

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA, AVALIAÇÃO DA QUALIDADE E DA RECARGA EM AQÜÍFEROS DO SEMI-ARIDO ASSOCIADOS À MINERAÇÃO DE URÂNIO (CAETITÉ, BA)

F. Fernando Lamago Simões Filho¹; Horst Monken Fernandes¹; Robson Rodger Santos¹, Liliâne Ferreira da Silva¹; Ramon Aravena²; Maria Luiza Godoy¹; Hildebrando Apolônio Pereira Filho³

Resumo – A qualidade da água subterrânea é influenciada pela interação entre a mesma e a rocha onde o aquífero é localizado, assim como pelo tempo decorrido entre a entrada (recarga) e a saída (descarga ou evaporação) do sistema. Desta forma, sua qualidade poderá ser alterada não apenas pela ação antrópica, mas também devido à evolução do intemperismo durante o período de tempo em que esteve isolada e em contato direto com uma determinada litologia. Esse tempo depende, por sua vez, basicamente da taxa de recarga e do tipo do aquífero considerado. O domínio das rochas cristalinas, que predomina no semi-árido em associação ao clima, apresenta sistemas aquíferos do tipo fraturado que, no presente estudo de caso, constitui o principal manancial de água para a Unidade de Concentração de Urânio em Caetité e para as comunidades rurais vizinhas ao empreendimento. O processo de salinização é recorrente devido à natureza do clima, com altas taxas de evaporação e precipitação concentrada em curtos períodos, e a hidrogeologia local que configura um fluxo subterrâneo com recarga lenta. Tais características tornam as águas subterrâneas impróprias para o consumo na maior parte dos poços monitorados.

Abstract – The groundwater quality is influenced by water-rock interaction and residence time in the aquifer as well. Thus, its quality can be changed not only as an effect of human action, but also due to the weathering evolution during the water isolation time facing one given lithology. On its turn, the time depends on the recharge rate and the aquifer type. The crystalline rocks that domain the semi-arid region, associated with regional climate and fractured aquifer systems; play the role of main water resource available for Caetité's Uranium Mining and Milling plant and also for rural properties near the plant. The salination is a recurring process due to the nature of climate and local hydrogeology, which makes groundwater not proper for human consume in the majority of monitored wells.

Palavras-Chave – Qualidade da água subterrânea, recarga, semi-árido.

¹ Instituto de Radioproteção e Dosimetria (IRD/CNEN), Av Salvador Allende, s/n, RJ, tel: 3411-8092, fax: 2442-2699, flamego@ird.gov.br

² Department of Earth Sciences, University of Waterloo, 200 University Avenue West, Waterloo, Ontário, Canadá, N2L 3G1, roaraven@waterloo.ca

³ Unidade de Concentração de Urânio, Indústrias Nucleares do Brasil (URA/INB), Caetité, Bahia, Caixa.Postal 07, hapolonio@inb.gov.br

1 – INTRODUÇÃO

A região do Semi-árido nordestino caracteriza-se por uma escassez dos recursos hídricos superficiais em consequência das baixas taxas de precipitações pluviométricas. Como a ocorrência de água subterrânea depende das características geológicas e das condições climáticas, bastante variáveis no Nordeste, além do que a sua distribuição espacial se faz de maneira bem heterogênea. O domínio das rochas cristalinas, que predomina no semi-árido em associação ao clima, apresenta sistemas aquíferos do tipo fraturado que, no presente estudo de caso, constitui o principal manancial de água para a Unidade de Concentração de Urânio das Indústrias Nucleares do Brasil (URA/INB) em Caetité e para as comunidades rurais vizinhas ao empreendimento. A precipitação da região é em média 600 a 800 mm de chuva por ano, sendo que em Caetité a precipitação média anual é de 797,1 mm/ano, em São Timóteo é de 672,3 mm/ano, e em Maniaçu, de 834,7 mm/ano. As chuvas são concentradas no verão e final da primavera, principalmente nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. Nessa região o período correspondente ao inverno é o que apresenta a maior redução nos índices pluviométricos.

Nos vales dos principais cursos d'água da área, o nível d'água subterrânea é mais raso, por vezes atingindo a camada de sedimentos constituída por solo residual das rochas do embasamento, coberturas detríticas terciário-quadernárias e depósitos aluvionares. O fluxo das águas subterrâneas ocorre entre os poros do material sedimentar, e neste caso, o aquífero é de caráter livre (não confinado), já no restante da área, onde o nível d'água é mais profundo, o aquífero é formado pelas rochas gnáissicas e graníticas do Complexo Lagoa Real. Seu caráter é do tipo não confinado coberto, pois sobre as rochas do aquífero fissural existe uma camada de solo, produto da intempérie *in situ* das rochas cristalinas ou de processos sedimentares de transporte e deposição.

A composição química da rocha aquífera exerce influência sobre a composição da água subterrânea. Porém, vários fatores dificultam o estabelecimento de uma relação entre rocha e composição da água subterrânea, como a composição química da água da chuva, clima, topografia e a lixiviação de sais depositados nos solos que atingem os aquíferos por percolação. Assim, as relações estabelecidas entre rocha e água subterrânea são de êxito limitado, e sua aplicação é restringida às zonas em que foram estabelecidas (Castany, 1971). Se as águas subterrâneas circulam por diferentes litologias, sua composição química em determinado ponto no aquífero é influenciada pela litologia local, mas também pelas litologias atravessadas anteriormente e pela infiltração de água meteórica. A influência da litologia local imprime características específicas à composição química da água subterrânea, ainda que diversos fenômenos possam mascará-las. Assim, no caso da área de estudo, devido à presença de anomalias radiométricas com presença de urânio, as águas

subterrâneas apresentam naturalmente concentrações mais elevadas de radionuclídeos, que impactam diretamente a qualidade da água e, por isso, precisam ser considerados. Os objetivos deste trabalho são: i) Caracterizar a composição hidrogeoquímica da água subterrânea (incluindo radionuclídeos) do programa de monitoração ambiental da URA; ii) Avaliar a qualidade das águas subterrâneas para consumo humano e iii) Conhecer a evolução da composição química da água ao longo do fluxo subterrâneo, condicionado pela recarga do aquífero.

