor em poços como temperatura entre 4° - 12°C.
	LBA (ácido líquido antibacteriano)	Ácido orgânico	-Solução concentrada de 5X em contato com a bactéria durante 36 horas	O pH da solução deve ser mantido entre 3,5 e 5,0.
FÍSICO	PASTEURIZAÇÃO	Calor	-Temperatura entre 32° e 45°C dispersa depósitos mulcilaginos e organismos param de crescer ferrobactérias são destruídas	Baixa perfomance do método por perda de energia no sistema de transporte. Uso de fonte alternativa de calor viabiliza o tratamento.
	"VYREDOX METHOD" OU MODIFICAÇÃO DO POTENCIAL REDOX	Injeção de água aerada	-Parte da água bombeada do poço é aerada e reinjetada no aquífero através de poços ponteiras em volta do poço produtor.	-Necessário estudo hidrogeológico p/ determinar área de injeção, vazão e tempo de contato. -Risco de colmatação do aquífero.
	VIBRAÇÃO ULTRASÔNICA	Energia produzida p/ ondas sonoras	-Fonte sonora colocada no poço p/ remover óxidos e hidróxidos.	-Redução pouco significativa no nº de células,em experiências
	LUZ ULTRAVIOLETA	Absorção direta da luz	-Máxima quant.de luz sobre as ferro-bactérias c/água em circulação	-Luz n/penetra totalmente nas células devido óx.e hidrox. de Fe.
	BLOCO ANÓXICO	Criação de condições anaeróbicas.	-Ferro-bactérias são aeróbicas. -Bloco impede ar chegar na coluna d'água do poço. Não há crescim.	-O sistema de vedação p/ impedir a passagem de ar, deve ser perfeito.

especiais na aplicação dos produtos, notadamente pela sua natureza fortemente corrosiva.

É importante considerar o nível da infestação em cada poço a fim de determinar a dosagem mais adequada, o tempo de contato e a forma de aplicação.

Para desinfecções de rotina, em poços que apresentam pequenas quantidades de colônias/ml, a concentração pode ser de 50mg/l, com tempo de contato de 24 horas. Concentrações entre 300-500mg/l, com tempo de contato de 18 horas, são suficientes para destruir colônias de ferro-bactérias formadas em poços. Concentrações entre 500-1000mg/l, so deverão ser aplicadas com absoluta segurança quanto ao número de colônias existentes, identificadas na análise da água. Recomenda-se essa dosagem apenas para poços com acentuado grau de infestação.

A Tabela 04 mostra as quantidades de compostos de cloro requeridas para produzir várias concentrações de solução de cloro.

TABELA 04 - QUANTIDADES DE COMPOSTOS DE CLORO REUERIDAS PARA PRODUZIR CONCENTRAÇÕES DE CLORO POR LITRO DE ÁGUA

CONCENTRAÇÃO	HIPOCLORITO DE SÓDIO			
(mg/l)	3%(l)	5%(l)	10%(l)	12,5(l)
50	6,4	3,8	1,9	1,5
100	12,5	7,6	3,8	3,0
500	63,4	37,9	18,9	15,1
1000	126,5	76,0	37,9	30,3

Fonte: DRISCOLL, 1987.

6 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

A água subterrânea das áreas estudadas é utilizada para o consumo humano, irrigação, indústria e pecuária. Porisso, é importante estabelecer os limites da qualidade da água e as relações entre a geologia local e alguns fatores como o clima, evaporação, evapotranspiração, composição iônica da chuva que faz a recarga natural do aquífero, tempo de contato água-solo, comportamento hidrodinâmico, fenômenos que exercem grande influência na composição da água subterrânea no contexto da Região Nordeste, por provocarem variações sazonais significativas, alterando as condições naturais da água.

Os parâmetros hidrodinâmicos dos poços das áreas de estudo, calculados a partir dos ensaios de bombeamento, são mostrados na Tabela 05.

Os resultados da amostra revelam o nível de degradação da água subterrânea, do ponto de vista da potabilidade, em áreas específicas, devido à presença de colônias de ferro-bactérias associadas, geralmente, aos elevados teores de ferro.

Casos de ferro-bactérias em poços foram identificados em vários pontos do Ceará, como mostra a Figura 13. A partir do resultado das análises de água foi possível determinar as áreas onde ocorre a maior incidência.

O vale do rio Jaguaribe o vale do rio Acaraú foram as regiões que apresentaram os índices mais elevados de colônias de ferro-bactérias em poços, associados aos teores de ferro em mg/l superiores aos padrões de potabilidade.

Os poços construídos no aquífero aluvial, em geral são tipo tubular raso, totalmente revestidos com materiais metálicos, embora haja poços construídos mais recentemente, revestidos com tubos e filtros de PVC geomecânico ou aço inoxidável. Há poços amazonas em operação onde também foi constatada a presença de ferro-bactérias.

No aquífero das dunas, os poços selecionados apresentaram

TABELA 05 PARÂMETROS BÁSICOS DOS POÇOS DAS ÁREAS DE ESTUDO

LOCAL	POÇO	DATA PERF.	PROF. (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m^3/h)	Q/SW ($m^3/h/m$)	T (m^2/s)	K (m/s)
ABREULÂNDIA	01	11.05.78	16,80	4,10	6,57	10,00	4,04	$3,41.10^{-3}$	$6,59.10^{-4}$
	05	04.05.78	10,90	3,47	5,67	8,00	3,63	$2,62.10^{-3}$	$5,68.10^{-4}$
	09	05.08.78	11,10	4,16	5,76	6,00	3,75	$2,22.10^{-3}$	$3,94.10^{-4}$
	22	18.05.78	10,30	4,10	6,04	5,00	2,57	$4,63.10^{-3}$	$5,90.10^{-4}$
ACARAÚ	01	15.08.77	14,43	4,70	7,00	30,00	13,[illegible]	$1,30.10^{-2}$	$7,65.10^{-4}$
	02	18.08.77	16,10	4,76	7,00	30,00	13,39	$1,40.10^{-2}$	$8,75.10^{-4}$
BARBALHA	01	24.06.81	134,00	4,84	26,00	100,00	4,73	$5,39.10^{-3}$	$4,41.10^{-5}$
	03	04.06.81	163,00	3,34	22,50	100,00	5,22	$7,12.10^{-3}$	$4,47.10^{-5}$
	04	18.02.86	109,00	4,93	34,30	80,00	2,73	$3,98.10^{-3}$	$3,98.10^{-5}$
BELA CRUZ	02	25.09.77	25,00	3,70	10,00	28,00	4,44	$1,30.10^{-3}$	$7,3.10^{-5}$
	03	31.10.77	25,00	3,70	10,00	28,00	4,44	$2,10.10^{-3}$	$9,7.10^{-5}$
	04	12.10.77	20,75	4,60	10,00	28,00	5,18	$5,70.10^{-3}$	$3,3.10^{-4}$
CARIRÉ	01	27.06.78	14,20	2,15	2,74	37,00	62,71	$5,00.10^{-2}$	$4,00.10^{-4}$
CARNAUBAL	01	14.05.83	131,00	3,00	41,00	30,00	0,79	$9,53.10^{-7}$	$1,31.10^{-4}$
CASCAVEL	01	16.02.89	59,00	15,80	18,15	10,00	4,25	$8,80.10^{-4}$	-
GROAÍRAS	01	01.11.76	9,10	5,88	6,63	20,00	26,67	$9,80.10^{-3}$	$3,04.10^{-3}$
	02	03.11.76	8,80	5,66	6,53	20,00	22,99	$4,28.10^{-3}$	$1,41.10^{-3}$
IGUATU	19	06.88	23,20	6,52	7,43	70,00	76,92		
	20	07.88	25,4	6,25	7,53	70,00	54,69		
	21	07.88	21,00	-	-	60,00			
ITAIÇABA	01	04.10.80	18,14	4,14	6,75	10,00	3,83	$1,04.10^{-2}$	$8,25.10^{-4}$
JAGUARIBARA	01	28.07.80	7,70	4,59	5,68	50,00	45,87	$4,8.10^{-3}$	$1,00.10^{-3}$
JAGUARUANA	01	04.11.77	8,20	5,19	6,20	30,00	29,70	$8,20.10^{-3}$	$2,70.10^{-3}$
JUAZEIRO DO NORTE	01	16.07.76	116,00	4,80	37,80	100,00	3,03	$3,02.10^{-3}$	$2,75.10^{-5}$
	03	29.06.76	140,00	2,52	45,00	100,00	2,35	$4,56.10^{-3}$	$3,48.10^{-5}$

TABELA 05 PARÂMETROS BÁSICOS DOS POÇOS DAS ÁREAS DE ESTUDO (cont.)

