

EVOLUÇÃO DA SALINIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO AQUÍFERO MAURITI – BACIA SEDIMENTAR DO ARARIPE

Carlos José Freire Machado¹; Maria Marlúcia Freitas Santiago²; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça²; Horst Frischkorn³ & Josué Mendes Filho²

Resumo - Este estudo teve por objetivo traçar a evolução hidroquímica das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Araripe, situada no extremo sul do Estado do Ceará, a partir de duas amostras de água, uma de água “inicial”, no início da evolução hidroquímica, e a outra de água “final”, já evoluída. A água inicial é suposta passar, ao longo de uma trajetória de fluxo, através das formações geológicas da bacia, que possuem uma mineralogia específica e característica da região. Ao longo deste fluxo, esta água sofre processos geoquímicos de modo a chegar à composição química da água “final” que deve, portanto, representar sua história evolucionária. Utilizamos nesta simulação o aplicativo Netpath, que é um código interativo para modelar reações geoquímicas ao longo de uma trajetória de fluxo utilizando, para este objetivo, os dados conhecidos da geologia, mineralogia e petrologia da região, assim como resultados da análises químicas da água situada nos aquíferos.

Abstract – This study has the objective to trace the hydrochemical evolution of the groundwater of the Sedimentary Basin of Araripe – in the southeast of the State of Ceará. Two water samples, one considered as initial water, at the start of the hydrochemical evolution, and the other one, the final water, with evolution completed. The initial water is supposed to travel in a flow path through the geological formations of the Basin, which have a specific and characteristic mineralogy. On its way, this water suffers geochemical processes that change its chemical composition from the initial to the final one. That way, the final water represents its evolutionary history. We use in this simulation of the chemical evolution the mathematical model Netpath, an interactive code to model geochemical reations along a flow path. The simulation is based on the local geology, mineralogy and petrology and on the chemical analysis of the “initial” and the “final” water.

Palavras-chave – Netpath; hidrogeoquímica; Chapada do Araripe

¹ Departamento de Física da UFC, Tel.: (0xx85)288.9913, Fax: (0xx85)288.9450, e-mail: machado@fisica.ufc.br e Universidade Federal do Pará, Campus de Santarém.

² Departamento de Física da UFC, Tel.: (0xx85)288.9913, Fax: (0xx85)288.9450, e-mail: marlucia@fisica.ufc.br.

³ Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, Caixa Postal 6018, CEP 60451-970, Fortaleza, CE, Tel.: (0xx85)288.9775, Fax: (0xx85)288.9627, e-mail: cariri@ufc.br.

INTRODUÇÃO

A abundância de recursos hídricos subterrâneos e de solos de boa qualidade na região do Cariri, sul do Estado do Ceará, é propícia ao desenvolvimento de agroindústrias. Por este motivo, o governo estadual, através da Secretaria de Irrigação, está implantando, no município de Mauriti, um pólo de fruticultura tropical. Corroborando com este esforço de desenvolvimento está a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), que tem interesse em aumentar o conhecimento da área, visando a implantação de um sistema de monitoramento qualitativo e quantitativo das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar do Araripe.

No sentido de complementar o conhecimento dos recursos hídricos regionais é que procuramos compreender a formação química da água subterrânea da bacia, utilizando todos os conhecimentos geológicos, petrográficos e mineralógicos produzidos na área, assim como análises químicas de diferentes conjuntos de águas, para tentar traçar seu processo evolutivo hidroquímico através das formações geológicas. Para este fim utilizamos o programa Netpath [1], que é um código interativo de análise de balanço de massa. Acreditamos, assim, estar contribuindo para o estudo da qualidade da água na bacia, bem como para o conhecimento do percurso do fluxo através das diferentes composições geológicas.

ÁREA DE TRABALHO

A Bacia Sedimentar do Araripe é compartilhada pelos Estados do Ceará, Pernambuco e Piauí e é constituída por um vasto planalto, a Chapada do Araripe, e por planícies que circundam a chapada com desníveis que chegam a 400m. Nesta região, os recursos hídricos subterrâneos são a mais importante fonte de água potável para abastecimento público e privado, bem como para diversas atividades, tais como práticas agrícolas, industriais e lazer.