2 - METODOLOGIA

As amostras de água subterrânea analisadas foram extraídas de poços tubulares de abastecimento da usina e de comunidades de rurais, localizados em um raio de 15 km da mineração de urânio. As amostras coletadas foram filtradas com membranas Milipore (0,45 µm) e acidificadas com HNO₃, antes de serem levadas para análise. As determinações de urânio e demais metais foram realizadas por espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, Perkin Elmer Elan 6000) (Godoy e Godoy, 2006). As determinações de ²²⁶Ra e ²¹⁰Pb foram realizadas por métodos radioquímicos empregando-se detectores proporcionais alfa-beta de baixo background com anticoincidência, de acordo com método proposto por Godoy et al. (1994). As determinações de isótopos estáveis foram realizadas por espectrometria de massa, no laboratório de isótopos ambientais da Universidade de Waterloo, Canadá. Os anions foram determinados por técnica de cromatografia gasosa de íons em alíquotas não acidificadas.

As análises químicas e radiológicas foram efetuadas entre janeiro de 1998 e janeiro de 2006. Os parâmetros determinados foram:

- ✓ Parâmetros físico-químicos: pH, alcalinidade, condutividade e dureza;
- ✓ Dados químicos (em mg/L): Na, K, Mg, Ca, Ba, Mn, Fe, Al, SiO₂, SO₄, F, Cl, NO₃ ;
- ✓ Radioatividade (em Bq/L): U natural, ²²⁶Ra, e ²¹⁰Pb.
- ✓ Isótopos estáveis δ ¹⁸O e δ ²H em partes por mil (‰).

A organização e compilação dos dados químicos e radiológicos disponibilizados possibilitaram a criação de um banco de dados composto por 291 análises, referentes ao estudo hidroquímico das águas subterrâneas em 19 poços tubulares estudados. Entre as variáveis hidroquímicas acima listadas, para o banco de dados foram selecionados os parâmetros: pH, condutividade, Na, K, Mg, Ca, Ba, Mn, SiO₂, SO₄, F, Cl, NO₃, U natural, ²²⁶Ra e ²¹⁰Pb. De acordo com Deutsch (1997), se considerarmos que a alcalinidade de uma amostra é a soma das concentrações de substâncias carbônicas inorgânicas dissolvidas, a concentração dos íons carbonato

e bicarbonato podem ser calculados a partir dos valores de alcalinidade (expressos em partes por milhão de CaCO_3) e pH, de acordo com as seguintes expressões:

$$\text{HCO}_3^- (\text{mg} / \text{L}) = \frac{\text{Alcalinidade (ppm CaCO}_3)}{(1 + \frac{2 \times 10^{-10,3}}{10^{-\text{pH}}}) \times 50} \times 61 \quad (1)$$

$$\text{CO}_3^{-2} (\text{mg} / \text{L}) = \frac{\text{Alcalinidade (ppm CaCO}_3)}{(2 + \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-10,3}}) \times 50} \times 60 \quad (2)$$

3 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os dados químicos e radiológicos do programa de monitoração da URA, assim como as análises isotópicas da água subterrânea foram avaliadas quanto aos seguintes itens:

- ✓ Qualidade da água subterrânea,
- ✓ Hidrogeoquímica da água subterrânea,
- ✓ Recarga e evolução geoquímica dos aquíferos.

3.1 – Qualidade da água subterrânea

Como veremos muitos dos poços perfurados apresentam qualidade de água insatisfatória para o consumo humano e, até mesmo para uso na agricultura. Por outro lado, a abertura indiscriminada de poços, sem que se conheça a potencialidade do aquífero a qual o poço se correlaciona, pode causar interrupções na oferta (Simões Filho, et al. 2003). O resultado disto é a criação de conflitos de uso, especialmente quando a questão da distribuição não é equacionada de forma satisfatória. Além disso, a oferta de água a comunidades por diferentes agentes sem uma articulação entre as ações, muitas vezes produz novos conflitos. Uma situação real como esta ocorreu na área de estudo, onde a empresa de mineração local havia perfurado um poço há vários anos, cuja água foi ofertada ao distrito de Maniaçu. Todavia estas águas, em condições naturais, não são satisfatórias para o consumo humano. Assim, outro poço mais distante foi perfurado por um órgão estadual e a água canalizada até a comunidade em tela. Daí em diante, a distribuição canalizada, passou a ser de responsabilidade da prefeitura que, segundo as entrevistas colhidas no local, fez uma distribuição apenas parcial da sub-adutora até as moradias dos habitantes, deixando contingentes da comunidade sem água de boa qualidade e dependente do antigo poço. Aqueles que tiveram água canalizada passaram também a utilizar a água do antigo poço para fins menos nobres, como por exemplo, para

a lavagem de carros. Obviamente, isso criou uma tensão entre os moradores da comunidade. Vê-se, claramente, que há a necessidade de um processo de educação/conscientização aliado ao da distribuição de água.

São apresentados, abaixo, nas tabelas 1 e 2 os resultados do monitoramento de alguns poços, no período entre 1998 e 2006. A tabela 1 mostra os valores de concentrações de metais e íons (em ppm) e a tabela 2 mostra os parâmetros físico-químicos e as concentrações de atividade dos radionuclídeos presentes na água subterrânea. Os valores representam as médias enquanto entre parênteses é mostrado o desvio padrão das amostras ao longo do período da monitoração.