LOCAL	POÇO	DATA PERF.	PROF. (m)	NE (m)	ND (m)	Q (m^3/h)	Q/SW ($m^3/h/m$)	T (m^2/s)	K (m/s)
JUAZEIRO DO NORTE	08	08.10.85	190,00	15,87	58,00	60,00	1,42	$2,14.10^{-3}$	$1,24.10^{-5}$
	09	09.09.85	120,00	34,50	57,00	90,00	4,00	$3,76.10^{-3}$	$5,78.10^{-5}$
	10	22.08.85	115,00	17,31	46,00	180,00	6,27	$9,23.10^{-3}$	$1,06.10^{-4}$
	11	11.09.85	91,00	10,53	48,00	180,00	4,80	$6,71.10^{-3}$	$7,98.10^{-5}$
MACARAÚ	01	19.07.80	11,93	3,25	4,27	10,00	9,80	$1,78.10^{-2}$	$1,91.10^{-3}$
MARCO	01	31.10.81	16,00	4,38	4,60	9,00	40,91	$1,87.10^{-2}$	$1,46.10^{-3}$
	02	14.01.90	10,00	3,99	4,80	70,00	86,40	$1,53.10^{-2}$	$1,14.10^{-3}$
MAURITI	04	31.01.84	181,20	0,96	51,67	31,00	0,59	$2,93.10^{-3}$	$3,91.10^{-4}$
MISSÃO VELHA	02	13.02.85	124,90	1,38	40,00	80,00	2,07	$3,20.10^{-3}$	$6,27.10^{-5}$
MORRINHOS	01	22.01.82	10,00	5,14	5,46	7,00	21,88	$6,15.10^{-3}$	$1,43.10^{-3}$
PACOTI	01	08.05.78	5,50	2,18	5,10	11,00	3,77	$5,34.10^{-4}$	$1,52.10^{-4}$
QUIXERÉ	01	18.03.77	13,90	5,30	6,98	30,00	17,86	$2,51.10^{-3}$	$3,03.10^{-4}$
SANTANA DO ACARAÚ	01	11.10.85	16,30	3,04	4,24	14,00	11,67	$6,55.10^{-3}$	$5,34.10^{-4}$
	02	14.10.85	16,36	3,26	4,66	12,00	8,57	$2,87.10^{-3}$	$2,02.10^{-4}$
S.GONÇALO DO AMARANTE	01	24.11.89	15,50	2,96	6,85	9,00	2,31	$6,54.10^{-4}$	$5,21.10^{-5}$
	03	20.11.89	14,75	2,52	10,70	8,00	0,98	$1,46.10^{-3}$	$1,19.10^{-4}$
	04	29.11.89	8,27	1,99	7,65	5,00	0,89	$3,32.10^{-4}$	$5,30.10^{-5}$
TABULEIRO DO NORTE	01	03.08.88	28,93	5,00	16,82	44,00	3,72	$2,10.10^{-3}$	$8,60.10^{-5}$
	02	23.08.88	27,35	5,13	15,00	41,00	4,15	$2,10.10^{-3}$	$9,70.10^{-5}$
	03	02.09.88	30,60	5,07	18,95	37,00	2,66	$1,50.10^{-3}$	$6,00.10^{-5}$
TIANGUÁ	01	23.03.77	9,00	1,32	3,05	10,00	5,78	$7,44.10^{-4}$	$8,85.10^{-5}$
TUÍNA	01	17.08.83	15,70	4,83	6,27	14,00	9,72	$1,68.10^{-2}$	$1,70.10^{-3}$
UBAJARA	01	22.01.78	8,00	1,95	3,36	6,00	4,25	$6,42.10^{-4}$	$5,92.10^{-5}$
	02	10.03.80	46,00	1,00	25,00	2,00	0,07	$1,20.10^{-5}$	$2,79.10^{-7}$
VIÇOSA	05	30.01.78	50,00	2,59	12,12	8,00	0,84	$2,98.10^{-4}$	$1,53.10^{-5}$

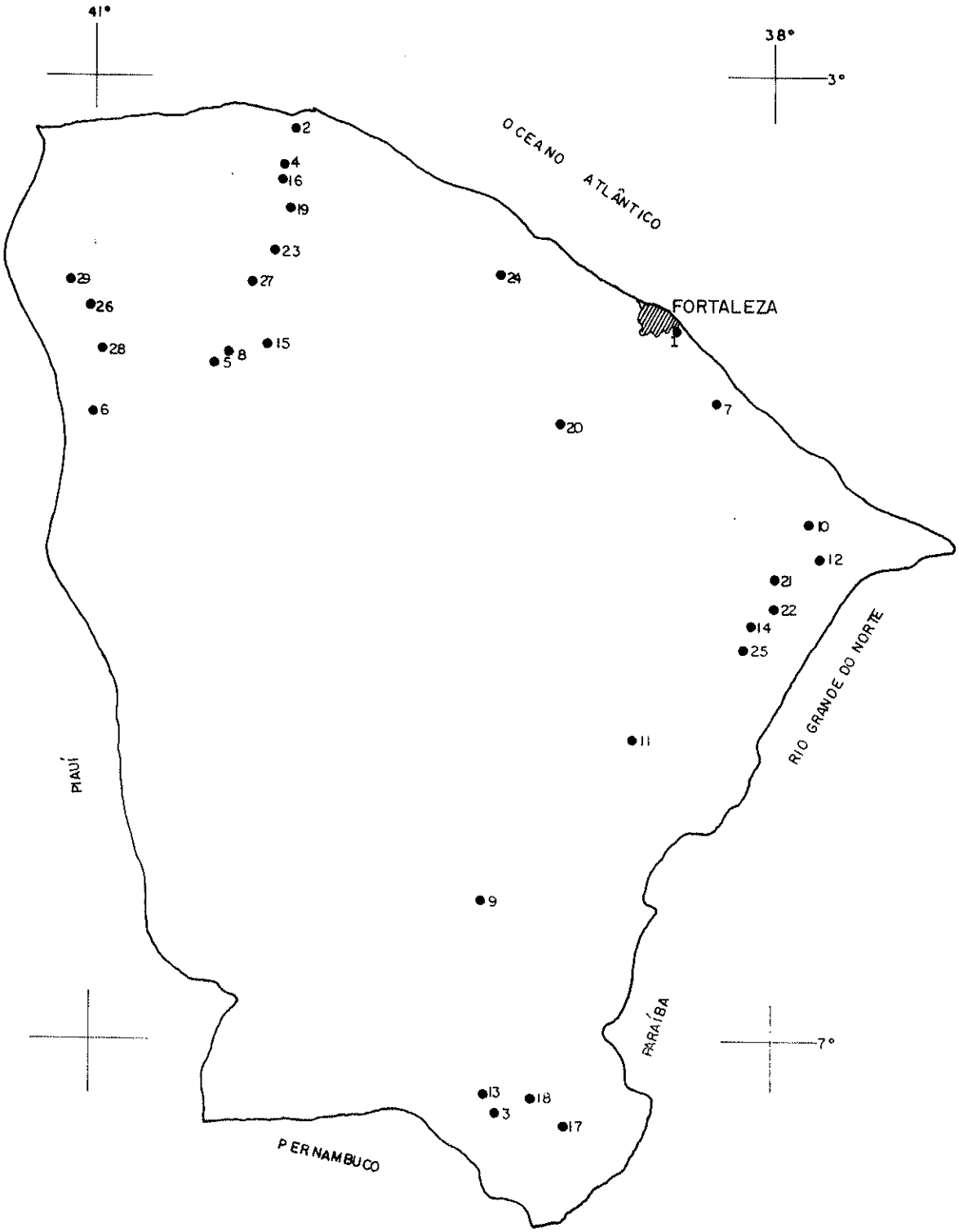


FIGURA 13 – PONTOS DE COLETAS DE ÁGUA

LOCALIDADES:

1 ABREULANDIA	7 CASCAVEL	13 JUAZEIRO DO NORTE	19 MORRINHOS	25 TABULEIRO DO NORTE
2 ACARAÚ	8 GROAIRAS	14 LIMOEIRO DO NORTE	20 PACOTI	26 TIANGUÁ
3 BARBALHA	9 IGUATU	15 MACARAÚ	21 QUIXERÉ	27 TUINA
4 BELA CRUZ	10 ITAIÇABA	16 MARCO	22 RUSSAS	28 UBAJARA
5 CARIRÉ	11 JAGUARIBARA	17 MAURITI	23 SANTANA DO ACARAÚ	29 VIÇOSA
6 CARNAUBAL	12 JAGUARUANA	18 MISSÃO VELHA	24 SÃO GONÇALO DO AMARANTE	

colônias de ferro-bactérias em quantidade suficiente para provocar problemas de incrustação de filtros, corrosão das tubulações metálicas e mudanças no sabor da água.

No domínio do aquífero Missão Velha, alguns poços amostrados também registraram teores de ferro elevado e a presença de colônias de ferro-bactérias. Na formação Barreiras/Cristalino também foi detectada a ocorrência de ferro- bactérias.

6.1. Análises Bacteriológicas

As concentrações de colônias de ferro-bactérias, bem como as de ferro total e os valores de pH determinados nas amostras de água de poços, localizados em 29 sistemas públicos de abastecimento de água são apresentadas na Tabela 06.

Quantidades de ferro solúvel acima de 1mg/l detectadas na água subterrânea das áreas de estudo, já são suficientes para alterar a turbidez, a cor e o sabor da água, embora não favoreçam, necessariamente, o crescimento de ferro-bactéria. A ferro-bactéria encontrada com maior frequência, especialmente onde a água apresenta teores mais elevados de ferro, é a do tipo *Gallionella* que aparece em flocos, formando espessas crostas, devido à precipitação do hidróxido de ferro, reduzindo parcialmente o escoamento natural da água pela tubulação.

Na cidade de Tabuleiro do Norte, por diversas vezes, procedeu-se a desobstrução dos poços, equipamentos de bombeamento, adutora e rede de distribuição, utilizando-se um polifosfato para desagregar e dispersar os materiais incrustantes e o hipoclorito de cálcio para desinfectar e destruir as ferro- bactérias.

Logo que a desinfecção é realizada, as ferro-bactérias desaparecem, mas retornam num período bastante curto, inferior a 90 dias.

Em Coronel Fabriciano, MG, a COPASA - Companhia de

Saneamento de Minas Gerais - realizou um teste de aplicação contínua de produtos químicos em um poço, durante 90 dias, com amostras colhidas a cada 3 dias. Constatou-se que as ferro- bactérias *desapareceram 10 dias após o início* da aplicação.

O acompanhamento das amostras foi feito por mais de 60 dias após o término da adição dos produtos, observando-se que pelo menos nesse período, não houve reaparecimento de flocos. A Figura 14 ilustra o exemplo.

Parece não existir uma relação definida entre o teor elevado de ferro na água e a presença de ferro-bactéria. Observou-se casos de poços situados em uma área onde as condições geológicas e hidrogeológicas são basicamente as mesmas, mas a análise da água mostrou que, em Abreulândia, o poço 01 tem um teor de ferro solúvel de 15mg/l com apenas 2col/ml de ferro- bactéria, enquanto no poço 09, o teor de ferro é mais baixo (0,9mg/l) e o número de colônias de ferro-bactérias é bem maior que no outro poço (450col/ml).

De um total de 58 análises realizadas, 62% foram de água de poços de aluvião, sendo que 44% apresentaram teores de ferro acima de 1mg/l. Houve casos em que o ferro solúvel foi superior a 38mg/l/poço.

De modo geral, em aluviões, os altos teores de ferro coincidem com uma maior concentração de colônias de ferro-bactérias. A água do aquífero aluvial caracteriza-se por possuir teor de Fe^{2+} superior às demais formações geológicas. A Figura 15 mostra histogramas de frequência para ferro total e ferro filtrado no aquífero aluvial.

Observou-se a presença de ferro-bactérias em poços onde os materiais de revestimentos e filtros são mais resistentes aos processos corrosivos.

Os poços de Tabuleiro do Norte, no vale do rio Jaguaribe, têm filtros de aço inoxidável, tubos schedule 40, pré- filtro tipo pérola, o que não impediu a enorme proliferação desses microorganismos, bem como as altas concentrações de ferro solúvel. Pode-se afirmar que as colônias de ferro-bactérias são provenientes da própria formação

TABELA 06 - CONCENTRAÇÕES DE FERRO-BACTÉRIAS E FERRO TOTAL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA

LOCAL	AQUÍFERO CAPTADO	LOCAL DE COLETA	DATA DE COLETA	pH	FERRO BACTÉRIA (col/ml)	FERRO TOTAL (mg/l) FILTRADO	FERRO TOTAL (mg/l) NÃO FILTRADO
ABREULÂNDIA	QHD	PT-01	06/88	6,90	2,00	1,90	15,20
	QHD	PT-05	06/88	6,70	2,00	0,30	1,50
	QHD	PT-09	06/88	5,76	450,00	0,30	0,90
	QHD	PT-22	06/88	6,71	16,00	0,30	6,40
ACARAÚ	QHA	PT-01	07/88	5,87	380,00	0,27	3,77
	QHA	PT-02	07/88	6,57	240,00	0,22	4,45
BARBALHA	JSM	PT-01	08/88	7,70	3,00	0,10	0,24
	JSM	PT-03	08/88	7,60	0,00	0,01	0,10
	JSM	PT-04	08/88	7,50	110,00	0,01	0,45
BELA CRUZ	QHA	PT-02	07/89	7,39	780,00	1,27	4,82
	QHA	PT-03	07/89	7,47	510,00	4,70	6,59
	QHA	PT-04	08/88	7,50	210,00	0,48	2,45
CARIRÉ	QHA	PT-01	07/88	8,00	420,00	0,25	2,85
CARNAUBAL	SDS	PT-01	08/88	7,42	2,00	0,01	0,31
CASCAVEL	TQB/PEC	PT-01	07/89	6,97	350,00	0,21	1,51
GROAIRAS	QHA	PA-01	07/88	6,90	20,00	0,65	2,11
	QHA	PA-02	07/89	6,82	1200,00	1,37	7,82
IGUATU	QHA	PT-07	03/88	7,80	0,00	-	1,65
	QHA	PT-18	03/88	8,00	530,00	-	2,05
	QHA	PT-19	01/90	8,00	1370,00	-	12,00
	QHA	PT-20	07/90	6,90	5481,00	-	38,50
	QHA	PT-21	01/90	7,10	3592,00	-	14,00
	QHA	PT-23	01/90	8,30	2942,00	-	12,80
ITAIÇABA	QHA	PT-01	03/88	6,69	90,00	-	0,28
JAGUARIBARA	QHA	PA-01	03/88	7,90	394,00	-	0,14
JAGUARUANA	QHA	PT-01	03/88	7,50	59,00	-	0,10
JUAZEIRO DO NORTE	JSM	PT-01	08/88	6,75	0,00	0,06	0,08
	JSM	PT-03	08/88	6,62	0,00	0,04	0,14
	JSM	PT-08	08/88	7,81	1,00	0,01	0,45
	JSM	PT-09	08/88	6,13	1,00	0,02	0,05
	JSM	PT-10	08/88	6,20	3,00	0,06	0,08
	JSM	PT-11	08/88	6,68	0,00	0,03	0,06

