

## CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA NA FORMAÇÃO ALTER DO CHÃO, MUNICÍPIO DE MANAUS (AM)

Márcio Luiz da Silva<sup>1</sup> & Daniel Marcos Bonotto<sup>2</sup>

**Resumo** - A cidade de Manaus, capital do Estado do Amazonas, está localizada numa região próxima ao centro da bacia Amazônica, com uma população correspondente a 1.078.277 habitantes. O abastecimento de água no município é realizado pela Companhia de Saneamento de Águas e Esgotos do Estado do Amazonas (COSAMA), através da captação das águas do rio Negro e por poços tubulares. Este trabalho tem por objetivo investigar tanto a hidroquímica quanto o comportamento geoquímico dos isótopos de urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  nas águas subterrâneas de Manaus, de maneira a proceder a caracterização de contaminantes ou poluentes que possam estar afetando a qualidade dos recursos hídricos em sub-superfície, bem como avaliar a potencialidade do uso dos isótopos naturais de urânio como traçadores hidrológicos no aquífero estudado.

No que diz respeito aos isótopos de urânio, verifica-se que foram determinados valores de razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  entre 1,2 e 4,4 e de concentração de urânio entre 0,003 e 1,1  $\mu\text{g/L}$ . Esses resultados e os determinados para outros parâmetros analisados permitiram identificar que as águas estudadas são adequadas para o consumo humano e também classificar o ambiente hidrológico como redutor, com circulação das águas por estratos contendo minerais com baixas concentrações de urânio.

**Palavras-chave** - geoquímica, Amazônia, isótopos de urânio.

---

<sup>1</sup> Centro de Estudos Ambientais-UNESP, Av. 24-A, N° 1515, Bela Vista, 13506-900-Rio Claro (SP), Fone/FAX (019) 5340122, e-mail: cea@life.ibrc.unesp.br

<sup>2</sup> Departamento de Petrologia e Metalogenia, Instituto de Geociências e Ciências Exatas-UNESP, Av. 24-A, N° 1515, Bela Vista, 13506-900-Rio Claro (SP), Fone (019)5262825, FAX (019) 5249644, e-mail: dbonotto@rc.unesp.br

## **INTRODUÇÃO**

A utilização de água subterrânea para o abastecimento público e industrial, vem crescendo em todo o globo. Na Amazônia, tem-se observado crescente perspectiva de exploração dessa água, por apresentar vantagens práticas e econômicas quanto à sua captação, além de dispensar tratamentos, por ser de excelente qualidade (TANCREDI, 1996).

No Amazonas, o abastecimento de água é feito pela Companhia de Saneamento de Águas e Esgotos do Estado do Amazonas (COSAMA), através de poços tubulares e captação do rio Negro. Poços exploratórios de aquíferos no Estado do Amazonas começaram a ser perfurados a partir de 1976 (SOUZA, 1994), quando alguns trabalhos relacionados à hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas foram realizados, sem contudo ter havido qualquer abordagem enfocando a presença dos isótopos de urânio.

Ao infiltrar no solo, a água vai adquirindo características químicas que fornecem informações do meio circulante, qualidade e aplicabilidade. Desse importante recurso, a radioatividade natural das águas é decorrente da presença de elementos radioativos existentes nas rochas e solos, que são liberados durante a infiltração da água, face às reações que ocorrem com os minerais com os quais interage. Os principais radionuclídeos que contribuem para a radioatividade do meio ambiente são o potássio-40, o rubídio-87 e os que formam as séries do urânio-238, urânio-235, tório-232, dentre outros menos abundantes. Nos últimos anos, interesse crescente passou a ser dado aos isótopos naturais de urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$ , que começaram a ser empregados em hidrologia com diversas finalidades.

O presente trabalho objetiva investigar tanto a hidroquímica elementar quanto o comportamento geoquímico dos isótopos de urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  nas águas subterrâneas da cidade de Manaus, capital do Estado do Amazonas, de maneira a proceder a caracterização de contaminantes ou poluentes que possam estar afetando a qualidade dos recursos hídricos em sub-superfície, bem como avaliar a potencialidade do uso dos isótopos naturais de urânio como traçadores hidrológicos no aquífero estudado.

## **ASPECTOS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO**

### **AMAZÔNIA**

Em termos de extensão territorial, oito nações compartilham a região Amazônica e 60% do território brasileiro estão nessa área, onde vivem apenas 12% da população do

país, representando uma densidade demográfica de 4 habitantes/km<sup>2</sup> (ALVARENGA, 1997).

De acordo com PETRI & FÚLFARO (1988), mais de quatro milhões de km<sup>2</sup> da região são constituídos, em sua quase totalidade, pela bacia sedimentar do Amazonas, com rochas sedimentares do Terciário e Quaternário, e com aproximadamente 200 km de largura, de ambos os lados do rio Amazonas.

O desenvolvimento do ecossistema Amazônico e o seu equilíbrio atual determinam o balanço hídrico que atualmente conhecemos (SALATI & RIBEIRO, 1979). Dos ecossistemas Amazônicos, o de “terra firme” é o maior, com aproximadamente 98% da grande planície e altitude de 10 a 100 metros sobre o nível do mar, sendo essencialmente alimentado pelo húmus que ele mesmo produz; no geral, possui solos de baixa fertilidade, ácidos e de fragilíssimo equilíbrio ecológico. O segundo ecossistema é a “várzea” ou “terras baixas” (planície aluvional de cotas inferiores a 10 m), sujeita a alagações periódicas durante as enchentes dos rios de águas barrentas e formada por sedimentos depositados através da calmatagem nos lagos e terrenos periodicamente inundados, ricos em nutrientes minerais. Na várzea, é comum a presença de lagos, paranás, igapós e ilhas (DAMIÃO et al., 1972; SANTOS & RIBEIRO, 1988); sua largura é variável, em geral, maior no baixo curso, a leste de Manaus, onde são comuns valores de 15 a 50 km.

## **CLIMA E HIDROGRAFIA**

O clima da Amazônia é quente e úmido. A temperatura média é em torno de 33,1 °C (setembro), chegando a 27,9°C na estação seca e 25,8°C durante as estações chuvosas. Embora a temperatura média anual seja elevada, as variações de máximas e mínimas são geralmente inferiores a 5°C. A precipitação pluviométrica anual é de 1800 a 3500 mm e a umidade do ar é alta, em torno de 88% no período chuvoso e 77% no seco (PRANCE & LOVEJOY, 1985). Considerando a classificação de Köppen, o clima de Manaus se enquadra no tipo Af (RIBEIRO, 1976).

Estudos realizados na Amazônia Central indicam que mais de 75% da energia solar disponível à superfície são utilizadas para evapotranspiração e o restante, para aquecimento do ar. Na média anual, a evapotranspiração, na Amazônia, é responsável por cerca de 50% do total de sua precipitação pluviométrica, sendo o restante trazido do oceano Atlântico pelos ventos alísios (SALATI & RIBEIRO, 1979; MOLION, 1988). Os

meses com maior e menor intensidade pluviométrica são, respectivamente, de novembro a abril e de junho a outubro (SANTOS & RIBEIRO, 1988; MAIA NETO & LOPES, 1994).