Geralmente os estudos de avaliação de água subterrânea são baseados na monitoração de poços, os quais podem ser usados também para o abastecimento doméstico ou industrial. Dependendo do tipo, do uso preponderante e das atividades que se desenvolvem na bacia, esses recursos são enquadrados em classes de qualidade de águas doces, descritas na resolução nº 20 do CONAMA (16/686). A legislação brasileira não possui normas específicas para enquadramento de águas subterrâneas e, por isso, neste trabalho se utilizará a classificação constante dessa resolução como parâmetro. Assim, as águas doces são classificadas em cinco classes, sendo que a mais restritiva corresponde à classe especial (abastecimento sem tratamento) e a menos restritiva é a classe quatro destinada apenas a navegação e outros usos menos exigentes. Neste estudo consideraremos apenas a classe 1, cujas águas podem ser destinadas desde o abastecimento após tratamento simplificado (geralmente apenas desinfecção com cloro) até a irrigação de hortaliças e frutas e aquicultura.

Tabela 1. Médias dos resultados de metais e íons em poços de monitoramento e abastecimento da usina e comunidades (desvio padrão entre parênteses).

Poços	Na	K	Mg	Ca	Ba	Mn	Fe	Al	SiO2	SO4	F	NO3	Cl	CO3	HCO3
PC01 (n=26)	226,4 (231,3)	8,3 (2)	9,9 (0,9)	73,9 (15,5)	0,4 (0,1)	0,7 (0,4)	1,3 (2,6)	0,3 (0,2)	49,6 (9,3)	23,2 (10,8)	2,3 (0,3)	8,6 (8,3)	151,6 (162)	0,1 (0,1)	312,5 (365,6)
PC18 (n=26)	112,1 (96,6)	10,6 (2,3)	10,5 (2)	94,4 (40,6)	0,1 (0,1)	0,1 (0,1)	12,4 (24,2)	0,3 (0,2)	31,3 (22,8)	7,7 (5,7)	1,4 (0,4)	19,7 (14,4)	275,5 (268,7)	0,06 (0,08)	191,7 (253,1)
PC20 (n=27)	146,6 (81,5)	8,5 (1,5)	4,6 (0,4)	60,5 (6,2)	0,1 (0,1)	0,2 (0,1)	1,4 (4,6)	0,2 (0,2)	47,2 (10)	14 (5,5)	2,6 (0,5)	7,1 (1,7)	196,2 (248,4)	0,06 (0,08)	208,1 (257,3)
PC23 (n=23)	138,1 (55,9)	9,8 (1,9)	6,3 (1,8)	54,7 (20,4)	0,3 (0,2)	0,9 (0,8)	17,0 (19,1)	0,2 (0,2)	29,4 (12,2)	33,9 (21,3)	1,4 (0,7)	5,3 (7,0)	186,9 (267,8)	0,09 (0,11)	287,9 (359,7)
PC31 (n=24)	136,3 (74)	6,4 (1)	4,3 (1,5)	55,2 (31,9)	0,2 (0,1)	0,5 (0,4)	11,8 (19,3)	1,2 (1,8)	38,3 (23,1)	19,9 (16,6)	2 (0,8)	2 (1,6)	111,1 (39,7)	0,09 (0,12)	295,8 (374,1)
PC68 (n=21)	154,2 (7,6)	7,4 (0,5)	2,3 (0,9)	67,1 (17,4)	0,1 (0,0)	0,1 (0,0)	1,7 (3,5)	0,2 (0,1)	10,1 (7,3)	118 (21,3)	3,3 (0,6)	35,5 (33,5)	276,5 (113,6)	0,09 (0,14)	297 (440,5)
LR001 (n=13)	112,3 (9,8)	32,4 (3,5)	20,2 (5,9)	56,4 (12,4)	1,1 (0,3)	0,3 (0,1)	3,1 (4,2)	5,9 (6,3)	65,4 (7,6)	7,4 (3,4)	0,5 (0,5)	157,5 (119)	185,2 (102,5)	0,04 (0,03)	120 (82,2)
LR042 (n=9)	63,1 (17,9)	5,5 (0,9)	0,8 (0,1)	12,7 (2,4)	0,2 (0,1)	0,1 (0,0)	2,1 (4,8)	1,8 (3,1)	56,6 (7,1)	11,1 (2,8)	0,8 (0,3)	34,2 (9)	134,2 (252,3)	0,05 (0,05)	171,5 (166,9)
LR211 (n=10)	182,1 (58)	3,5 (4,2)	11,4 (3,9)	32,5 (12,6)	5,4 (2,1)	0,5 (0,3)	1,1 (1,9)	0,4 (0,4)	80,7 (25)	2,3 (1,2)	0,3 (0,2)	3,2 (2,7)	386,6 (247,7)	0,01 (0,02)	44,9 (59,6)
LR137 (n=5)	8,96 (0,82)	1,4 (0,2)	5,29 (0,2)	10,16 (2,5)	1,78 (2,3)	0,14 (0,1)	0,05 (0,0)	0,05 (0,0)	12,28 (0,7)	4,14 (1,1)	1,45 (1,8)	4 (0,6)	16,28 (9,3)	0,03 (0,02)	104,9 (77,7)

Tabela 2. Médias dos resultados dos parâmetros físico-químicos e radionuclídeos (Bq/L) em poços de monitoramento e abastecimento da usina.

Poços	U-nat Bq/L	Ra-226 Bq/L	Pb-210 Bq/L	pH [H ⁺]	Alcalinidade Carbonato(ppm)	Condutividade μS/cm	Dureza mg/L
PC01 (n=26)	6,6 (1,3)	0,4 (0,0)	0,2 (0,0)	6,8 (0,2)	256,35 (299,9)	909 (166)	224 (28)
PC18 (n=26)	0,5 (0,1)	0,1 (0,0)	0,2 (0,0)	7,2 (0,2)	157,2 (207,6)	949 (207)	262 (100)
PC20 (n=27)	0,16 (0,03)	0,06 (0,01)	0,15 (0,02)	7,1 (0,3)	170,7 (211)	866 (159)	164 (23)
PC23 (n=23)	0,1 (0,0)	0,1 (0,0)	0,1 (0,0)	6,9 (0,5)	236,1 (295)	881 (177)	173 (49)
PC31 (n=24)	0,17 (0,03)	0,04 (0,01)	0,1 (0,02)	7,1 (0,9)	242,6 (306,8)	705 (184)	155 (77)
PC68 (n=21)	10,4 (2,1)	0,41 (0,02)	0,11 (0,02)	7,8 (0,4)	243,6 (361,3)	933 (328)	165 (71)
LR001 (n=13)	0,12 (0,02)	0,58 (0,02)	0,12 (0,02)	7,06 (0,2)	98,45 (67,42)	1036 (255)	218 (65)
LR042 (n=9)	0,3 (0,06)	0,02 (0,00)	0,03 (0,01)	7,2 (0,6)	140,7 (136,9)	275 (142)	46 (14)
LR211 (n=10)	0,12 (0,02)	0,62 (0,03)	0,08 (0,01)	5,1 (0,98)	36,8 (48,9)	976 (254)	130 (31)
PC137 (n=5)	0,05 (0,02)	0,08 (0,04)	0,11 (0,03)	6,22 (0,27)	86,02 (63,7)	134 (8)	69 (14)