TABELA 06 - CONCENTRAÇÕES DE FERRO-BACTÉRIAS E FERRO TOTAL NA ÁGUA SUBTERRÂNEA (Continuação)

LOCAL	AQUÍFERO CAPTADO	LOCAL DE COLETA	DATA DE COLETA	pH	FERRO BACTÉRIA (col/ml)	FERRO TOTAL (mg/l) FILTRADO	FERRO TOTAL (mg/l) NÃO FILTRADO
LIMOEIRO DO NORTE	QHA	PT-02	04/88	6,90	0,00	-	8,00
MACARAU	QHA	PT-01	07/88	6,80	7,70	0,21	0,46
MARCO	QHA	PA-01	07/88	7,23	110,00	0,05	0,18
	QHA	PA-02	07/89	7,49	200,00	0,19	0,79
MAURITI	SDC	PT-04	07/89	7,42	0,00	0,07	0,15
MISSÃO VELHA	JSH	PT-02	08/88	7,13	4320,00	0,08	0,12
MORRINHOS	QHA	PA-01	07/88	6,71	280,00	0,11	1,27
PACOTI	QHA	PA-01	03/88	3,87	1690,00	1,84	3,87
QUIXERÉ	QHA	PT-01	03/88	7,80	320,00	1,04	7,80
RUSSAS	QHA	PT-02	04/88	7,30	138,00	-	0,13
SANTANA DO ACARAÚ	QHA	PT-01	07/88	7,50	0,00	0,04	0,12
	QHA	PT-02	07/89	7,34	2,00	0,13	0,81
S.GONÇALO AMARANTE	QHD	PT-01	01/90	6,81	540,00	-	1,60
	QHD	PT-03	01/90	6,74	660,00	-	1,98
	QHD	PT-04	01/90	6,32	180,00	-	1,02
	QHA	PT-01	07/88	7,20	1440,00	0,16	3,91
	QHA	PT-01	01/90	6,80	1720,00	0,17	4,10
TABULEIRO DO NORTE	QHA	PT-02	07/88	6,87	980,00	0,18	6,80
	QHA	PT-02	01/90	7,36	946,00	0,98	5,16
	QHA	PT-03	07/88	7,14	1900,00	0,12	3,90
	QHA	PT-03	01/90	6,94	2400,00	1,27	8,61
TIANGUÁ	QHA	PA-01	08/88	5,51	510,00	0,02	0,79
TUINA	QHA	PT-01	07/89	6,97	1500,00	0,21	3,42
UBAJARA	QHA	PA-01	08/88	6,78	0,00	0,18	4,52
	SDS	PT-03	07/89	7,26	2,00	0,17	0,96
VIÇOSA DO CEARÁ	SDS	PT-05	08/88	5,50	0,00	0,01	0,07

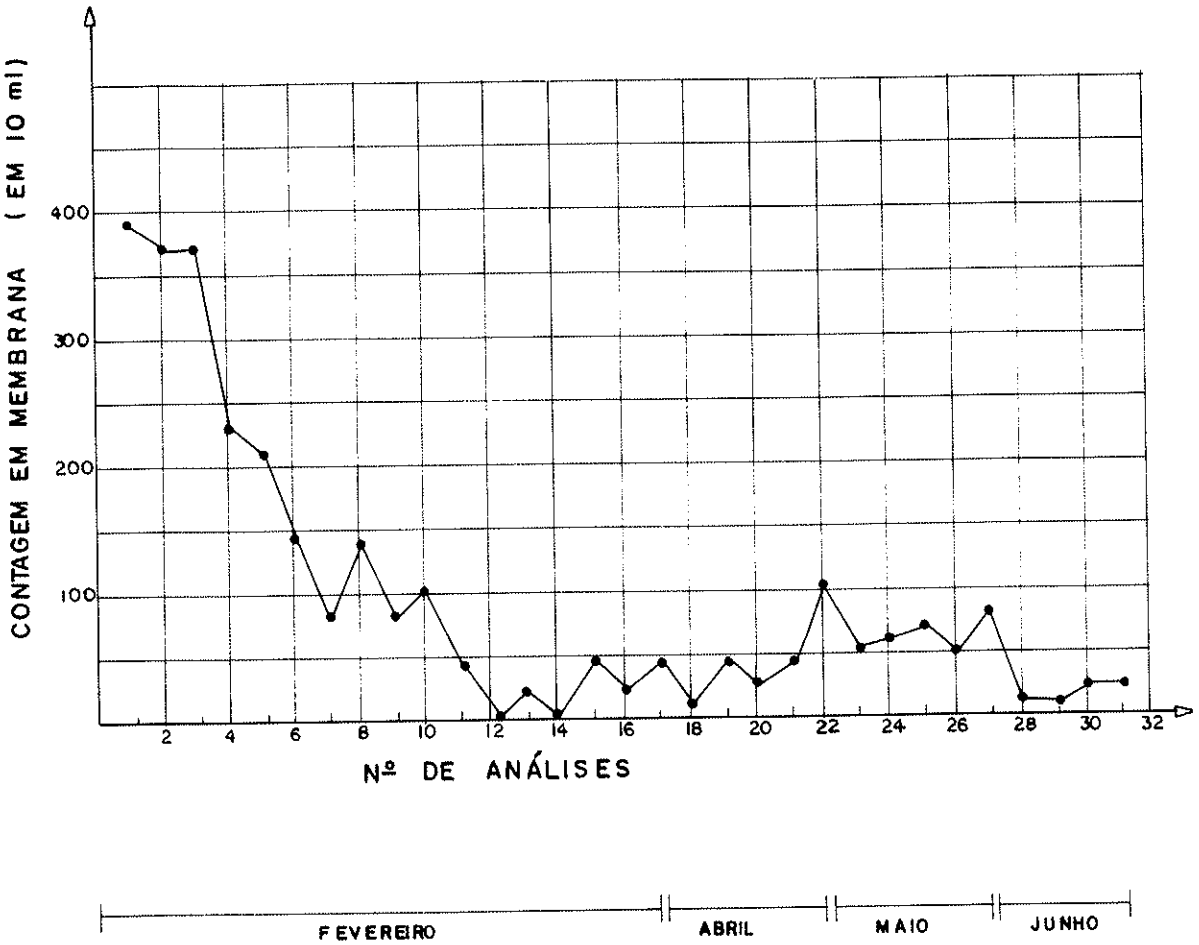


FIGURA 14 — REDUÇÃO DE FERRO-BACTÉRIAS PELA APLICAÇÃO CONTÍNUA DE CLORO LIVRE (POÇO 09 — CEL. FABRICIANO — MG)
(COPASA, 1986)