A explicação do regime dos rios amazônicos está no próprio regime das chuvas que precipitam na bacia e no comportamento da circulação geral atmosférica, dentro da zona intertropical sul-americana (IBGE, 1977). Numa primeira aproximação, a bacia Amazônica funciona como um sistema que recebe, através da precipitação,  $14,4 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup> de água por ano, sendo este total balanceado por uma descarga superficial de  $5,5 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>/ano e uma evapotranspiração de  $8,9 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>/ano.

O Amazonas é o maior rio do mundo em extensão e volume de água, com uma descarga média anual de 220.000 m<sup>3</sup>/s, correspondente a cerca de 1/5 do volume de água doce de todo o planeta (MARTINELLI et al., 1989). É um rio tipicamente de planície, com um declive mínimo de 20 mm/km, e velocidade média de aproximadamente 2,5 km/h. Os rios Solimões e Amazonas, com seus 1100 afluentes, cortam a planície Amazônica aproximadamente ao meio, sendo navegáveis em quase toda a sua extensão, que, interligada, ultrapassa 25.000 km (PORRO, 1995). O potencial médio de água doce dos rios da Amazônia chega a 3.384,5 km<sup>3</sup>/ano, representando cerca de 68% do total nacional e resultando numa disponibilidade social de 374.905 m<sup>3</sup>/hab/ano (REBOUÇAS, 1997).

Alguns tributários do rio Amazonas como os rios Negro e Jutai são conhecidos como rios de água preta e, segundo SIOLI (1985), sua cor é causada pela forte dissolução de substâncias húmicas coloidais provenientes do manto de matéria orgânica em decomposição, fornecida pela floresta que se desenvolve nas áreas inundáveis das suas nascentes e margens, bem como pelos solos podzólicos e arenosos das áreas campestres das suas cabeceiras. Estes rios são ácidos e pobres em sais minerais dissolvidos e, como possuem pouco material particulado em suspensão, não formam várzeas e sim praias e igapós, no período de cheia (SANTOS & RIBEIRO, 1988). Os rios mais jovens, os barrentos do Amazonas, são caracterizados pela instabilidade dos seus leitos, causada pela ação simultânea da sedimentação e da erosão, sendo ricos em meandros que se dispõem nas planícies aluviais por eles construídas (IBGE, 1977).

## **GEOLOGIA REGIONAL E LOCAL**

A história geológica da região é muito antiga, iniciando-se no Arqueano (3200-2600 Ma), com a formação dos cinturões de rochas verdes durante o desenvolvimento do Evento Guriense. Logo após, formaram-se extensos depósitos de rochas ferríferas e

manganesíferas, metamorfisados durante o Evento Guianense (2500 Ma). Posteriormente, a região foi afetada pelo Evento Transamazônico (2000 Ma) (fenômenos de granitização e migmatização). No Proterozóico Médio (1700 Ma), a porção central da Amazônia começou a ser afetada pelo Evento de reativação tectônica denominado Paraense, que originou extensa granitização, vulcanismo ácido a intermediário e sedimentação. A seguir, e sempre em direção oeste, a região foi afetada pelos Eventos de reativação Madeirense (1400 Ma) e Rondoniense (1000 Ma). Após cerca de 500 Ma e, com orientação aproximada E-W, instala-se o processo que deu origem à bacia sedimentar (AMARAL, 1974).

Em decorrência do baixo gradiente hidráulico do rio Amazonas e seus afluentes, os detritos quaternários foram depositados sob a forma de diques, cujos flancos externos passam, suavemente, às extensas várzeas. Esses depósitos aluvionários recentes chegam a formar ilhas nas calhas dos rios Negro e Solimões. As áreas mais altas, livres das enchentes, são regionalmente chamadas de tesos, sendo constituídas por argilas e arenitos frequentemente endurecidos por cimento limonítico que se elevam de 6 a 15 m acima do nível das águas (LOURENÇO et al., 1978; PETRI & FÚLFARO, 1988).

A área de estudo está situada sobre os sedimentos continentais da Formação Alter do Chão, oriundos da deposição de sedimentos continentais em ambientes aquosos, predominantemente lacustres e fluviais. Através da perfuração de um poço em Alter do Chão, estado do Pará, a Petrobrás identificou sedimentos vermelhos inconsolidados que atingiam 545 m de profundidade. Possivelmente foi Kistler, em 1954, o primeiro a empregar o termo Formação Alter do Chão para esses sedimentos que, em 1975, Daemon datou do Cretáceo Inferior (CAPUTO et al., 1972; PETRI & FÚLFARO, 1988).

Segundo PETRI & FÚLFARO (1988), a Formação Alter do Chão situa-se numa planície de dissecação que vem sofrendo movimentos positivos, desde o início do Terciário. É uma formação constituída por sedimentos vermelhos, com espessura máxima de 1250 m, sob a forma de argilas (cor vermelha mosqueada, cinza-esbranquiçada, branca-avermelhada) plásticas, maciças e micáceas, às vezes finamente laminadas com filmes de areia, com predominância de minerais do grupo da caolinita associada à gibbsita (traços), feldspatos, quartzo e ilita (raramente), argilitos (com lentes de areia, pouco consolidados e cor vermelha, creme, branca e roxa), siltitos, arenitos (finos a médios, geralmente com estratificação cruzada e intercalações argilosas, micáceos, ferruginosos, maciços e bioturbados) e conglomerados (com seixos de quartzo), pobres em fósseis e recobertos discordantemente, em parte, por sedimentos terciários ou diretamente por

sedimentos quaternários (DAMIÃO et al., 1972; LOURENÇO et al., 1978, BRITO, 1979; PETRI & FÚLFARO, 1988).

A área de estudo é, em seu aspecto geral, plana e está inserida no Planalto Dissecado Rio Trombetas-Negro, definida por BARBOSA et al. (1978) como um relevo de interflúvios tabulares e colinas com topos com extensão entre 250 a 750 m, separados por vales abertos e de fraco grau de aprofundamento. Na cidade de Manaus, o relevo apresenta platôs escalonados de altitudes variando de 25 a 125 m (NAVA, 1996).

## **HIDROGEOLOGIA**

A partir de 1976, a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) começou a perfurar poços no estado do Amazonas, com profundidades variando de 100 a 250 m. Todos eles exploram aquíferos constituídos pela Formação Alter do Chão que, sob Manaus, tem uma espessura máxima de 205 m e uma superfície aflorante de 437.500 km<sup>2</sup>, que extrapola a área municipal. Esses sistemas de aquíferos, na bacia sedimentar do Amazonas, têm um volume de água igual a 32.500 km<sup>3</sup> e poços com intervalo de vazão de 10 a 400 m<sup>3</sup>/h (SOUZA, 1994; REBOUÇAS, 1997).