Dentre os poços avaliados, cinco foram destinados ao consumo humano em propriedades rurais ou distritos (PC-137, PC-68, LR001, LR042, LR211), e outros cinco voltados exclusivamente para o abastecimento da usina (PC-01, PC-18, PC20, PC-23, PC-31). Como foi dito acima, com exceção do poço PC-01 situado na área de influência da lavra e do PC-137 que tem boa qualidade, todos os demais produzem água não apropriada para o consumo humano.

De um modo geral o Al e o Fe solúvel são os parâmetros que se apresentam acima da concentração máxima permitida pelo CONAMA, 0,1 e 0,3 mg/L respectivamente, em todos os poços, com exceção do PC-137. O Fe é encontrado em vários minerais magnéticos que ocorrem em concentrações muito elevadas na região e o Al é característico de solos ácidos do semi-árido. Entre os poços utilizados para o abastecimento de comunidades, um deles (PC-68) foi lacrado devido aos altos teores de urânio e enxofre, que ocorrem principalmente na estação de chuvas. No entanto, em vários casos as comunidades dependem dos mesmos como única fonte de água, como no caso do LR001 e LR042. Nestes poços, assim como no PC-68, são encontradas concentrações elevadas de nitrato, refletindo a provável contaminação devido à ausência de saneamento básico na região, uma vez que a agricultura local não faz uso intensivo de fertilizantes. São encontradas concentrações acima do permitido de Mn, geralmente em conjunto com concentrações elevadas de fluoretos, em vários poços sendo que provavelmente estão associadas a depósitos de manganês presentes na região. Em relação aos cloretos, como será visto a seguir, sua concentração está diretamente ligada à infiltração e a recarga, sendo que quanto mais lenta ela é mais a água sofre influência da solução do

solo que apresenta altas concentrações de cloro e sódio, devido ao processo de evapotranspiração, causando a salinização dos solos e aquíferos. A alcalinidade a carbonatos se deve essencialmente ao bicarbonato, sendo que aqueles poços com menor alcalinidade são exatamente os utilizados para o consumo humano, uma vez que elevada alcalinidade, associada a altas concentrações de sais dissolvidos, traz sabor desagradável a água. (Baumgarten e Pozza, 2001).

Desta forma, o plano diretor de recursos hídricos da bacia deve buscar utilizar outras fontes de água, com o aproveitamento do poço PC-137 que apresenta vazões muito altas ($60\text{m}^3/\text{h}$) e outros assemelhados, assim como a captação das chuvas em cisternas com sistema de desinfecção permanente, enquadrando os demais poços como destinados para uso de águas salinas (classe 5).

3.2 - Hidrogeoquímica da Água Subterrânea

A tabela 3 apresenta o sumário estatístico dos dados relativos a todos os poços avaliados neste estudo. As maiores concentrações são observadas para os ânions HCO_3^- e Cl^- além da sílica e para os cátions Ca^{2+} e Na^+ . Convertendo-se as concentrações para mEq/L e fazendo-se o balanço de carga, ver-se-á que a relação entre as cargas positivas de negativas é da ordem de 0,95 o que pode ser considerado um resultado satisfatório.

Tabela 3. Estatística Descritiva das Análises de Cátions e Ânions nas amostras de poços da região de estudo (mg/L).

	N	Mínimo	Máximo	Média \pm desvio padrão
Mn^{2+}	10	0,10	0,90	$0,354 \pm 0,28$
Ba^{2+}	10	0,10	5,40	$0,968 \pm 1,651$
Al^{3+}	10	0,05	5,90	$1,05 \pm 1,790$
F ⁻	10	0,30	3,30	$1,61 \pm 0,954$
Fe^{2+}	10	0,05	17,0	$5,20 \pm 6,09$
Mg^{2+}	10	0,80	20,2	$7,56 \pm 5,66$
K^+	10	1,40	32,40	$9,38 \pm 8,56$
SO_4^{2-}	10	2,30	118	$24,2 \pm 34,4$
NO_3^-	10	2,00	157	$27,7 \pm 47,3$
SiO_2	10	10,1	80,7	$42,1 \pm 22,4$
Ca^{2+}	10	10,2	94,4	$51,8 \pm 26,4$
Na^+	10	9,00	226	$128 \pm 60,2$
Cl^-	10	16,3	386	192 ± 102
HCO_3^-	10	44,9	312	$203 \pm 93,9$

A figura 1 ilustra esquematicamente a composição percentual média das águas quando as concentrações são expressas em mEq/L. A distribuição fica então em ordem decrescente: Na^+ (29%); Cl^- (28%), HCO_3^- (18%) e Ca^{2+} (14%). O predomínio do ânion bicarbonato e do cátion sódio nas amostras de água subterrânea analisadas são típicas de aquíferos instalados em rochas graníticas ou metamórficas de composição granítica ou gnáissica (Castany, 1971; Freeze e Cherry, 1979).