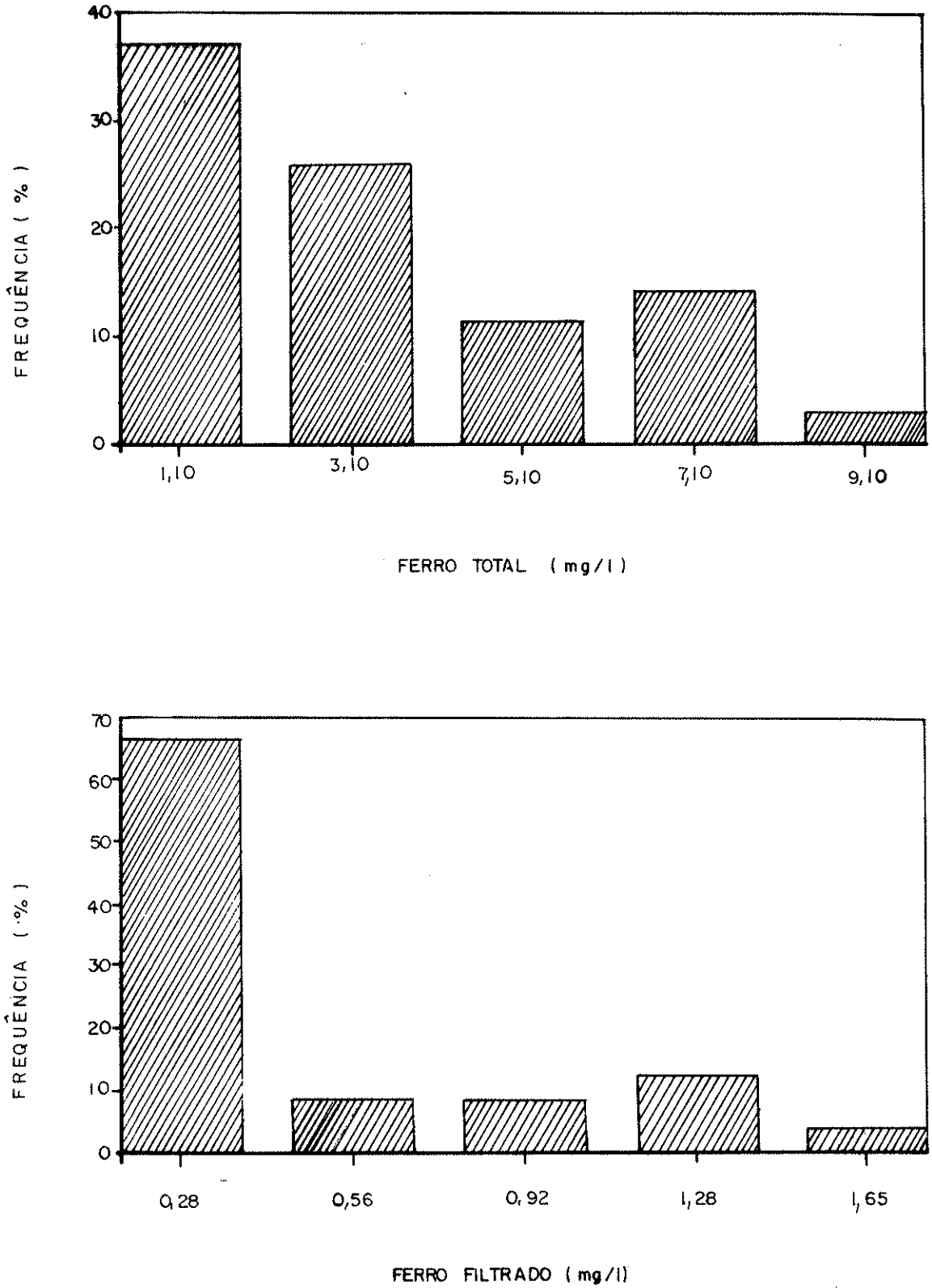


FIGURA 15 – HISTOGRAMA DE FREQUENCIA PARA FERRO TOTAL E FERRO FILTRADO NO AQUÍFERO ALUVIAL.

aquífera, pois o fato repete-se em outras localidades cuja água tem, basicamente, as mesmas características físico-químicas.

Uma outra hipótese é que as ferro-bactérias teriam sido introduzidas durante a construção dos poços através dos equipamentos de perfuração.

O desenvolvimento de ferro-bactérias pode manifestar-se em formações sedimentares ou cristalinas, aquíferos rasos ou profundos, como bem demonstram as análises de água de poços tubulares rasos e profundos, e ainda de poços tipo amazonas, estes, sem estruturas metálicas que possam liberar materiais oxidáveis que contribuem para proliferação de ferro-bactérias.

O crescimento desses microorganismos pode estar associado a condições químicas e ambientais tanto dos poços quanto dos aquíferos, incluindo-se aí a presença de dióxido de carbono, ferro ferroso dissolvido, pH, Eh, condutividade elétrica, oxigênio, sólidos totais dissolvidos.

Uma água agressiva tende a acelerar os processos de corrosão de metais e com isso, cria condições apropriadas para que as ferro-bactérias desenvolvam-se nos sistemas de poços.

O superbombeamento de um poço para retirada de vazões superiores às recomendadas para exploração, tem como consequência o rebaixamento do nível dinâmico devido às altas velocidades de fluxo através dos filtros do poço, deixando-os expostos ao ar e mais vulneráveis aos processos de incrustação e corrosão que provocam a perda de eficiência do poço e aumentam a possibilidade de proliferação de ferro-bactérias.

De acordo com as amostras de água coletadas em poços das diversas formações aquíferas, há uma distribuição espacial significativa de ferro-bactérias no Ceará, tendo sido detectadas em 27 localidades, das 29 amostradas. Os níveis de infestação são mais acentuados nas áreas aluvionares.

As condições de pH e Eh da água subterrânea são ligeiramente alteradas, principalmente pela presença de ferro. O comportamento do pH-Eh é da maior importância na solubilidade e estabilidade do

ferro e tem influência marcante no controle do crescimento de ferro-bactérias em poços.

Alguns microorganismos, como as ferro-bactérias, promovem meios redutores que favorecem a formação de Fe^{2+}; outros utilizam a energia da passagem do Fe^{2+} para o Fe^{3+} em seus processos de vida e precipitam substâncias gelatinosas e grande quantidade de hidróxido de ferro.

6.2. Análises Físico-Químicas

A caracterização hidrogeológica foi feita para cada aquífero e os resultados obtidos permitem avaliar a qualidade da água em função dos usos para consumo humano e irrigação, considerando a classificação e a agressividade químicas da água.

Os resultados das análises físico-químicas foram submetidos aos procedimentos de transformações dos íons maiores de mg/l para meq/l; nível de confiabilidade dos dados das análises através do balanço iônico; classificação da água segundo a composição química pelo diagrama de Pipper; classificação da potabilidade utilizando-se o diagrama logarítmico de Schoeller- Berkaloff; classificação para irrigação pelo cálculo do SAR; determinação do índice de saturação (águas corrosivas, incrustantes), a fim de que pudesse fornecer informações conclusivas a respeito da qualidade da água. A Tabela 07 apresenta uma síntese das características gerais do comportamento hidrogeoquímico da água de cada aquífero.

De modo geral, as águas de todos os aquíferos são de "boa potabilidade", segundo o diagrama de Schoeller-Berkaloff. O cálculo do índice de saturação revela que 98% das águas analisadas são consideradas corrosivas.

No aquífero aluvial, a água é corrosiva a muito corrosiva. Predominam águas mistas, embora existam águas cloretadas cálcicas e cloretadas sódicas. Para irrigação, prevalecem duas classes, C_1-S_1 e C_2-S_1. As águas enquadradas na classe C_1-S_1 têm baixa salinidade,

baixo teor de sódio, condutividade entre 100 e 250μmho/cm a 25°C e podem irrigar as plantas mais sensíveis com pequenos riscos de salinidade do solo, exceto se este solo for de fraca permeabilidade.

As amostras pertencentes à classe C_2-S_1, são águas de salinidade média, com baixo teor de sódio, condutividade entre 250 e 750μmho/cm a 25°C. As plantas que toleram moderadamente a presença de sais podem ser cultivadas.

A água do aquífero Missão Velha é bicarbonatada cálcica e/ou magnesiana, de boa potabilidade e é extremamente corrosiva. Para irrigação situa-se nas categorias C_1-S_1 e C_2-S_1.

No aquífero dunas, a água é considerada de boa potabilidade. A composição química está entre bicarbonatada cálcica e/ou magnesiana e cloretada sódica e/ou sulfatada sódica. Para irrigação, predomina a classe C_2-S_1.

O aquífero Serra Grande tem água bicarbonatada sódica, de boa potabilidade, muito corrosiva e de classe C_1-S_1 para irrigação.

Apenas duas análises foram consideradas para o aquífero Mauriti/Cariri. A água é de boa potabilidade. Numa amostra é bicarbonatada cálcica e/ou magnesiana, incrustante e classificada para irrigação na categoria C_3-S_1. As classes C_2-S_2 e C_3-S_1 representam, respectivamente salinidade média e risco de sódio médio e risco de salinidade alto e risco de sódio baixo.

Na água do Barreiras/Cristalino, a potabilidade é considerada apenas passável. São águas cloretadas sódicas e/ou sulfatadas sódicas, corrosivas e classificadas para irrigação na classe C_2-S_1 e C_3-S_1.