Para os fins práticos da hidrogeologia, divide-se a Bacia Sedimentar do Araripe [2] em três sistemas aquíferos, de cima para baixo, juntando formações geológicas (Figura 1) em “pacotes” de comportamento hidráulico semelhante:

- Sistema Aquífero Superior, que consiste das Formações Exu (com condutividade hidráulica $k = 3.10^{-5}$ m/s) e Arajara ($k = 1.10^{-6}$ m/s), na chapada.
- Sistema Aquífero Médio, separado do sistema anterior pelo aquíclode Santana ($k = 10^{-10}$ m/s), junta as Formações Rio da Batateira, Abaiara e Missão Velha ($k = 5.10^{-5}$ m/s) do Vale do Cariri.
- Sistema Aquífero Inferior, separado do anterior pelo aquíclode Brejo Santo, é formado pela Formação Mauriti ($k = 4.10^{-6}$ m/s) e a parte basal da Formação Brejo Santo.

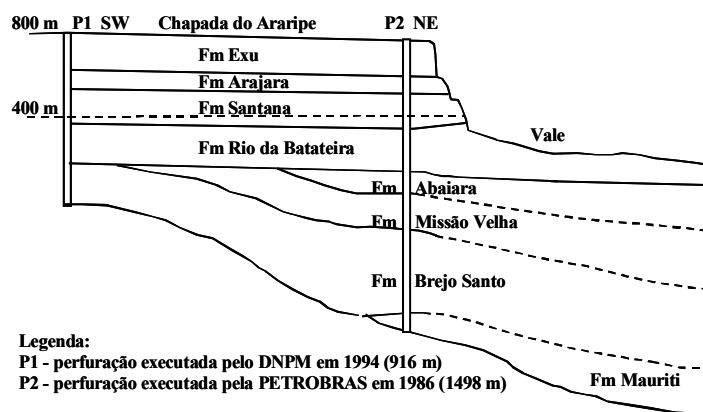


Figura 1 - Esboço esquemático das formações geológicas da bacia sedimentar do Araripe

As fraturas geológicas (Figura 2) existentes na área da Bacia Sedimentar do Araripe induzem conexões hidráulicas entre aquíferos, produzindo um fluxo regional. Este fluxo de água subterrânea na Chapada do Araripe acontece a partir de seu topo – Formação Exu – para a base da bacia sedimentar e em direção ao vale, de modo que no centro da bacia e em sua parte inferior, em contato com o embasamento cristalino, a água da formação Mauriti deve ser um produto evolucionário da história desta água ao passar por todas as outras formações.

O sistema aquífero superior é constituído basicamente por arenitos, de modo que as formações aflorantes devem apresentar uma baixa dissolução de sais – baixa condutividade elétrica – e uma relativamente alta concentração de bicarbonatos, oriundos do contato do aquífero com o gás carbônico do subsolo, já que constitui um aquífero livre.

Todas as três formações aquíferas são constituídas (3) principalmente de arenitos, destacando-se, com aproximadamente 99% de quartzo, as formações Exu, Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti, que pouco contribuirão, portanto, para a formação hidroquímica da água subterrânea da bacia. Já as formações Arajara, no aquífero superior, e Abaiara, no aquífero médio, são constituídas em parte por argilitos e siltitos, que possivelmente poderão contribuir no processo de troca iônica.