Quantidades expressivas de sílica também são características das águas destes aquíferos, de acordo com estes autores. Essas substâncias são liberadas para a água subterrânea principalmente através do intemperismo dos plagioclásios. A origem das mineralizações de urânio que formaram as anomalias radiométricas presentes na região está ligada ao processo de albitização de feldspatos que possibilitou o acúmulo de sódio e cálcio nas rochas, com a substituição do potássio nos ortósios, formando a albita (IPT, 1983). Assim, a composição iônica destas águas está diretamente relacionada aos processos geológicos de gênese uranífera que modificaram a mineralogia da rocha aquífera. Relevantes ainda são as concentrações de nitrato e sulfato.

Neste tipo de meio espera-se anions como Cl^- e SO_4^{2-} venham a ocorrer somente em concentrações menores. Suas ocorrências nestes casos são normalmente atribuídas a fontes atmosféricas, à decomposição de matéria orgânica no solo e a traços de impurezas nas rochas e minerais (Freeze e Cherry, 1979). Na área de estudo, o enriquecimento de Cl^- e SO_4^{2-} nas águas parece ser devido ao aumento de suas concentrações no solo por evapotranspiração durante a lenta percolação das águas de infiltração, carreando-os para os aquíferos rasos e causando sua salinização.

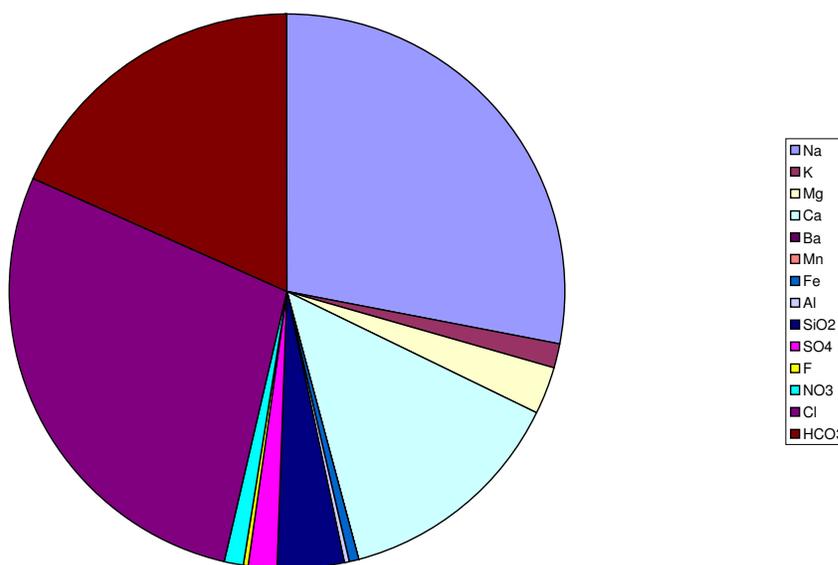


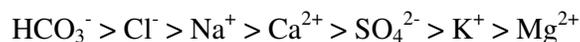
Figura 1: Distribuição percentual das concentrações médias dos cátions e anions analisados a partir de amostras de poços instalados na região de estudo

A presença da sílica pode ser atribuída ao intemperismo químico dos minerais silicatados instáveis e, finalmente, as assinaturas de Fe e Mn, que são mais móveis nas formas reduzidas (2+) são consistentes com o fato de que as águas subterrâneas tendem a ser meios mais redutores (anaeróbicos) do que as águas superficiais (Langmuir, 1997).

A seqüência clássica de ordem de abundância de íons por peso, ignorando-se a sílica e tal qual é reportado em Langmuir (1997) é:



No caso do presente estudo a seqüência obtida segundo o mesmo critério é:



Quanto à identidade dos poços entre si foi feito o tratamento estatístico dos dados de concentração por poço usando-se a análise fatorial como apresentado no pacote estatístico computacional do SPSS®. Dois fatores foram necessários para explicar 93% da variância dos dados. No primeiro fator agruparam-se os poços PC01, PC18, PC20, PC23, PC31, PC 68 e LR042 todos com coeficientes de correlação superiores a 0,90. Correlações intermediárias com este fator foram observadas para os poços LR 001 e LR137. Já o poço LR 211 foi o único a se correlacionar com o fator 2, com um coeficiente de 0,688 o maior entre todos. Estes resultados apontam para o fato de que os poços PC01, PC18, PC23, PC31, PC68 e LR042 possam fazer parte de uma mesma unidade ou então estão sujeitos a processos hidrogeoquímicos e hidrogeológicos semelhantes diferenciando-se do poço LR 211 a este respeito.

A figura 2 mostra o gráfico das concentrações dos íons mais relevantes em termos de concentração por poço avaliado.

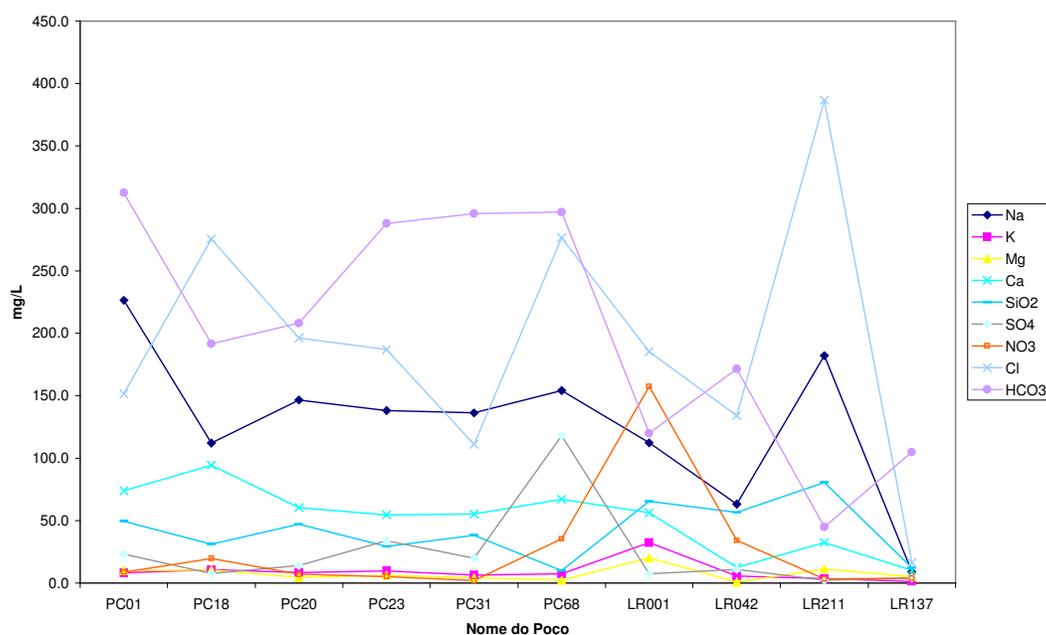


Figura 2. Variação das concentrações dos íons mais importantes (em termos de concentração) entre os poços estudados.