A água subterrânea também é utilizada para fins industriais em algumas regiões do Estado. Dependendo do uso a que se destina, há também restrições com relação a alguns elementos, principalmente o ferro que necessita de tratamento corretivo.

TABELA 07 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA
AQUÍFERO ALUVIAL

AMOSTRA	FONTE	ALCALINIDADE TOTAL	DUREZA $CaCO_3$ mg/l	STD mg/l	RESÍD. SECO (mg/l)	COND.ELÉT. (uS/cm) a 25°C	pH LAB.	CLASS. PIPER	POTABILID. SCHOELLER & BERKALOFF	ÍNDICE DE SATURAÇÃO: LANGELIER VALOR	LANGELIER CARÁTER	RYZNAR VALOR	RYZNAR CARÁTER	CLASSIFICAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO: SAR	CLASSE	RISCO DE SODIO	RISCO DE POTAB.
01	P	54	30	131	134	187	6,69	09	Boa	-1,9	C	10,5	M C	1,0	C_1-S_1	Baixo	Baixo
02	P	50	30	122	133	188	6,72	09	Boa	-1,9	C	10,6	M C	0,9	C_1-S_1	Baixo	Baixo
03	P	50	26	111	110	155	6,98	08	Boa	-1,7	C	10,4	M C	0,9	C_1-S_1	Baixo	Baixo
04	P	34	30	93	109	153	7,16	09	Boa	-1,6	C	10,4	M C	0,3	C_1-S_1	Baixo	Baixo
05	P	46	44	106	99	230	6,80	04	Boa	-1,7	C	8,9	C	1,2	C_1-S_1	Baixo	Baixo
06	P	79	48	199	160	480	6,86	10	Boa	-1,9	C	8,7	C	3,2	C_2-S_1	Baixo	Médio
07	P	39	60	215	200	250	6,88	10	Boa	-2,1	C	9,0	M C	1,9	C_2-S_1	Baixo	Médio
08	P	76	68	201	162	300	6,60	04	Boa	-1,8	C	8,4	C	1,6	C_2-S_1	Baixo	Médio
09	P	80	76	188	163	232	7,23	04	Boa	-1,3	C	8,5	C	1,2	C_1-S_1	Baixo	Baixo
10	P	80	96	204	193	285	6,69	04	Boa	-1,9	C	8,6	C	1,8	C_1-S_1	Baixo	Baixo
11	P	62	54	196	165	400	7,26	04	Boa	-1,4	C	8,6	C	1,3	C_2-S_1	Baixo	Médio
12	P	64	74	187	140	350	6,84	04	Boa	-1,8	C	8,6	C	1,0	C_2-S_1	Baixo	Médio
13	P	42	46	119	112	157	7,49	04	Boa	-1,3	C	8,5	C	0,8	C_1-S_1	Baixo	Baixo
14	P	45	49	161	150	351	6,84	04	Boa	-1,6	C	8,5	C	1,0	C_2-S_1	Baixo	Médio

LEGENDA: C = Corrosiva; M C = Muito Corrosiva; I = Incrustante; P I = Pouco incrustante

1 BICARBONATADA
2 SULFATADA
3 CLORETADA
4 MISTA
5 CÁLCICA
6 MAGNESIANA
7 SÓDICA
8 BICARBONATADA CÁLCICA E/OU MAGNESIANA
9 SULFATADA CÁLCICA E/OU CLORETADA CÁLCICA E/OU MAGNESIANA
10 CLORETADA SÓDICA E/OU SULFATADA SÓDICA
11 BICARBONATADA SÓDICA

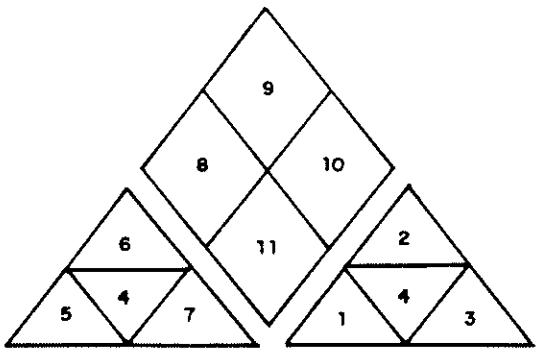


TABELA 07 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (Continuação)

AQUÍFERO MISSÃO VELHA

AMOSTRA	FONTE	ALCALINIDADE TOTAL	DUREZA $CaCO_3$ mg/l	STD mg/l (mg/l)	RESÍD. SECO	COND.ELÉT (uS/cm) a 25°C	pH LAB.	CLASS. PIPER	POTABILID. SCHOELLER & BERKALOFF	ÍNDICE DE SATURAÇÃO LANGELIER VALOR	LANGELIER CARÁTER	RYZNAR VALOR	RYZNAR CARÁTER	SAR	CLASSIFICAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO CLASSE	RISCO DE SODIO	RISCO DE POTAB.
01	P	140	68	234	147	294	7,00	08	Boa	-0,8	C	8,8	C	0,9	C_2-S_1	Baixo	Médio
02	P	114	76	207	127	255	6,76	08	Boa	-1,1	C	9,1	M C	0,7	C_2-S_1	Baixo	Médio
03	P	86	54	156	96	193	6,68	08	Boa	-1,5	C	9,7	M C	0,4	C_1-S_1	Baixo	Médio
04	P	45	10	90	20	218	7,26	08	Boa	-1,8	C	11,0	M C	0,5	C_1-S_1	Baixo	Baixo
05	P	31	18	85	100	201	7,80	09	Boa	-1,2	C	10,3	M C	0,4	C_1-S_1	Baixo	Baixo
06	P	60	22	100	80	260	7,40	08	Boa	-1,2	C	9,9	M C	0,1	C_2-S_1	Baixo	Médio
07	P	118	60	204	150	241	8,08	08	Boa	-0,0	I	7,9	C	0,9	C_1-S_1	Baixo	Baixo
08	P	92	60	147	168	235	7,70	08	Boa	-0,3	C	8,5	C	0,3	C_1-S_1	Baixo	Baixo

LEGENDA: C = Corrosiva; M C = Muito Corrosiva; I = Incrustante; P I = Pouco Incrustante.

TABELA 07 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (Continuação)
AQUÍFERO DUNAS

AMOSTRA	FONTE	ALCALINIDADE TOTAL	DUREZA $CaCO_3$ mg/l	STD mg/l	RESÍD. SECO (mg/l)	COND. ELÉT. (uS/cm) a 25°C	pH LAB.	CLASS. PIPER	POTABILID. SCHOELLER & BERKALOFF	ÍNDICE DE SATURAÇÃO LANGELIER VALOR	LANGELIER CARÁTER	RYZNAR VALOR	RYZNAR CARÁTER	SAR	CLASSIFICAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO CLASSE	RISCO DE SODIO	RISCO DE POTAB.
01	P	28	54	563	545	630	6,24	10	Passável	-2,6	C	11,5	M C	4,1	C_2-S_1	Baixo	Médio
02	P	8	6	86	110	280	5,42	10	Boa	-4,6	C	14,7	M C	2,0	C_2-S_1	Baixo	Médio
03	P	82	36	209	200	460	6,74	10	Boa	-1,6	C	10,0	M C	1,8	C_2-S_1	Baixo	Médio
04	P	78	14	318	290	600	6,81	10	Boa	-2,0	C	10,9	M C	4,7	C_2-S_1	Baixo	Médio
05	P	70	48	332	371	519	6,72	10	Boa	-1,6	C	10,1	M C	3,7	C_2-S_1	Baixo	Médio
06	P	134	80	209	135	271	7,65	08	Boa	-0,1	C	8,0	C	0,4	C_2-S_1	Baixo	Médio
07	P	130	80	205	124	248	7,83	08	Boa	-0,0	C	7,9	C	0,4	C_1-S_1	Baixo	Baixo
08	P	150	80	233	144	288	7,56	08	Boa	-0,2	C	8,05	C	0,4	C_2-S_1	Baixo	Médio
09	P	100	60	152	96	192	7,91	08	Boa	-0,1	C	8,2	C	0,2	C_1-S_1	Baixo	Baixo
10	P	114	50	183	107	215	7,87	08	Boa	-0,2	C	8,3	C	0,5	C_1-S_1	Baixo	Baixo