De acordo com CHAVEL (1982), em estudo de dois perfis de 2 e 2,6 m de profundidade, nessa área de estudo, a organização ultra e microscópica dos solos da região evidenciam dois sistemas de porosidade diferentes: conjunto de criptovazios (< 0,1 µm) que asseguram a retenção e a circulação muito lenta da água, conservação da caulinita e dos cátions; e rede de mesovazios (35 a 75 µm) comunicantes devido a atividade biológica e responsáveis pela drenagem rápida no sistema, e sedes de uma desionização e dessilicificação intensa. A proximidade dos rebordos do platô e as possibilidades de drenagem lateral rápida se intensificam à medida que aumenta a declividade do terreno, permitindo a exportação do silício em solução e a concentração relativa do alumínio e do ferro (CHAVEL, 1982).

## **O MUNICÍPIO DE MANAUS**

O estado do Amazonas corresponde em área a 1.567.953,7 km<sup>2</sup>, estando dividido em 62 municípios. Manaus, sua capital, está atualmente com uma população correspondente a 1.078.277 habitantes, representando 51% da população do estado (UOREGON, 1999).

A cidade de Manaus encontra-se a 3°8'30"S e 60°00'00"W à altitude de 21 m acima do nível do mar. Localiza-se à margem esquerda do rio Negro, próximo de sua confluência com o rio Solimões, fazendo limites com os municípios de Itacoatiara a leste, Manacapuru a oeste, Presidente Figueiredo ao norte e Careiro ao sul. As principais vias fluviais que servem ao município, tanto no fluxo de passageiros como de cargas são, os rios Negro, Solimões e Amazonas. O município dispõe, ainda, de um sistema de rodovias em condições regulares de tráfego, onde se destacam: Manaus-Itacoatiara (AM-010), Manaus-Cacau Pereira-Manacapuru (AM-070), Manaus-Caracaraí/RO (BR-174) e Manaus-Humaitá-Porto Velho (BR-319), com 1070 km, em sua maioria intransitável. O acesso ao município também pode ser efetuado pela maioria das companhias aéreas nacionais e internacionais.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

As coletas de amostras de águas subterrâneas para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas no período de seca regional (mês de dezembro) em 15 poços perfurados pela CPRM-AM e distribuídos por todo o perímetro urbano da cidade de Manaus. A seleção dos poços foi efetuada em conjunto com a CPRM-AM, em função de sua localização, acesso e funcionalidade. Todos eles extraem água da Formação Alter do Chão (Tabela 1), com altitude variando de 27 a 93 m, e a direção do fluxo da água subterrânea diverge, preferencialmente, dos poços com nível hidrostático mais elevado em relação à topografia da área de estudo.

AMOSTRA	CÓDIGO	FORMAÇÃO	ALTITUDE	PROFUNDI-	NÍVEL	NÍVEL	VAZÃO
			(m)	DADE	ESTÁTICO	DINÂMICO	
1	3MA-97-AM	Alter do Chão	79	153,0	59,60	77,08	22,53
2	3MA-95-AM	Alter do Chão	87	143,0	22,92	44,33	79,20
3	3MA-124-AM	Alter do Chão	55	202,0	52,37	114,92	203,80
4	3MA-74-AM	Alter do Chão	45	154,0	48,00	79,07	29,40
5	3MA-125-AM	Alter do Chão	60	228,0	72,30	114,85	198,00
6	3MA-128-AM	Alter do Chão	55	203,0	38,65	130,96	101,54
7	3MA-38-AM	Alter do Chão	83	152,5	46,80	100,60	40,04
8	3MA-83-AM	Alter do Chão	27	202,0	4,70	53,37	226,00
9	3MA-90-AM	Alter do Chão	43	134,0	24,81	51,03	56,57
10	3MA-102-AM	Alter do Chão	82	41,5	23,20	30,01	1,80
11	3MA-127-AM	Alter do Chão	57	158,0	38,64	84,15	52,79
12	3MA-137-AM	Alter do Chão	55	223,0	73,10	115,14	101,53
13	3MA-115-AM	Alter do Chão	91	189,0	52,60	115,60	21,16
14	3MA-82-AM	Alter do Chão	65	171,0	55,73	99,03	35,20
15	3MA-130-AM	Alter do Chão	93	203,0	68,87	103,46	172,95
MÉDIA				170,5	45,48	87,57	89,45

**Tabela 1.** Características principais dos poços amostrados no município de Manaus.

No campo, as amostras foram coletadas de cada poço através de seu bombeamento e, para se evitar contaminação pela tubulação, manteve-se cada um em funcionamento por 30 minutos antes de se efetuar a amostragem. Coletou-se, inicialmente, para cada amostra, um volume adicional de 5 L de água para a aferição da temperatura com um termômetro de precisão de leitura de 0,1°C, o mais rápido possível, para evitar alteração no seu valor. A coleta de amostras para as análises hidroquímicas foi realizada em duplicata, utilizando-se de frascos de polietileno de 2 L. Para a análise do teor de urânio dissolvido e razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ , as amostras foram coletadas em frascos de polietileno com capacidade para 20 L, pois, torna-se necessário o tratamento químico de um grande volume de amostra, caso a concentração do elemento seja baixa. Todos os frascos novos e limpos foram previamente lavados, enxaguados várias vezes com a própria água a ser amostrada, cheios até a boca, identificados com etiquetas numeradas e em caderneta de campo. As amostras foram cuidadosamente manuseadas para evitar contaminação e, após a coleta, foram imediatamente conduzidas ao Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA) para serem aferidos o pH, o potencial de óxi-redução (Eh), a condutividade elétrica, o ferro total, o  $\text{Fe}^{3+}$  e os principais cátions e ânions dissolvidos.

O pH e a condutividade elétrica foram aferidos com equipamento digital da marca WTW, modelo LF 191. Para a determinação do Eh recorreu-se ao analisador digital da Analion modelo IA 601, ao qual foi acoplado um eletrodo metálico de platina combinado



(Analion, modelo 674), previamente calibrado com solução de Zobell, conforme procedimento descrito por BONOTTO (1996). O cálcio, o magnésio e a dureza foram quantificados por complexometria com EDTA (GOLTERMAN et al., 1978), o sódio e o potássio por fotometria de chama, o ferro total e o  $\text{Fe}^{3+}$  por metodologia descrita em APHA (1985), a alcalinidade por potenciometria (GOLTERMAN et al., 1978), o cloreto por titulometria (GOLTERMAN et al., 1978), o nitrato por redução a nitrito (STRICKLAND & PARSONS, 1968), o sulfato por espectrofotometria e o amônio pelo método de Nessler (STRICKLAND & PARSONS, 1968).