Pode-se observar que as maiores concentrações de HCO_3^- e Na^+ são observadas no PC 01, respectivamente 312,5 e 226,4 mg/L. Já as maiores concentrações de Cl^- e SiO_2 , 386,6 e 80,7 mg/L, respectivamente, são registradas para o poço LR 211. O poço LR001 apresenta as maiores concentrações de K^+ (32,4 mg/L), Mg^{2+} (157,5) sendo que a maior concentração de Ca^{2+} é anotada para o poço PC18. O poço LR 137 apresenta um comportamento consistente ao registrar as menores concentrações para Cl^- , Na^+ , Ca^{2+} , K^+ e SiO_2 e o LR 211 que havia apresentado a mais elevada concentração de Cl^- e SiO_2 aparece com a menor concentração de HCO_3^- (44,9 mg/L) e pH (5,1).

A interpretação global dos dados hidrogeoquímicos pode ser feita através de métodos estatísticos combinados. No caso presente, foi usada a técnica da correlação múltipla combinada com a análise fatorial. O pacote estatístico SPSS[®] foi empregado. A tabela 3 apresenta a matriz de correlação de Pearson com os escores associados a níveis de significância inferiores a 0,95. Já a tabela 4 apresenta a matriz de componentes da análise fatorial com escores superiores a 0,600.

Tabela 3. Matriz de correlação entre as variáveis estudadas.

	Na	K	Mg	Ca	Ba	Mn	Fe	Al	SiO ₂	SO ₄	F-	NO ₃	Cl	HCO ₃	U _{tot}	²²⁶ Ra	²¹⁰ Pb	pH	Alc	Cond	Dur		
Na	1																				0,786		
K		1	0,771					0,885				0,927											
Mg			1					0,654				0,673				0,670							
Ca				1													0,796				0,775	0,942	
Ba					1									-0,741				-0,928	-0,741				
Mn						1																	
Fe							1																
Al								1				0,946											
SiO ₂									1		-0,643												
SO ₄										1	0,708				0,849								
F											1			0,746	0,701				0,746				
NO ₃												1											
Cl													1										
HCO ₃														1				0,680	1,000				
U _{tot}															1								
²²⁶ Ra																1							
²¹⁰ Pb																	1						
pH																		1					
Alc																		0,680	1				
Cond													0,723								1		
Dur				0,942																		0,823	1

Tabela 4. Matriz de Componentes da Análise Fatorial¹.

	Fator				
	1	2	3	4	5
Na			0,721		
K		0,946			
Mg		0,641			
Ca				0,882	
Ba					
Mn			0,674		
Fe					0,865
Al		0,970			0,732
SiO ₂					
SO ₄	0,912				
F	0,832				
NO ₃		0,976			
Cl			0,768		
HCO ₃	0,773				
U _{tot}	0,856				
²²⁶ Ra			0,867		
²¹⁰ Pb					
pH	0,743			0,933	
Alcalinidade	0,774				
Condutividade			0,621	0,598	
Dureza				0,894	

Os resultados obtidos permitem propor que no fator 1 da tabela 3 estão agrupados todos os ânions que são capazes de complexar o urânio e com isso responder por suas concentrações mais elevadas em solução. De fato, na tabela 3 pode-se observar fortes correlações entre sulfato (0,849) e fluoreto (0,701) com o urânio. Em valores de pH mais elevados os carbonatos também complexam radionuclídeos. Já o fator 2 parecer estar descrevendo o processo de intemperismo dos aluminossilicatos mostrando uma contribuição do K, Mg e Al no fator. A presença do NO₃ neste fator é peculiar já que o ânion não se origina nas rochas formadoras dos aquíferos sendo sua origem provavelmente antropogênica (ver seção 3.1). No fator 3 estão reunidos Na, Cl e condutividade. Na medida que estes são dois dos ânions mais relevantes presentes nas águas subterrâneas, conforme foi apresentado na figura 1, os valores de condutividade das águas podem ser atribuídos a estas duas espécies. Por outro lado, é reportado que os cloretos são agentes efetivos na manutenção em solução do ²²⁶Ra em águas de formação em áreas de produção de petróleo e devido a similaridade química entre o Ra e o Ba a associação do cloreto com ambos os metais alcalinos terrosos parece evidente. No fator 4 vê-se a presença do ²¹⁰Pb e Ca o que sugere uma possível similaridade no comportamento químico de ambos. Finalmente o fator 5 traz o Fe e o Mn cuja a presença neste fator parece ser devida ao já conhecido padrão oxi-redox de ambos, i.e., a tendência a se manterem em solução em meios redutores.

¹ Método de Extração: Análise de Componentes Principais.

Método de Rotação: Varimax com normalização de Kaiser (a rotação convergiu após 11 iterações).

Tentou-se também aplicar a técnica de análise estatística multivariada para se avaliar as possíveis identidades existentes entre os poços estudados com respeito aos parâmetros analisados nas águas. Apenas um fator foi necessário para explicar 82% da variância dos dados. Isso pode ser interpretado pelo fato de que a maioria dos poços, com exceção do LR 137 e LR 211, pertence a um mesmo sistema podendo ser traduzido pela litologia na qual estes poços estão inseridos e, conseqüentemente pelos produtos resultantes da interação das águas subterrâneas com esta litologia.