LEGENDA: C = Corrosiva; M C = Muito Corrosiva; I = Incrustante; P I = Pouco Incrustante;

TABELA 07 CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS E CLASSIFICAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA (Continuação)

AQUÍFERO SERRA GRANDE

AMOSTRA	FONTE	ALCALINIDADE TOTAL	DUREZA $CaCO_3$ mg/l	STD mg/l	RESÍD. SECO (mg/l)	COND. ELÉT. (uS/cm) a 25°C	pH LAB.	CLASS. IPIPER	POTABILID. SCHOELLER & BERKALOFF	ÍNDICE DE SATURAÇÃO LANGELIER VALOR	LANGELIER CARÁTER	RYZNAR VALOR	RYZNAR CARÁTER	SAR	CLASSIFICAÇÃO PARA IRRIGAÇÃO CLASSE	RISCO DE SÓDIO	RISCO DE POTAB.
01	P	105	10	168	80	200	7,42	11	Boa	-1,3	C	10,21	M C	2,5	C_1-S_1	Baixo	Baixo
02	P	46	8	87	65	170	7,32	11	Boa	-1,8	C	11,11	M C	2,1	C_1-S_1	Baixo	Baixo
03	P	63	10	109	70	210	7,40	11	Boa	-1,5	C	10,61	M C	1,8	C_1-S_1	Baixo	Baixo

AQUÍFERO BARREIRAS/CRISTALINO

01	P	35	20	131	144	300	6,97	10	Boa	-1,9	C	10,9	M C	1,7	C_2-S_1	Baixo	Médio
02	P	116	58	590	518	1037	7,86	10	Passável	-0,3	C	8,6	C	5,6	C_3-S_2	Médio	Alto
03	P	148	114	727	645	1296	7,85	10	Passável	-0,0	C	7,9	C	4,1	C_3-S_1	Baixo	Alto

AQUÍFERO MAURITI/CARIRI

01	P	170	24	394	340	750	7,98	11	Boa	-0,3	C	8,7	C	8,0	C_2-S_2	Médio	Médio
02	P	260	150	491	427	1000	8,21	08	Boa	-0,7	I	6,6	P I ou C	1,3	C_3-S_1	Baixo	Alto

LEGENDA: C = Corrosiva; M C = Muito Corrosiva; I = Incrustante; P I = Pouco Incrustante

7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos nesta pesquisa revelam que em vários sistemas é necessário fazer a remoção do ferro para deixá-lo dentro dos padrões de potabilidade; desenvolver uma campanha de manutenção periódica nos poços para controlar o crescimento de ferro-bactérias; corrigir o pH da água de quase todos os poços da amostra.

O ferro dissolvido na água subterrânea é encontrado no estado de Fe^{2+}. Teores de até 39mg/l de ferro foram encontrados na água subterrânea da aluvião do Rio Jaguaribe, associado, geralmente, a ocorrência de ferro-bactérias.

A complexidade que envolve um tratamento para controle de ferro-bactéria enseja uma série de tentativas, já que cada caso pode suscitar um tratamento diferente do outro.

O diagnóstico preliminar do nível de poluição, embasado na análise da água, nas características dos poços e das condições hidrogeológicas, é decisivo para a escolha do método de tratamento a ser aplicado.

Hipoclorito de sódio, ácido hipocloro e polifosfatos foram usados aqui no Ceará, e em todos os casos as ferro-bactérias retornaram após ter cessado a aplicação, num período de 90 dias e houve casos de menos de 60 dias.

A correção do pH através de produtos químicos, parece exercer alguma influência na redução do crescimento das ferro-bactérias. É necessário porém um investigação mais sistematizada.

Dosagens elevadas de compostos de cloro, hipoclorito de sódio com o hexametafosfato de sódio podem ser usados com bons resultados, desde que haja regularidade nas aplicações. Geralmente, a segunda aplicação pode ser feita com dois ou três meses após a primeira, considerando sempre o resultado das análises da água.

O custo real do tratamento executado através de produtos

químicos, bem como o desgaste dos equipamentos de bombeamento e a reconstrução de novos poços, em alguns casos, não foi avaliado.

Recomenda-se para tratamento com compostos de cloro, a aplicação contínua de dosagens de baixa concentração (tipo um dosador de nível constante) por um período prolongado de 6 meses com análises periódicas durante e após a aplicação. O controle das análises da água definirá a periodicidade das aplicações.

O método de pasteurização (físico) foi proposto, mas não executado, para os poços de Tabuleiro do Norte. Consiste no uso de uma fonte permanente de calor, com temperatura média de 50°C.

O nível de poluição, vazão, profundidade, determinarão o tempo necessário para o aquecimento diário da água do poço. Amostras de água deverão ser analisadas diariamente. Esse método é considerado, atualmente, um dos mais eficazes no combate à poluição de poços por ferro-bactérias, com a vantagem de não danificar as partes metálicas dos poços. O custo de energia elétrica do sistema deverá ser avaliado.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, M.J. & MORRISON, S.M. - Bacterial movement through fractured bedrock. Ground Water, 11(2):6-10, USA, 1973.

ALLER, L. and LEHR, J.H. - Iron bacteria: not unlike the common cold. Water Well Journal, Feb.:4-5, USA.,1987.

ARMSTRONG, W.B. - Redox potecial measurements as an indication of biochemical well plugging; Ground Water, 16(6): 446-447, USA, 1978.

BAAS BECKING, L.G.M., KAPLAN, J.R. & MOORE, D. - Limits of the natural environment in terms of pH ans oxidation-reduction potencials. Journal of Geology, 68(3): 243-284, USA, 1960.

BACK, W. - Early concepts of the role of microorganisms in hidrogeology. Ground Water, 27(5): 618-622, USA, 1989.

BARBIC, F.F. et all. - Iron and manganese bacteria in ranny wells. The Journal of International Association on Water Pollution Research, 8(11): 895-898, USA, 1974.

BARROS, M.E.C., RAWLINGS, D.E. & WOODS, D.R. - Production and regeneration of *Thiobacillus ferrooxidans sphaeroplasts*. Applied and Environmental Microbiology, 5(3): 721-723, USA, 1985.

BASTIN, E.S. - The Presence of sulphate-reducing bacteria in oil- field waters. Science, 63:21-24, USA, 1926.

BERGEY'S MANUAL OF DETERMINATIVE BACTERIOLOGY - 8th edition; R.E. Buchanan & Gibbons, editors. The Williams and Wilkins Company, 1628p., Baltimore, USA., 1974.

BODO, C. & LUNDGREN, D.G. - Iron oxidation by cell envelops of *Thiobacillus ferrooxidans*. Can J. Microbiology, 20: 1647-1652, USA, 1974.

CLARKE, F.E. - Corrosion ans encrustation in water well. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 95p., Rome, 1980

COMPANHIA DE SANEAMENTO DE MINAS GERAIS (COPASA). A ocorrência de ferro-bactéria em poços profundos. Relatório Final, 147p. (inédito), Belo Horizonte, 1988.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) - Normalização técnica L5-207. Contagem de colônias de bactérias que precipitam o ferro. São Paulo, 11p., 1978.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB) - Guia de coleta e preservação de amostras de água. 1 ed. São paulo, 150p.,1988.

CUSTÓDIO, E. & LLAMAS , M.R. - Hidrologia subterrânea. Ediciones Omega, (I e II):2359p.,Barcelona, 1983.

DRISCOL, F.G. - Groundwater and wells. Second edition. Published by Johnson Division., USA, 1987.

FENZL, N. - Introdução à hidrogeologia. Universidade Federal do Pará. Belém, 188p., 1988.

FRACALOSSI JUNIOR, M. - Aspectos hidrogeológicos da Bacia do Araripe e aquíferos Missão Velha e Mauriti. Anais do 4° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas; 159-170, Brasília, 1984.