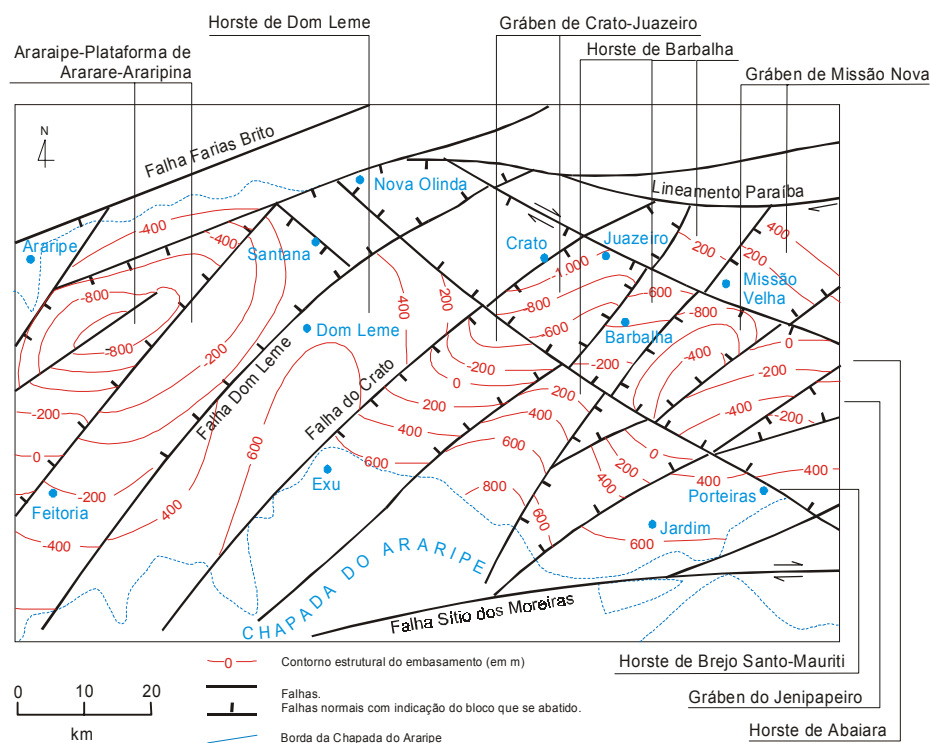


Figura 2: Mapa estrutural da área [4].

Já o aquíclode Santana [5] é formado principalmente por calcários (calcita: CaCO_3) e evaporitos compostos de sulfato de cálcio (gipsita: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ e anidrida: CaSO_4) que são minerais que apresentam alta solubilidade, de modo que os íons destes sais atuarão como elementos traçadores da evolução hidrogeoquímica do fluxo regional da água subterrânea encontrada na base do sistema deposicional, que é a formação Mauriti.

A formação Mauriti, no Sistema Aquífero Inferior, formada no Siluriano/ Devoniano em um sistema fluvial entrelaçado e eólico, compõe a parte basal da Bacia Sedimentar do Araripe, sendo composta predominante de arenitos quartzosos e/ou feldspáticos esbranquiçados, variando de médio a conglomerático, geralmente silicificado [2], incluindo na sua base fragmentos líticos do embasamento cristalino e feldspatos bem preservados.

Esta formação aflora nas bordas da bacia sedimentar, apresentando-se como aquífero livre, é encontrada a uma profundidade de cerca de 1450 m no seu centro, de acordo com os dados do poço pioneiro 2-AP-01-CE, perfurado pela PETROBRAS no município de Araripe-CE. Ao longo da bacia sedimentar, as águas armazenadas neste aquífero apresentam diferentes composições químicas, revelando dissolução de sais como decorrência do tempo de contato da água com rocha e/ou percolação profunda através de fraturas em outros ambientes geológicos.

A área sofreu um tectonismo intenso como pode ser visto na figura 2. Este tectonismo gerou uma série de Horsts e Grabens que propiciam a interconexão entre os sistemas aquíferos através das falhas geológicas.

Com isto, vê-se que as águas que circulam no aquífero Mauriti podem passar por vários processos de dissolução, não só através do contato com a rocha que o compõe, mas também com outras formações, incluindo os aquícludes interconectados hidraulicamente pelas falhas geológicas. Desta forma, uma análise mais apurada dos processos de dissolução no aquífero Mauriti, através da modelagem química, poderá dar uma indicação da dinâmica do fluxo subterrâneo na bacia sedimentar.

METODOLOGIA

Serão analisadas as medidas das concentrações dos íons maiores, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} de amostras coletadas em poços profundos na Formação Mauriti localizados na área de recarga e em diversos pontos na área de confinamento. Durante as coletas, foram medidos também os parâmetros físico-químicos temperatura, pH e condutividade elétrica.

Para simular computacionalmente e interpretar as reações geoquímicas líquidas de balanço de massa entre uma água inicial e os minerais ao longo do fluxo, utilizamos o código Netpath [1], que é disponibilizado gratuitamente na Word Wide Web pela Agência Norte Americana para Pesquisa Geológica (USGS)⁴. Este programa utiliza um conjunto de fases minerais ou gasosas que são hipoteticamente as fases reativas no sistema, de maneira que o código calcula a transferência de massa em toda possível combinação das fases selecionadas que se ajustam às mudanças observadas nas composições químicas, ao longo da evolução da água.