Para as análises de urânio, adicionou-se HCl 8M a cada amostra para evitar a precipitação de Fe no recipiente, e, então, 100  $\mu\text{L}$  do traçador  $^{232}\text{U}$ - $^{228}\text{Th}$  (atividade de 3,39 dpm), agitando-se vigorosamente a amostra para dissolução completa dos radionuclídeos adicionados. Depois, acrescentou-se 1 mL de cloreto férrico e, para induzir a floculação do material, elevou-se o pH da amostra para a faixa de 8-10, pela adição de hidróxido de amônio; nesse pH ocorre a precipitação de hidróxido férrico, permanecendo a amostra em repouso por 3 dias para a floculação e posterior decantação do precipitado, no qual se encontra o urânio e outros elementos. Após a total decantação, foi retirado e desprezado, cautelosamente, por via mecânica, o máximo de sobrenadante. O precipitado, mais o que sobrou do sobrenadante, foi transferido para frasco de 2 L, novo e limpo, identificado com etiqueta numerada e lacrada. A etapa seguinte consistiu em acondicionar e transferir, via aérea, as amostras para extração do urânio no LABIDRO-Laboratório de Isótopos e Hidroquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP-Câmpus de Rio Claro.

No LABIDRO, recuperou-se o precipitado acondicionado em frasco de 2 L, centrifugando-o por 15 minutos a 2000 rpm. O precipitado foi transferido para um béquer de 80 mL, ao qual se adicionou HCl 8M e 4 gotas de  $\text{HClO}_4$ , conduzindo-se a uma chapa aquecedora para ser evaporado e seco. Após a secagem, o material foi redissolvido com HCl 8M, para que ocorresse a conversão de diuranato de amônio para cloreto de uranila. Para separar o ferro do U e outros elementos, efetuou-se extração com solvente orgânico (éter di-isopropílico); a fase etérea foi descartada, estando o urânio na forma dos íons complexos  $(\text{UO}_2\text{Cl}_4)^{2-}$  e  $(\text{UO}_2\text{Cl}_3)^{-}$  e o ferro residual na forma de íons  $\text{FeCl}_4^{-}$  numa solução de HCl 8M. Para a separação do urânio, tornou-se necessária a utilização de resina de troca iônica, tendo sido empregada a aniônica Rexyn 201 da Fisher Scientific Co., com porosidade de 50 a 100 mesh, sob a forma iônica  $\text{OH}^{-}$  e capacidade total de troca de 1,4 mEq/mL. A resina acidificada com HCl 8M retém o ferro e o urânio, deixando passar os

alcalino-terrosos e outros elementos, e, ao se eluir a resina com HNO<sub>3</sub> 7M, consegue-se retirar o Fe<sup>3+</sup>, permanecendo adsorvido o urânio. Com a adição de HCl 0,1 M à coluna ocorre a eluição do urânio, pois, os íons de cloreto de uranila (UO<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub><sup>2-</sup>) não são estáveis nessa solução. A solução resultante é transferida para uma chapa aquecedora para evaporação até secagem, onde, ao resíduo seco, acrescenta-se H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2M e o eletrólito (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2M. A seguir, a solução foi transferida para célula de eletrodeposição (BONOTTO, 1996), sendo o pH ajustado para 2,4 por intermédio de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e NH<sub>4</sub>OH 2M. Depois, submeteu-se a solução a uma corrente contínua constante de 300 mA, por 3 horas, adicionando-se algumas gotas de NH<sub>4</sub>OH antes de se desligar o circuito. Após a remoção do ânodo de Pt, ocorreu a deposição do urânio em cátodo consistindo de disco de aço inoxidável, o qual foi lavado com água destilada e seco em lâmpada infravermelha.

Todos os discos preparados foram analisados por intermédio de dois detectores semicondutores de barreira de superfície de Si (Au) da ORTEC em câmaras de vácuo, acoplados a pré-amplificadores da ORTEC, Modelo 109 e ligados a amplificadores da ORTEC, Modelo 485. Ambos os amplificadores foram conectados a placas distintas da ORTEC, Modelo 916A, consistindo de conversor analógico digital, microprocessador Z80A e memória inseridos em microcomputador do tipo IBM-PC. Os resultados foram obtidos e tratados pelo programa MAESTRO II da ORTEC. Por permitir, para cada canal, um registro de um valor de energia correspondente, os dois sistemas utilizados foram calibrados por intermédio de um padrão de urânio, consistindo numa mistura de urânio natural com atividade para <sup>238</sup>U de 54,6 dpm e para <sup>232</sup>U-<sup>228</sup>Th (traçador) de 10 dpm, conforme descrito por BONOTTO (1986). A obtenção do teor de urânio dissolvido nas águas analisadas foi efetuada com base no princípio de diluição isotópica, de acordo com o descrito por BONOTTO (1982), enquanto que a quantificação da razão de atividade <sup>234</sup>U/<sup>238</sup>U foi efetuada a partir da taxa de contagem nos picos do <sup>238</sup>U e <sup>234</sup>U presentes nos espectrogramas alfa obtidos. A taxa de contagem da radiação de fundo foi monitorada periodicamente para cada sistema em uso.

## **DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES**

### **PARÂMETROS FÍSICOS E FÍSICO-QUÍMICOS**

Os resultados obtidos na avaliação dos principais parâmetros físicos e físico-químicos para as águas subterrâneas estudadas estão representados na Tabela 2. Conforme se verifica, as temperaturas obtidas são relativamente homogêneas, variando

de 27 a 29°C. A temperatura média do ar corresponde a 32,5°C, sendo que o seu valor superior em relação ao das águas subterrâneas pode ser explicado pela interpretação de CASTANY (1971) que considera que a água meteórica, em seu trajeto, desde a zona não saturada até a saturada, tende a entrar em equilíbrio térmico com as rochas do aquífero.

AMOSTRA	DATA DE COLETA	TEMP. H <sub>2</sub> O (°C)	TEMP. AR (°C)	COND. ELET. (µS/cm)	pH	Eh (mV)
1	27/11/97	28	33	16,3	5,0	+201
2	27/11/97	27	29	27,9	4,4	+248
3	27/11/97	28	33	26,3	4,8	+207
4	28/11/97	27	29	36,2	5,2	+199
5	28/11/97	27	28	27,0	4,9	+204
6	28/11/97	27	28	31,9	5,2	+211
7	01/12/97	27	34	18,4	4,1	+256
8	02/12/97	29	33	82,9	5,4	+93
9	02/12/97	29	34	40,2	5,0	+204
10	02/12/97	29	34	27,8	4,5	+256
11	02/12/97	28	34	15,1	4,5	+97
12	03/12/97	28	35	35,2	5,1	+134
13	03/12/97	27	35	15,7	4,4	+213
14	03/12/97	29	33	55,6	5,0	+241
15	03/12/97	27	35	29,8	4,9	+205
MÉDIA		27,8	32,5	32,4	4,8	+197,9