FREIRE, A.O., CARVALHO, C.T. de & LAMAS, F.D. - A problemática das ferro-bactérias nas águas subterrâneas. Pesquisa, ocorrência e algumas soluções práticas. Anais do 4° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas; 455-466, Brasília, 1986.

GHIORSE, W.C. - Biology of iron and manganese depositing bacteria. Annual Review Microbiology, 38: 515-550, USA, 1984.

GRAINGE, J.W. & LUND, E. - Quick culturing and control of iron bacteria. Journal American Water Works Association, 61.(5): 242- 245, USA, 1969.

GRAVES, B.J. - Corrosion and incrustation. Water Well Journal. USA, 1985.

GRIME, M.E. - Problems with iron in deep well supplies. Journal American Water Works Association. 11(37):1173-1178, USA, 1945.

GUREVICH, M.S. - The role of microorganisms in producing the chemical composition of ground water. Geological Activity of Microorganisms. Translation of the Institute of Microbiology. No.IX: 65-75, USA, 1962.

HACKETT, G. & LEHR, J.H. - Iron bacteria occurrence, problems and control methods in water wells. Published by National Water Well Association, 79p.,USA, 1985.

HALLBERG, R.O. & MARTINELL, R. - Vyredox - in situ purification of ground water. Ground Water, 14(2):88-93, USA, 1976.

HARDER, E.C. & CHAMBERLIN, R.T. - The geology of central Minas Gerais, Brazil. Journal of Geology, 23:341-378, USA, 1915.

HARDER, E.C. - Iron-depositing bacteria and their geology relations. U.S. Geological Survey Professional Paper. 113, 88p. USA, 1919.

HASSELBARTH, U. & LUDEMANN, D. - Biological incrustation of wells due to mass development of iron and manganese bacteria. Water Treatment and Examination, 21(1): 20-29, USA, 1972.

HEM, J.D. & CROPPER, W.H. - Survey of ferrous-ferric chemical equilibria and redox potencials. U.S. Geological Survey Water Supply. 1459, 31p., USA, 1959.

HEM, J.D. - Restraints on dissolved ferrous-iron imposed by bicarbonate redox potencial and pH. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 1459-B: 32-55, USA, 1960.

HEM, J.D. - Stability field diagrams as aids in iron chemistry studies. J.Ame. Water Works Association, 53(2): 211-228, USA, 1961a.

HEM, J.D. - Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. U.S. Geological Survey Water- Supply Paper, 2254: 263p., USA, 1985.

JAMES, H.L. - Chemistry of the iron-rich sedimentary rocks. Data of Geochemistry. U.S. Geological Survey Prof. Paper. 440-W, Chapter W, 1966: 47-60 In: Geochemistry of iron. Benchmark Papers in Geology; 18, USA, 1975.

KRAUSKOPF, K.B. - Introdução à geoquímica. Editora da USP, V.1-2, São

Paulo, 605p., 1972.

KUCERAS, S. & WOLFE, R.S. - A selective enrichment method for *Gallionella ferruginea*. Journal of Bacteriology. 74(3): p.344- 349. USA, 1957.

MACIEL FILHO, C.L. - Estudo do processo geoquímico de obstrução de filtro de barragens. 136p. (Doutorado - Instituto de Geociências/USP), São Paulo, 1982.

MAOGONG, F. - The applications of vyredox method regarding iron removal from ground water in China. Ground Water, 26(5): 647-648, USA, 1988.

MATTHESS, G. - The properties of groundwater. 1ed., John Viley & Sons., 406p., USA, 1982.

MACNABB, J.F. & DUNLAP, W.J. - Subsurface biological activity in relation to ground-water pollution. Ground Water, 13: 33-44, USA, 1975.

OBORN, T.E. 7 HEM, J.D. - Microbiologic factors in the solution and transport of iron. Geological Survey Water-Supply Paper. 1459-H: 213-235, USA, 1961.

PELCZAR, M.; REID & CHAN, E.C.S. - Microbiologia. McGraw Hill do Brasil. V.1., 566p., 1980.

PIUCI, J.. - Hidrogeologia da área piloto de Ponta de Pedras - Ilha de Marajó, (Tese de Mestrado, Universidade Federal do Pará), Belém, 143p., 1978.

PRINGSHEIM, E.G. - Iron Bacteria - Biological Reviews of the Cambridge e Philosophical Society, 24: 200-245, USA, 1949.

RANKAMA, F. & SAHAMA, T.G. - Geochemistry. The University of Chicago, 912p., USA, 1950.

REBOUÇAS,A.C. & MENEZES, M.A.S. - Ground water a vital resource in Brazil - 28th International Geological Survey Congress. Simposyum E 12 - Geological Environment and Human Health, Washington D.C., USA, 1988.

ROGERS, G.S. - Chemical relations of the oil-field waters in San Joaquin,

Valley California. U.S. Geological Survey Bulletin, 653: 93-99, USA, 1917.

SIQUEIRA, C.L.A. & MENEZES, M.A.S. - Pesquisa e aproveitamento de água subterrânea para abastecimento urbano nas dunas costeiras do Ceará. Anais de 2° Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, p.29-42, Salvador, 1982.

SMITH, S. - Chemical control of iron bacteria. Water Well Journal: 69-70, USA, 1981a.

SMITH, S. - Physical control of iron bacteria. Water Well Journal: 60-62, USA, USA, 1981b.

SMITH, S. - Culture methods for the enumeration of iron bacteria from water samples - a critical literature review. Ground Water, 20(4): 482-485, USA, 1982.

SMITH, S. - Iron bacteria problems in wells: a new look. Water Well Journal, 37(1): 76-78, USA, 1984a.

SMITH, S. & TUOVINEN, O.H. - Environment analysis of iron- precipitating bacteria in ground water and wells. Water Well Journal, 39(4): 45-52, USA, 1985.

SOUZA, M.F. - Aproveitamento dos aquíferos aluvionares, conceitos e metodologias básicas. Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba (inédito), 86p. Campina Grande, 1986.

STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER. 16th ed. American Public Health Association, USA, 1985.

STARKEY, R.L. - Transformations of iron by bacteria in water. Journal of the American Water Works Association, 37(10): 963-984, USA, 1945.

STOTT, G.A. - The "tenacious" iron bacteria. The Johnson Driller's Journal, 45(4): 4-6, USA, 1973.

STUMM, W. MORGAN, J.J. - Aquatic chemistry. Wiley Interscience, 2nd ed ., USA, 1981.

SWANSON, G.L. - Treating hidrogen sifide and irn bacteria. Water Well

Journal, 50-52, USA, 1987.

VALKENBURG, NICHOLAS, CHRISTIAN & GREEN, M. - Occurrence of iron bacteria in ground-water supplies of Alabama. Geological Survey of Alabama Circular, 96:45p. USA, 1975.

WALSH, F. & MITCHELL, R. - A ph-dependent sucession of iron bacteria. Environmental Science and Technology, 6(9): 809-812, USA, 1972.

VANVEEN, W.L.; MULDER, E.G. & DEINEMA, M. - The Sphaerotilus-Leptothrix group of bacteria. Microbiological Reviews, 42(2): 329-356, USA, 1978.

VOLFE, R.S. - Cultivation, morphology and classification of iron bacteria. Journal American Water Works Association, 50(9): 1241 - 1249, USA, 1958.

WALTON, W.C. - Groundwater resource evaluation. McgrowHill, 664p., USA, 1970.

YAKHONTOVA, L.K. & KARAVAIKO, G.I. - The geochemical activity of microorganisms in the supergene zone of ore deposits. Mikrobiologiya, 32(1): 35-43, Russian, 1977.

YOSHINAGA, S. - Estudos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas minerais e termais de Águas de Lindóia e Lindóia, SP ., 116p. (Dissertação de Mestrado - Instituto de Geociências/USP), São Paulo, 1990.

ZOBELL, E. - Bacterial life at the bottom of the Phillippine Trench. Science, 63: 507-508, USA, 1952.