MODELO

O modelo que propomos para a evolução hidrogeoquímica da água subterrânea do aquífero inferior, representado pela formação Mauriti, na base da Bacia Sedimentar do Araripe, cuja geologia e mineralogia foi descrita na **Área de Trabalho**, está baseado na análise química dos íons maiores: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e SO_4^{2-} . Omitimos desta discussão o íon K^+ , por ser um elemento químico que atua muito fortemente na cadeia orgânica, sendo sujeito, portanto, a processos que não consideramos no presente trabalho.

Os minerais representativos dos aquíferos e aquícludes, cujas estequiometrias básicas para o processo geoquímico estão dadas na Tabela 1, são:

A Calcita (CaCO_3), o Gesso (CaSO_4) e a Dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) estão presentes na água; os dois primeiros existentes em grandes quantidades no aquíclude Santana [6,7,2], o primeiro em menor quantidade na formação Brejo Santo. A Dolomita foi inserida aqui no sentido de fornecer ao modelo

⁴ Existem programas similares mais atualizados disponíveis para “download”, no “site” da USGS: <http://www.usgs.gov/>, como, por exemplo, o programa PHREEQC.

uma fonte de magnésio, além de cálcio e carbonato; a sua quantidade, entretanto, deve ser limitada a uma pequena fração da Calcita, de acordo com os dados da mineralogia [5].

Os sais Halita (NaCl) e Bischofita (MgCl₂), como fontes de sódio, magnésio e cloro – são justificadas aqui as suas presenças pelos processos de gênese geológica da formação Santana (membros Romualdo e Ipubi [6,7,2]), como sistemas transicionais evaporíticos marinhos rasos.

Os minerais Ilita, Palygorskita (Palygorsk) e a Montmorilonita cálcica (Ca-Mont), são silicatos que podem compor as argilas, presentes em todas as formações da Bacia Sedimentar do Araripe.

O feldspato plagioclásio (0,25(CaSi₂Al₂O₈).0,75(NaSi₃AlO₈)), como outros feldspatos, estão presentes em quase todas as formações, mesmo em pequenas proporções nos sistemas aquíferos.

Por fim, consideramos a troca iônica (Troca) do cálcio pelo sódio que ocorre nas argilas.

Tabela 1: Estequiometria básica dos minerais usados na simulação.

Minerais	Estequiometria							
Calcita	Ca	1	C	1				
Dolomita	Ca	1	Mg	1	C	2		
Gesso	Ca	1	S	1				
Troca	Ca	-1	Na	2	Mg	0		
NaCl	Na	1	Cl	1				
Ilita	K	0,6	Mg	0,25	Al	2,3	Si	3,5
Bischofita	Mg	1	Cl	2				
Ca-Mont	Ca	0,167	Al	2,33	Si	3,67		
Paligorsk	Mg	2	Si	3				
Plagioc25	Ca	0,25	Al	1,25	Si	2,75	Na	0,75

Devido a falta de dados mais precisos da mineralogia da Bacia Sedimentar do Araripe, consideramos, de uma só vez, todos os minerais e a troca iônica no código Netpath, cujas estequiometrias básicas estão dadas na Tabela 1. Os elementos químicos são os íons maiores: Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, HCO₃⁻ e SO₄²⁻; com exceção do K⁺, pelos motivos já mencionados.

Os resultados dos processos geoquímicos atuantes nos minerais (chamados fases), expressos pelo código Netpath, sempre são em número igual a dos elementos químicos envolvidos (chamados vínculos), de maneira a resolver as equações de balanço de massa.

A inserção de todos os minerais descritos anteriormente gera um número de soluções maior que uma. Se estas soluções válidas forem factíveis às vistas do problema, então uma combinação linear destas soluções também é uma possível solução. O “grande” número de fases usadas para modelar geoquimicamente as águas do aquífero inferior se deve ao fato de tratarmos da evolução

desta água através de um grande número de formações das quais, por outro lado, se tem pouca informação mineralógica, além do que a maioria destas informações são qualitativas.

Utilizamos águas de dois poços que consideramos representativos; um de água “inicial”, i.e., águas de um aquífero livre com formação mineralógica caracterizada pela presença predominante de arenitos e exposto à relativamente alta pressão do gás carbônico do subsolo ; o outro poço localizado estratigraficamente no aquífero inferior, representando a água “final”, Tabela 2.

Tabela 2: Amostras d'água inicial e final, utilizadas na simulação.