3.3 - Recarga e Evolução da Água Subterrânea

A avaliação da evolução da água subterrânea, durante o fluxo subterrâneo, foi realizada com o auxílio dos diagramas de Stiff e das razões isotópicas da molécula de água ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$). Através destes diagramas, pode-se observar que ao longo do fluxo subterrâneo há o aumento no teor de sais dissolvidos. A distribuição dos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas subterrâneas, dos mesmos poços analisados através do diagrama de Stiff, permite diferenciar entre águas que estiveram mais sujeitas ao processo de evaporação (valores menos negativos) e estão diretamente relacionadas a infiltração reduzida e a recarga mais lenta na zona saturada enquanto aquelas que guardam o sinal da precipitação (valores mais negativos) são originadas da infiltração direta da mesma, sendo assim resultante de recarga mais rápida no aquífero (Generaux, 2004; Matter et al., 2005; Bajjali, 2006). Considerando-se que em aquíferos fissurais, predominantes na região de estudo, o posicionamento da fratura determina a entrada de água nos poços, quanto menor for a profundidade da fratura, provavelmente, mais sujeita estará a água subterrânea a sofrer evaporação. Nesse contexto, pode-se dividir os poços em dois grupos: i) O primeiro grupo apresenta os valores mais negativos e corresponde aos poços de aquíferos localizados em gnaisses ou quartzitos onde a profundidade das fraturas é maior (40 a 60 metros) e por isso o sinal da precipitação local é menos submetido à evaporação e provavelmente está associado a uma recarga recente; ii) O segundo grupo é formado por poços situados junto aos aluviões em granitos ou gnaisses com fraturas entre 10 e 40 metros, onde provavelmente a recarga é mais lenta devido a reduzida infiltração da água nestes depósitos argilo-arenosos que formam os cursos d'água intermitentes localizados a jusante do grupo i. Assim, ambos os métodos indicam um aumento de idade da água subterrânea com o fluxo do aquífero na bacia, ao longo dos Córregos Cachoeira, Mangabeira, Engenho Novo e Riacho das Vacas. Análises em andamento de ^{14}C em amostras de carbono inorgânico dissolvido destes poços forneceram informações adicionais sobre o tempo de residência da água subterrânea e mecanismos de recarga. A tendência observada de aumento de teor de bicarbonato, sulfato e sódio conforme a água percorre seu caminho subterrâneo é descrita em Castany (1971), Freeze e Cherry (1979), Fetter (1994), entre

outros. Um resumo das alterações observadas na composição da água subterrânea durante o fluxo subterrâneo é apresentado na Tabela 5 e os resultados dos isótopos estáveis contra a linha meteórica global (LMG), que representa a distribuição da precipitação no planeta, são mostrados na Figura 3.

Tabela 5. Resumo esquemático da evolução da composição química da água subterrânea.

Situação	Montante	Fluxo Subterrâneo →					Jusante
Idade	Aumento de Idade da Água Subterrânea →						
Seqüência 1	PC-18	PC-20	PC-21	PC-24	PC-74	PC-16	
Evolução	Na ⁺ = 3,6 meq/L	Aumento do teor de Na ⁺ e HCO ₃ ⁻				Na ⁺ = 6,09 meq/L	
	HCO ₃ ⁻ = 3,63 meq/L	→				HCO ₃ ⁻ = 5,05 meq/L	
Seqüência 2	PC-23	PC31				PC-16	
Evolução	Na ⁺ = 3,7 meq/L	Aumento do teor de Na ⁺ , HCO ₃ ⁻ e SO ₄ ⁻²				Na ⁺ = 6,09 meq/L	
	HCO ₃ ⁻ = 4,45 meq/L	→				HCO ₃ ⁻ = 5,05 meq/L	
	SO ₄ ⁻² = 0,46 meq/L	→				SO ₄ ⁻² = 1,06 meq/L	

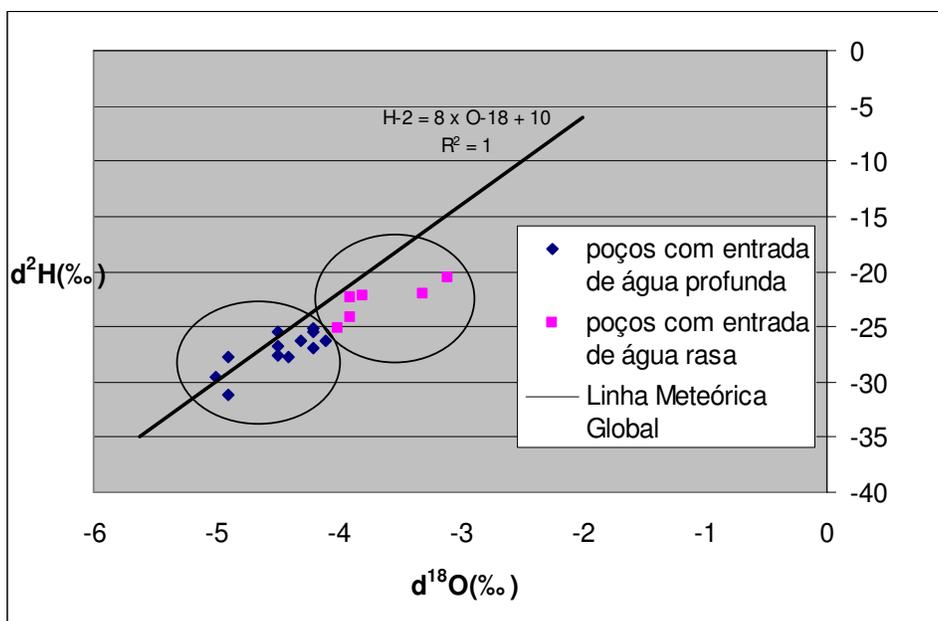


Figura 3. Valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ em partes por mil (‰) em relação à linha meteórica global (observar dois grupos de poços, conforme a profundidade das fraturas e a proximidade da LMG).