**Tabela 2.** Parâmetros físicos e físico-químicos das amostras analisadas.

Os valores encontrados para o pH variam de 4,1 a 5,4, indicando que são ácidas as águas dos poços amostrados, as quais não se enquadram nos padrões de qualidade ambiental (Resolução CONAMA No. 20/86), pois, são inferiores ao limite mínimo de pH igual a 6. Esta característica físico-química das águas estudadas possivelmente pode ser explicada em função da composição mineralógica das rochas do aquífero, recarga rápida e processos de interação água-rocha/solo, pois, FORTI & MOREIRA-NORDEMANN (1991) determinaram para o pH da água de chuva na região de floresta de terra firme valores entre 4 e 5,3. Contudo, outras interpretações possíveis não podem ser descartadas como as decorrentes dos estudos de SANTOS et al. (1981) que verificaram que nas águas dos caules das árvores o pH variou de 5 a 7 e do lençol freático de 3 a 4, indicando que as bases responsáveis pelo poder tampão destes solos devem ser reabsorvidas rapidamente através de um mecanismo fisiológico ainda desconhecido, não chegando assim a serem carregadas para fora do sistema.

O potencial redox medido nas águas estudadas variou de +93 a +256 mV, de maneira que o seu ambiente de circulação pode ser classificado como “reduzidor ácido”, de

acordo com o diagrama Eh-pH de KRAUSKOPF (1972). A condutividade elétrica (CE) variou de 15,1 a 82,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores que são baixos e indicam que as águas são fracamente mineralizadas, boas para irrigação, pois, no geral, águas com CE inferiores a 750  $\mu\text{S}/\text{cm}$  são satisfatórias para irrigação, apesar de algumas plantas serem sensíveis a este valor ou inferiores (KLAR, 1984). Estudos hidroquímicos realizados por SANTOS & RIBEIRO (1988) também evidenciaram a extrema pureza das águas naturais da região estudada, comparável à de água destilada e que reflete a importância do escoamento, alta precipitação pluviométrica e evapotranspiração. Um significativo coeficiente de correlação ( $r=0,62$ ) foi encontrado entre a CE e a temperatura, evidenciando que a CE aumenta com a elevação da temperatura, conforme esperado (CASTANY, 1971). Tanto o pH quanto a CE apresentaram correlação negativa com a topografia da área de estudo, sugerindo um aumento desses parâmetros de acordo com o fluxo subterrâneo na área de estudo.

## **PRINCIPAIS ÂNIONS E CÁTIONS DISSOLVIDOS**

Na Tabela 3 constam os resultados obtidos na análise dos principais ânions e cátions dissolvidos nas águas estudadas, onde se verifica que são baixos os valores encontrados, o maior deles correspondendo a 13,4 mg/L para o potássio na amostra 8. Os menores valores de bicarbonato indicam áreas de recarga e aquíferos livres a semiconfinados, coincidindo com as áreas de topografia mais elevada e crescendo de acordo com a direção do fluxo subterrâneo. Para todas as amostras, o teor de sulfato foi inferior ao limite de detecção correspondente a 1 mg/L, verificando-se, em termos de valores médios, que o cloreto corresponde ao ânion mais abundante (média de 1 mg/L). Porém, apesar disso, os valores obtidos para esse ânion são bem inferiores a 150 mg/L, considerado como o limite máximo para uso da água para diversas finalidades (CETESB, 1978). Assim, os teores de cloreto obtidos sugerem um não confinamento do aquífero, e que as águas são recém-infiltradas, refletindo as características das águas de chuva com pouca interação com os estratos do aquífero. FORTI & MOREIRA-NORDEMANN (1991) ao estudarem as águas de chuva da região de Manaus determinaram uma baixa concentração de cloreto, correspondendo aos resultados obtidos neste trabalho. Dentre os constituintes inorgânicos que figuram nas normas de qualidade de água, o nitrato é um dos mais problemáticos, devido à sua ampla distribuição, grande mobilidade em subsuperfície, estabilidade em sistemas aeróbicos de águas subterrâneas e risco à saúde humana (FOSTER & HIRATA, 1993). SANTOS et al. (1981) estimaram que as

precipitações em área próxima de Manaus ocasionam a introdução da ordem de 3,2 kg/ha/ano de amônia e 2,5 kg/ha/ano de nitrato, tendo sido os maiores valores de  $\text{NH}_4^+$  encontrados durante a estação seca, o que denota que esse íon é influenciado pela precipitação. Os teores de nitrato superiores a 10 mg/L são indesejáveis na água de uso doméstico, devido a um possível efeito tóxico sobre as crianças novas, por causar cianose (CETESB, 1978), porém, os valores obtidos nas amostras analisadas situaram-se entre 0,019 e 1,02 mg/L, bem abaixo do limite estabelecido pela Organização Mundial de Saúde.

AMOS-TRA	CLORE-TO	NITRA-TO	SULFA-TO	BICAR-BONATO	AMÔ-NIO	CÁLCIO	MAG-NÉSIO	POTÁS-SIO	SÓDIO	Fe(III)	Fe TO-TAL	DURE-ZA
1	0,923	0,127	<1,0	0,61	0,034	0,192	0,398	5,9	0,7	0,001	0,001	2,358
2	1,278	0,222	<1,0	<0,10	0,026	0,001	0,136	0,1	1,7	0,001	0,001	0,623
3	0,710	0,019	<1,0	0,61	0,018	0,721	0,486	5,8	0,6	0,001	0,001	4,227
4	0,710	0,035	<1,0	1,22	0,026	1,042	0,427	8,3	0,7	0,001	0,001	4,850
5	0,710	0,032	<1,0	1,22	0,026	0,384	0,525	6,0	0,6	0,001	0,191	3,471
6	0,781	0,054	<1,0	1,22	0,034	0,384	0,768	8,8	0,8	0,001	0,001	4,583
7	0,710	0,087	<1,0	<0,10	0,034	0,080	0,029	0,4	0,8	0,001	0,001	0,356
8	0,710	0,026	<1,0	3,05	0,010	5,450	2,820	13,4	1,3	0,001	0,001	28,035
9	0,781	0,266	<1,0	0,16	0,018	0,545	0,602	7,5	1,7	0,001	0,001	4,272
10	0,994	0,451	<1,0	<0,10	0,026	0,001	0,213	0,1	2,9	0,001	0,001	0,979
11	0,852	0,040	<1,0	<0,10	0,050	0,288	0,136	7,2	0,5	0,001	0,001	1,424
12	0,710	0,019	<1,0	1,83	0,050	0,881	0,544	8,5	0,6	0,001	0,001	4,939
13	1,278	0,061	<1,0	<0,10	0,108	0,400	0,019	0,5	0,8	0,001	0,001	1,201
14	3,056	1,020	<1,0	1,83	0,034	1,282	0,408	2,7	4,5	0,001	0,001	5,429
15	0,852	0,032	<1,0	1,22	0,067	0,657	0,282	7,8	0,5	0,001	0,001	3,115
MÉDIA	1,000	0,166	<1,0	0,86	0,040	0,820	0,520	5,5	1,2	0,001	0,014	4,660