Poço	Denominação	T (°C)	pH	mmol/L					
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	S	C
Inicial	P. Café Linha – Ab	29,7	5,3	0,10	0,099	0,18	0,40	0,085	2,48
Final	Abaiara, 1-Ab	31,7	7,4	1,38	1,00	1,02	0,80	0,47	4,11

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Na simulação computacional feita com o auxílio do código Netpath, encontramos 70 modelos, dos quais 15 satisfizeram as reações de balanço de massa geoquímico líquido, requeridas para ajustar as análises químicas das águas. Os modelos gerados pelo aplicativo estão listados na Tabela 3.

Naqueles resultados em que uma das fases é a Dolomita (Modelos-5, 6, 7, 10, 13, 14 e 15) a quantidade dissolvida deste mineral é muito superior àquela esperada, haja vista que, na formação Santana [5], as quantidades percentuais em massa, de óxido de magnésio (MgO) é de 1,78% e de óxido de cálcio (CaO) de 42,19%, levam a uma razão entre as quantidades de matéria de: Mg:Ca::1:17. Todos estes sete modelos serão, desta forma, descartados como irreais.

Os modelos M-1 e M-2 são semelhantes entre si, com a única diferença de que a argila Ilita é trocada pela Palygorsquita. O fato da Ilita dissolver numa quantidade oito vezes maior que a Palygorsquita se deve ao fato da quantidade de magnésio na primeira ser exatamente oito vezes menor que na segunda. A mesma interpretação é válida para os pares de modelos: M-3 e M-4; M-8 e M-9; e M-11 e M-12.

Todos os modelos válidos dissolvem a mesma quantidade de gesso (0,39 mmol/L) porque este mineral é a única fonte de enxofre, de modo a balancear a quantidade de sulfatos presentes nas análises químicas das amostras d'água inicial e final. Assim, tendo sido excluída a Dolomita, a única fonte de carbono presente nos carbonatos, passa a ser a Calcita, de modo que a quantidade deste mineral dissolvido é a mesma (1,63 mmol/L) em todos os modelos.

Em todos os modelos com troca iônica, existe um processo alternativo que é a dissolução do feldspato Plagioclásio, com a única diferença de haver uma maior precipitação da Montmorilonita

cálcica na dissolução do plagioclásio. Assim funcionam os modelos: M-1 e M-3; M-2 e M-4; M-8 e M-11; M-9 e M-12.

Os quatro primeiros modelos dissolvem o sal Halita: M-1, M-2, M-3 e M-4; enquanto os modelos: M-8, M-9, M-11, e M-12, dissolvem o sal Bischofita.

Na falta de dados mais representativos e precisos, não temos nenhuma razão para atribuir maior importância a qualquer um dos modelos: M-1, M-2, M-3, M-4, M-8, M-9, M-11, e M-12, de modo que uma combinação linear destes pode representar uma melhor aproximação do que acontece na evolução hidrogeoquímica da água subterrânea na Bacia Sedimentar do Araripe.

Finalmente, é importante observar que o índice de saturação da calcita na água final é igual a $-0,01$, próxima do equilíbrio, o que indica um possível processo de deposição de calcita no aquífero Mauriti. Este processo é compatível com uma grande dissolução de carbonatos, que deve acontecer quando a água subterrânea, em sua trajetória rumo à base da bacia, passa pelo aquíclode Santana através das fraturas.

CONCLUSÃO

A evolução química de uma água ao passar através de formações geológicas é certamente um processo muito complexo que exige, além de uma análise química precisa das águas em estudo, de um conhecimento profundo (porém quase sempre incompleto e insipiente) da geologia, petrologia e mineralogia por onde passa a trajetória de fluxo desta água subterrânea.

O processo evolucionário estudado implica na passagem desta água por todo um conjunto de formações geológicas (aquíferos e aquíclodes – através de fraturas) da Bacia Sedimentar do Araripe, de modo que os resultados encontrados representam uma aproximação dos processos que realmente ocorrem.

Um trabalho complementar seria estudar a evolução hidrogeoquímica através das várias formações adjacentes da bacia, que poderia fornecer dados mais precisos sobre cada formação e tornar mais realista o processo químico evolucionário deste complexo sistema hídrico que é a Formação Mauriti.

Tabela 3: Modelos fornecidos pelo aplicativo Netpath. Unidades em mmol/L.