4 – CONCLUSÕES

A qualidade da água subterrânea é influenciada pela interação entre a mesma e a rocha onde o aquífero localizado, assim como pelo tempo decorrido entre a entrada (recarga) e a saída (descarga ou evaporação) do sistema. Desta forma, sua qualidade poderá ser alterada não apenas pela ação antrópica, mas também devido à evolução do intemperismo durante o período de tempo em que esteve isolada e em contato direto com uma determinada litologia. Esse tempo depende, por sua vez, basicamente da taxa de recarga e do tipo do aquífero considerado. No caso de aquíferos fissurais não confinados cobertos, como a área de estudo deste trabalho, o processo de salinização é recorrente devido à natureza do clima, com altas taxas de evaporação e precipitação concentrada em curtos períodos, e a hidrogeologia local que configura um fluxo subterrâneo com recarga lenta. Tais características tornam as águas subterrâneas impróprias para o consumo na maior parte dos poços monitorados.

Por isso, a gestão dessas águas deve privilegiar o uso de poços com recarga rápida que apresentam as melhores condições para o consumo humano, além do uso de outras fontes como a precipitação acumulada em cisternas com desinfecção permanente, deixando as águas salinas para usos específicos como a produção de espécies halófitas e espécies de peixes e crustáceos tolerantes a elevada salinidade. A dessalinização destas águas pode também ser uma alternativa, desde que seu uso permita o desenvolvimento de novas atividades econômicas ou incremente aquelas já existentes, garantindo a sustentabilidade na manutenção dos dessalinizadores ou, caso isso não seja possível, que a comunidade e órgãos públicos locais estejam comprometidos com a manutenção do sistema. No entanto, o aproveitamento ou disposição final dos resíduos salinos produzidos pela dessalinização deve ser estabelecido anteriormente a sua implantação, para evitar que seu uso indiscriminado cause impactos ambientais devido à salinização dos solos e águas. O plano diretor de recursos hídricos da bacia do Rio de Contas deve considerar a importância e prever a aplicação de recursos para a preservação desta área, que corresponde a sua nascente, localizada junto ao divisor de águas com a bacia do Rio São Francisco.

A caracterização hidrogeoquímica mostrou que as águas são do tipo bicarbonatadas sódicas, com algumas espécies calco-sódicas, cloretadas e com presença de sulfato em um dos poços (PC-68), que será estudada através de futuras análises de $\delta^{34}\text{S}$. Tal composição está diretamente relacionada ao tipo de rocha da região do complexo Lagoa Real, com predominância de granitos e gnaisses metamorfizados.

O estudo hidrogeoquímico e isotópico destas águas propuseram que as águas subterrâneas possam ser separadas em dois grupos: O primeiro grupo corresponde aos poços de aquíferos localizados em gnaisses ou quartzitos onde a profundidade das fraturas é maior (40 a 60 metros) e

está provavelmente associado a uma recarga recente e o segundo grupo é formado por poços abastecidos por fraturas entre 10 e 40 metros situados em granitos ou gnaisses junto aos aluviões, onde provavelmente a recarga é mais lenta.

Análises em andamento de ^{14}C em amostras de carbono inorgânico dissolvido destes poços forneceram informações adicionais sobre o tempo de residência da água subterrânea e mecanismos de recarga.

5 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAJJALI, W. 2006. Recharge mechanism and hydrochemistry evaluation of groundwater in the Nuaimah area, Jordan, using environmental isotope techniques. *Hydrogeology Journal*, vol. 14, p.180-191.

BAUMGARTEN, M. G. Z. e Pozza, S. A. 2001. Qualidade de águas. Descrição de parâmetros químicos referidos na legislação ambiental. Rio Grande, Ed. FURG, 164 p.

CASTANY, G. 1971. Tratado Práctico de las Águas Subterráneas. Barcelona, Ed. Omega, 572 p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE, 1986. Resolução nº 20 de 18/06/1986, publicado no D.O.U. de 30/07/1986. Brasília.

DEUTSCH, W.J. 1997. Groundwater geochemistry: Fundamentals and applications to contamination. Boca Raton, Lewis Publishers, 221p.

FETTER, C.W. 1994. Applied Hydrogeology. 3^a ed. New Jersey, Prentice-Hall, 691p.

FREEZE, R. A. e Cherry, J. A. 1979. Groundwater. 1^a ed, New Jersey, Prentice Hall, 604 p.

GENERAUX, D. 2004. Comparison of naturally-occurring chloride and oxygen-18 as tracers of interbasin groundwater transfer in lowland rainforest, Costa Rica. *Journal of Hydrology*, vol.295, p.17-27.

GODOY, J. M. 1994. Development o a sequential method for determination of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra e ^{210}Pb in environmental samples. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol.182, n.1, p.165-169.

GODOY, J.M. e Godoy, M.L. Natural radioactivity in Brazilian Goundwaters. *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 85, p. 71-83.

HEM, J.D. 1989. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. 3^a ed. US Geol. Survey Water-Supply Paper 2254, 263 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT, 1983. Estudos geológicos, geotécnicos e geomecânicos para projetos de implantação do Complexo Mínero-Industrial nas Jazidas Uraníferas de Lagoa Real – Jazida Cachoeira, município de Caetité, BA. Relatório Técnico 18/106. São Paulo, 180p.

MATTER, J. M. 2005. Recharge areas and geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer system in the Sultanate of Oman. *Hydrogeology Journal*, vol.14, p.203-224.

SIMÕES FILHO, F.F.L.; Fernandes, H.R.S.M.; Franklin, M.R.; Flexor, J-M.; Fontes, S.L. Pereira Filho, S.R. & Nascimento, F. 2003. Impactos de mineração e sustentabilidade no semi-árido. Estudo de caso: unidade de concentração de urânio – URA (Caetité, BA) in *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba, Nov. 2003, pp.1-20.