**Tabela 3.** Teores dos ânions e cátions (em mg/L) dissolvidos nas amostras analisadas.

Considerando-se os valores médios obtidos para os principais cátions, verifica-se que a sua abundância ocorre de acordo com a sequência  $\text{K} \gg \text{Na} > \text{Ca} = \text{Mg}$ . Essa situação não é comum para águas subterrâneas, uma vez que o potássio ocorre em rochas numa forma não facilmente solubilizada, sendo recombinação com outros produtos de intemperismo, particularmente os minerais argilosos, conforme sugere HEM (1959) ao mostrar a tendência do potássio em estar sempre presente nos sedimentos argilosos em proporções maiores do que nas rochas ígneas. Dentre os metais alcalinos dissolvidos nas águas, o sódio costuma ser mais abundante do que o potássio, sendo os feldspatos

geralmente as mais importantes fontes desse elemento, uma vez que a albita e a anortita são decompostas mais facilmente do que os feldspatos potássicos (RANKAMA & SAHAMA, 1950). Nas águas analisadas os teores de sódio variaram de 0,5 a 4,5 mg/L, e, quando lixiviado, esse elemento tende a permanecer em solução, pela grande solubilidade de seus compostos. De acordo com GARRELS (1960), altas concentrações de potássio só ocorrem em regiões onde não há suficientes silicatos de alumínio capazes de sua fixação. SANTOS & RIBEIRO (1988) consideram que a alta concentração de potássio, sódio e magnésio nos rios de água preta da Amazônia deve-se ao intemperismo de feldspatos, lavagem das folhas, caules, troncos e decomposição orgânica.

Os teores de cálcio variaram de 0,001 a 5,45 mg/L e, apesar de ser baixa a presença de bicarbonato nas águas estudadas, verifica-se que esse ânion favorece a solubilização de cálcio, pois, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,80 entre esses parâmetros. Análises de águas dos troncos e do lençol freático conduzidas por SANTOS et al. (1981) em ecossistemas florestais perto de Manaus sugeriram que o cálcio circula num sistema fechado, onde se torna imobilizado, principalmente, nas folhas mais velhas das plantas (frequentemente na forma de oxalato de cálcio, fosfato de cálcio e sais orgânicos). O magnésio é um elemento de importância nas rochas ferromagnesianas e ultrabásicas, tendo sido o maior valor determinado para a amostra 8, assim como verificado para o potássio e cálcio. O argilo mineral dominante nos solos da região é a caolinita (DAMIÃO et al., 1972), de maneira que os silicatos de alumínio devem estar fixando o magnésio. O coeficiente de correlação entre o cálcio e magnésio é de 0,95, indicando, assim, que os processos intempéricos estão atuando da mesma maneira nesses elementos. A dureza é um parâmetro que leva em conta a presença de cálcio e magnésio, principalmente sob a forma de bicarbonatos, tendo sido encontrados valores entre 0,36 e 28,03 mg/L, o maior deles para a amostra 8, conforme também verificado para o cálcio, magnésio e bicarbonato. De acordo com a classificação de SAWYER & McCARTY (1967), as águas subterrâneas estudadas são do tipo “moles”. Quanto ao ferro dissolvido nas águas, duas espécies ocorrem comumente, isto é, o íon ferroso, Fe(II), e o férrico, Fe(III), tendo sido encontrado um valor de 0,001 mg/L para o Fe(III) em todas as amostras analisadas. Apenas o Fe total na amostra 5 (0,191 mg/L) se diferenciou em relação ao obtido para as demais amostras (0,001 mg/L), tendo sido possivelmente originado por alguma contaminação da tubulação do poço. SOUZA (1994) também verificou a ausência de ferro nas águas subterrâneas em Manaus, tendo TANCREDI (1996) sugerido que o teor de ferro relativamente baixo reflete a elevada taxa de

circulação (renovação) da água subterrânea no sistema hidrológico da Formação Alter do Chão. Mapas de isovalores de cálcio, magnésio, potássio, dureza e bicarbonato foram construídos a partir dos resultados obtidos neste trabalho, os quais mostraram que as distribuições e os teores destes elementos aumentam de acordo com a direção do fluxo subterrâneo e com o decréscimo da topografia.

Para o agrupamento das águas com características similares, utilizou-se o diagrama semi-logarítmico de SCHOELLER (1962), o qual permitiu estabelecer um grupo de amostras com  $Na+K > Ca > Mg$  e outro com  $Na+K > Mg > Ca$ , o que evidenciou a predominância de  $Na+K$  nas águas, que diferem nas proporções relativas de  $Ca$  e  $Mg$ . As mesmas tendências para a maioria dos íons foram também verificadas por SANTOS & RIBEIRO (1988) para as águas do rio Negro e por TANCREDI (1996) para as águas subterrâneas de Santarém. O emprego do diagrama de PIPER (1944) possibilitou efetuar a classificação química das águas, verificando-se que, do ponto de vista dos cátions dissolvidos, a grande maioria é potássica ou sódica, ocorrendo duas delas com caráter misto (calco-potássica). Quanto aos ânions dissolvidos, nota-se que o cloreto é predominante, refletindo também sua importância naquelas amostras com caráter misto, pois, somente uma não segue esse padrão, sendo classificada como bicarbonatada. As águas estudadas apresentam excelente composição química para irrigação, pois, segundo o cálculo para a razão de adsorção de sódio (SAR), obteve-se o valor médio de 1,29 mEq/L, que se situa entre 0 e 10, considerado excelente para uso da água na agricultura (SUDENE, 1972). Quanto à hidroquímica elementar, os valores obtidos foram sempre inferiores aos limites estabelecidos pelos padrões de potabilidade recomendados pela Organização Mundial da Saúde, inserindo-se no contexto de que a maior parte das águas subterrâneas, quando suficientemente pobres em sais minerais, são potáveis e recomendáveis para o uso, a menos que se encontrem contaminadas (CETESB, 1978). Convém apenas ressaltar que a amostra 8 apresenta os maiores valores de pH, CE, dureza, magnésio, potássio, bicarbonato e cálcio, os quais podem estar relacionados com a proximidade do nível estático (NE) à superfície do terreno, poluição, pequena área de recarga, ou, simplesmente, processos de interação água/rocha-solo. É nesse contexto que também podem ser considerados os valores mais elevados de cloreto, sódio e nitrato determinados para a amostra 14 e do íon amônio para a amostra 13, em virtude da presença nesses locais de um grande lixão (amostra 13) e de grande concentração populacional (amostra 14).