MODELO 1		MODELO 2		MODELO 3	
Calcita	1,63	Calcita	1,63	Calcita	1,63
Gesso	0,39	Gesso	0,39	Gesso	0,39
NaCl	0,40	NaCl	0,40	NaCl	0,40
Ca-Mont	-3,12	Ca-Mont	-3,12	Ca-Mont	-5,31
Troca	0,22	Troca	0,22	Plagioc25	0,59
Ilita	3,60	Paligorsk	0,45	Ilita	3,60
MODELO 4		MODELO 5		MODELO 6	
Calcita	1,63	Calcita	0,58	Calcita	0,58
Gesso	0,39	Gesso	0,39	Gesso	0,39
NaCl	0,40	NaCl	0,40	NaCl	0,40
Ca-Mont	-5,31	Troca	0,22	Troca	0,22
Plagioc25	0,59	Dolomita	0,52	Dolomita	0,52
Paligorsk	0,45	Ilita	1,52	Paligorsk	0,19
MODELO 7		MODELO 8		MODELO 9	
Calcita	0,22	Calcita	1,63	Calcita	1,63
Gesso	0,39	Gesso	0,39	Gesso	0,39
Bischofi	0,20	Bischofi	0,20	Bischofi	0,20
Ca-Mont	2,28	Ca-Mont	-1,92	Ca-Mont	-1,92
Troca	0,42	Troca	0,42	Troca	0,42
Dolomita	0,70	Ilita	2,80	Paligorsk	0,35
MODELO 10		MODELO 11		MODELO 12	
Calcita	0,22	Calcita	1,63	Calcita	1,63
Gesso	0,39	Gesso	0,39	Gesso	0,39
Bischofi	0,20	Bischofi	0,20	Bischofi	0,20
Ca-Mont	-1,91	Ca-Mont	-6,11	Ca-Mont	-6,11
Plagioc25	1,12	Plagioc25	1,12	Plagioc25	1,12
Dolomita	0,70	Ilita	2,80	Paligorsk	0,35
MODELO 13		MODELO 14		MODELO 15	
Calcita	0,22	Calcita	0,99	Calcita	0,99
Gesso	0,39	Gesso	0,39	Gesso	0,39
Bischofi	0,20	Bischofi	0,20	Bischofi	0,20
Troca	0,19	Troca	0,42	Troca	0,42
Plagioc25	0,61	Dolomita	0,32	Dolomita	0,32
Dolomita	0,70	Ilita	1,52	Paligorsk	0,19

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a COGERH (nas pessoas de Yarley de Brito e Walber Cordeiro) o apoio logístico e a FUNCAP, o apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. PLUMMER, L.N.; PRESTEMON, E.C.; PARKHURST, D.L, “An interactive code (NETPATH) for modeling NET geochemical reactions along a flow PATH”, version 2.0. U.S. Geological Survey, Water- Resources Investigations, 1994. report 94-4169, 130 p.
2. DNPM, “Projeto avaliação hidrogeológica da Bacia Sedimentar do Araripe”. Recife: DNPM, 1996. 103p.
3. JACOMINE, P. K. T.; ALMEIDA, J. C.; MEDEIROS, L. A. R., “Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado do Ceará. **Boletim Técnico, 28 – convênio MA/DNPEA – SUDENE/DRN**. Recife: 1973b. 2v. 756p.
4. GOLDBER/PIVOT, “Implantação do sistema de monitoramento/gestão de uma área piloto do aquífero Missão Velha na Bacia Sedimentar do Cariri”. In: RELATÓRIO MENSAL DE ANDAMENTO DE SERVIÇOS Nº 2. Fortaleza: SRH (Secretária de Recursos Hídricos), 2001.
5. RIBEIRO, J. A.; VERRÍSSIMO, L. S.; MEDEIROS, M. F.; **Projeto AMCARI: avaliação ambiental da região do Cariri – diagnóstico mineral da região do Cariri**. Fortaleza: CPRM, 1996, v.7, 68p. (Série Recursos Minerais).
6. ASSINE, M., “Análise Estratigráfica da bacia do Araripe, Nordeste do Brasil”, **Revista brasileira de geociência, Curitiba**, v.22, p.289-300, set. 1992.
7. BRITO, I. M.; “Breve histórico sobre a estratigrafia da Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil”. In: SIMPÓSIO SOBRE A BACIA DO ARARIPE E BACIAS INTERIORES DO NORDESTE, 1., 1990, Crato: URCA, 1990.