## URÂNIO DISSOLVIDO E RAZÃO DE ATIVIDADE $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

A concentração de urânio dissolvido nas amostras analisadas variou de 0,003 a 1,1  $\mu\text{g/L}$  e a razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  (RA) de 1,2 a 4,4 (Tabela 4). Durante a infiltração das águas meteóricas, ocorrem interações água/rocha-solo, as quais, frequentemente, resultam em razões de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  para o urânio dissolvido maiores que a unidade, em virtude da lixiviação preferencial de  $^{234}\text{U}$  em relação a  $^{238}\text{U}$ , mecanismo que pode explicar os valores encontrados para as amostras analisadas.

AMOSTRA	VOLUME (L)	TEMPO DE CONTAGEM (segundos)	RAZÃO DE ATIVIDADE $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$	URÂNIO DISSOLVIDO ( $\mu\text{g/L}$ )
1	20	338186,34	1,30 $\pm$ 0,91	0,049
2	20	326105,54	3,97 $\pm$ 1,30	0,003
3	20	260031,42	3,26 $\pm$ 0,80	0,020
4	20	178139,64	1,65 $\pm$ 0,37	0,205
5	20	266616,08	3,22 $\pm$ 1,35	0,023
6	20	172604,10	1,20 $\pm$ 0,08	1,100
7	20	260079,16	2,35 $\pm$ 0,47	0,083
8	20	359469,96	2,52 $\pm$ 0,35	0,025
9	20	324634,88	2,47 $\pm$ 1,04	0,004
10	20	338217,68	4,41 $\pm$ 1,06	0,034
11	20	266649,70	3,25 $\pm$ 1,17	0,005
12	20	169686,24	1,58 $\pm$ 0,35	0,094
13	20	304838,46	3,88 $\pm$ 1,35	0,005
14	20	359388,90	2,42 $\pm$ 0,82	0,013
15	20	324673,60	1,25 $\pm$ 0,25	0,717
MÉDIA			2,55 $\pm$ 0,77	0,158

**Tabela 4.** Teor de urânio dissolvido e razão de atividade  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  para as amostras analisadas.

Os resultados obtidos sugerem uma tendência de enriquecimento de  $^{234}\text{U}$  nas águas, na medida em que diminui o pH ( $r = -0,61$ ), o potássio ( $r = -0,64$ ) e o bicarbonato ( $r = -0,46$ ) e que aumenta a espessura da zona vadosa ( $r = 0,54$ ), provavelmente devido os efeitos das interações água/rocha-solo. GOMES (1978) observou em estudo hidroquímico realizado nas águas subterrâneas do Bambuí (BA) que ocorre uma tendência de diminuição da RA seguindo a direção do fluxo subterrâneo, onde as amostras com alta concentração de urânio correspondem às de maior RA. O mesmo não foi verificado neste trabalho, pois, obteve-se um coeficiente de correlação de  $-0,60$  entre o teor de urânio e a



RA, coincidindo os maiores valores de RA com as áreas de maior altitude topográfica e tendo o seu decréscimo, no geral, acompanhado a direção do fluxo subterrâneo.

COWART & OSMOND (1980) classificaram bidimensionalmente os sistemas de águas subterrâneas para a caracterização de zonas de acumulação, de acordo com a concentração de urânio dissolvido e RA. De acordo com a classificação proposta, o sistema hídrico da Formação Alter do Chão é “normal redutor”, significando que características redutoras predominam no ambiente de circulação dessas águas, com a lixiviação de litologias contendo baixa concentração de urânio, pois, em nenhum caso, obteve-se teor de urânio dissolvido superior a 1,1 µg/L. A mesma classificação “redutora” foi obtida a partir da inserção dos dados obtidos no diagrama Eh-pH (KRAUSKOPF, 1972) e, de acordo com BOWIE & PLANT (1983), o urânio lixiviado de qualquer rocha sob condições oxidantes sofre precipitação num ambiente redutor, o que justificaria a baixa concentração de urânio nas águas estudadas.

Com relação à radioatividade natural nas águas, o critério empregado no Brasil para limitar a exposição às emissões é baseado na Portaria No. 36 de 19/01/90 do Ministério da Saúde, a qual estabelece o valor de referência de 0,1 Bq/L para a radioatividade alfa total e de 1 Bq/L para a radioatividade beta. A identificação dos radionuclídeos presentes nas águas e a medida de suas concentrações é prevista, quando, numa primeira avaliação, os valores encontrados excedem os de referência para a radioatividade alfa e beta total, situação na qual se aplicam os critérios estabelecidos por CNEN (1988) para se concluir quanto à potabilidade das águas, onde para o  $^{238}\text{U}$  e o  $^{234}\text{U}$ , os limites de ingestão anual correspondem, respectivamente, a  $5 \times 10^5$  e  $4 \times 10^5$  Bq. Neste trabalho, o maior teor de urânio dissolvido correspondeu a 1,1 µg/L. Assumindo uma ingestão diária de 2 L de água em um ano e efetuando-se a apropriada conversão de unidades, obtém-se uma ingestão anual de  $^{238}\text{U}$  igual a 9,92 Bq e de  $^{234}\text{U}$  igual a 11,9 Bq, constatando-se, assim, que as atividades obtidas para as águas subterrâneas de Manaus estão consideravelmente abaixo das máximas permitidas.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos Drs. Ari Marques de Oliveira Filho, Maria do Socorro Rocha da Silva e Sebastião Átila Fonseca Miranda do INPA e Drs. Fernando Pereira de Carvalho e José Moura Villas Boas da CPRM pelos apoios técnicos e logísticos fornecidos para a realização da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVARENGA, T. A sinfonia da água. *Veja*. V. 51, p. 42-51, 1997.
- APHA (AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 16 ed. Washington: APHA, 1985.
- AMARAL, G. *Geologia pré-cambriana da região Amazônica*. São Paulo, 1974. 212 p. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo.
- BARBOSA, G.V., COSTA, R.C.V., NATALI FILHO, T., OLIVEIRA, A.A.B., GARCIA, M.G.L. *Geomorfologia*. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Brasília: DNPM, v. 18, p. 167-244, 1978.
- BONOTTO, D.M. *Aplicação dos dados do fracionamento isotópico  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  nos problemas geoquímicos dos aquíferos de Águas da Prata (SP)*. São Paulo, 1982. 161 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo.
- BONOTTO, D.M. *Aplicações hidrogeoquímicas dos isótopos naturais das séries do U ( $4n+2$ ) e Th ( $4n$ ) no Morro do Ferro, Poços de Caldas (MG)*. São Paulo, 1986. 377 p. Tese (Doutorado em Geofísica) – Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo.
- BONOTTO, D.M. *Comportamento hidrogeoquímico do  $^{222}\text{Rn}$  e isótopos de urânio  $^{238}\text{U}$  e  $^{234}\text{U}$  sob condições controladas de laboratório e em sistemas naturais*. Rio Claro, 1996. 223 p. Tese (Livre Docência) – Universidade Estadual Paulista.
- BOWIE, S.H.U., PLANT, J.A. Natural radioactivity in the environment. In: THORNTON, I. ed. *Applied environmental geochemistry*. London, Academic Press, 1983. 501 p.
- BRITO, I.M. *Bacias sedimentares e formações pós-paleozóicas do Brasil*. Rio de Janeiro: Interciência, 1979,. 179 p.
- CAPUTO, M.V., RODRIGUEZ, R., VASCONCELOS, D.N.N. Nomenclatura estratigráfica da bacia do Amazonas; histórico e atualização. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26, Belém. *Anais...* Belém: SBG, 1972. v. 3, p. 35-46.
- CASTANY, G. *Tratado práctico de las águas subterráneas*. Barcelona: Omega, 1971. 672 p.
- CETESB. *Água subterrânea e poços tubulares*. 3 ed. São Paulo, 1978. 483 p.
- CHAVEL, A. Contribuição para o estudo da evolução dos latossolos amarelos, distróficos, argilosos na borda do platô, na região de Manaus: mecanismos de gibbsitização. *Acta Amaz.*, v. 11, p. 227-45, 1982.
- CNEN (COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR). *Diretrizes básicas de radioproteção*. Rio de Janeiro, 1988, 129 p. (Resolução 12/88).

- COWART, J.B., OSMOND, J.K. *Uranium isotopes in groundwater as a prospecting technique*. Colorado: U.S.Dept.of Energy, 1980. 112 p.
- DAMIÃO, R.N., SOUZA, M.M., MEDEIROS, M.F. *Projeto argila Manaus*. Manaus: DNPM/CPRM, 1972. 65 p. (Relatório final).
- FORTI, M.C., MOREIRA-NORDEMANN, L.M. Rainwater and throughfall chemistry in a “terra firme” rain forest: Central Amazonia. *Geophys. Res.*, v. 96, p. 7415-21, 1991.
- FOSTER, S., HIRATA, R. *Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo: Instituto Geológico, 1993. 92 p.
- GARRELS, R.M. *Mineral equilibria*. New York: Harper & Brothers, 1960. 254 p.
- GOLTERMAN, H., CLYMO, R.S., OHMSTAD, M.A.M. *Methods for physical & chemical analysis of freshwater*. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1978. 213 p. (Handbook No. 8).
- GOMES, F.V.M. *Aplicação dos isótopos de urânio como traçadores de água subterrânea do Bambuí-BA*. Salvador, 1978. 69 p. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal da Bahia.
- HEM, J.D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *U.S.G.S. Water Supply Paper*, v. 1473, 1959. 269 p.
- IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA). *Geografia do Brasil: região norte*. Rio de Janeiro, 1977. V. 1, 463 p.
- KLAR, A.E. *A água no sistema solo-planta-atmosfera*. Nobel: Rio de Janeiro, 1984. 408 p.
- KRAUSKOPF, K.B. *Introdução à geoquímica*. São Paulo: Polígono, 1972. V.2, 311 p.
- LOURENÇO, R.S., MONTALVÃO, R.M.G., PINHEIRO, S.S., FERNANDES, P.E.C.A., PEREIRA, E.R., FERNANDES, C.A.C., TEIXEIRA, W. *Geologia*. In: BRASIL. Departamento Nacional de Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL. Brasília: DNPM, v. 18, p. 29-164, 1978.
- MAIA NETO, R.F., LOPES, E.S. As cheias de Manaus. *Água Rev.*, v. 2, p. 31-43, 1994.
- MARTINELLI, L.A., DEVOL, A.H., FORSBERG, B.R., VICTORIA, R.L., RICHEY, J.E., RIBEIRO, M.N.G. Descarga de sólidos dissolvidos totais do rio Amazonas e seus principais tributários. *Geochim. Bras.*, v. 3, p. 141-8, 1989.
- MOLION, L.C.B. A Amazônia e o clima da Terra. *Ciênc. Hoje*. V. 8, p. 42-7, 1988.
- NAVA, D.B. Projeto Grande Manaus. 1996. Relatório. 21 p.
- PETRI, S., FÚLFARO, V.J. *Geologia do Brasil: Fanerozóico*. EDUSP, São Paulo: 1988. V. 9, 631 p.

- PIPER, A.M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Trans.Amer.Geophys.Union*, v. 25, p. 914-28, 1944.
- PORRO, A . *O povo das águas: ensaios de etno-história amazônica*. Rio de Janeiro: Ed. Vozes, 1995. 204 p.
- PRANCE, G.T., LOVEJOY, T.E. *Amazônia: key environments*. Oxford: Pergamon Press, 1985. p. 4.
- RANKAMA, K., SAHAMA, T.G. *Geochemistry*. The Chicago University Press, 1950. 909 p.
- REBOUÇAS, A.C. *Panorama da degradação do ar, da água doce e da terra no Brasil*. São Paulo: IEA/USP; Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 1997. 150 p.
- RIBEIRO, M.N.G. Aspectos climáticos de Manaus. *Acta Amaz.*, v. 6, p. 229-33, 1976.
- SALATI, E., RIBEIRO, M.,N.G. Floresta e clima. *Acta Amaz.*, v. 4, p. 15-22, 1979.
- SANTOS, U.M., RIBEIRO, M.N.G. A hidroquímica do rio Solimões-Amazonas. *Acta Amaz.*, v. 18, p. 145-72, 1988.
- SANTOS, A., RIBEIRO, M.N.G., RIBEIRO, J.S., BRINGEL, S.R.B. Hidroquímica da Amazônia Central III. Química de água de lavagem da floresta no ecossistema Campina Amazônia (Stemflow). *Acta Amaz.*, v. 11, p. 335-46, 1981.
- SAWYER, C.N. & McCARTY, P.L. *Chemistry for sanitary engineers*. New York: McGraw-Hill, 1967. 518 p.
- SCHOELLER, H. *Les eaux souterraines*. Paris: Masson & Cie, 1962. 642 p.
- SIOLI, H. *Amazônia: fundamentos da ecologia da maior região de florestas tropicais*. Rio de Janeiro: Vozes, 1985. 72 p.
- SOUZA, M.M. Dois poços tubulares anômalos em Manaus-AM. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, Recife. *Anais...* Recife, 1994. P. 323-8.
- STRICKLAND, J.D.H., PARSONS, T.R. A manual of sea water analysis. *Bull. Fish Res. Bd. Can.*, v. 125, p. 1-185, 1968.
- SUDENE. *Elementos de hidrogeologia prática*. 2 ed. 1972. 353 p.
- TANCREDI, A.C.F.S. *Recursos hídricos subterrâneos de Santarém: fundamentos para uso e proteção*. Belém, 1996. 146 p. Tese (Doutorado em Geoquímica) – Universidade Federal do Pará.
- UOREGON. *Manaus*. [on line]. Disponível em <http://darkwing.uoregon.edu/~sergiok/brasil/manaus.html> [1999, maio].