

O Uso de Isótopos Ambientais em Estudos Hidrogeológicos no Brasil: Uma Resenha Crítica

Carla Semiramis Silveira¹
Gerson Cardoso da Silva Júnior²

- (1) *Doutoranda do Programa de Engenharia Civil - COPPE / UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Geotecnia, Caixa Postal 68.506, 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil*
(2) *Professor do Departamento de Geologia - I. Geociências / UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Setor de Geologia de Engenharia e Ambiental, Ilha do Fundão, 21949-900 - Rio de Janeiro - RJ, Brasil*

Resumo

Nos estudos hidrológicos e hidrogeológicos, os isótopos ambientais têm sido utilizados como ferramenta para a identificação da proveniência, quantificação da recarga e estabelecimento da idade do aquífero. O objetivo deste trabalho é apresentar uma retrospectiva histórica do uso desta técnica no Brasil, enfatizando estudos de caso nas regiões Nordeste e Amazônica e Bacia do Paraná. Além disso, são analisados os principais avanços desta técnica no mundo em contraste com o uso restrito no Brasil.

Palavras-chave: isótopos ambientais, hidrogeologia, Brasil

Abstract

In hydrologic and hydrogeological studies, environmental isotopes have been used as a tool to identify provenience, quantify recharge and establish aquifer age. The aim of this work is to present a historic retrospective of the use of this technique in Brazil, focusing on study cases in Northeastern, Amazon and Paraná Basin regions. In addition, some comments on the main advances of this technique on a world basis, in contrast with the restrict use in Brazil help to promote a discussion on the perspectives and unfolding of this use at national level.

Key words: environmental isotopes, hydrogeology, Brazil

1 Introdução

A utilização de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos remonta a vários anos, tendo-se iniciado com os trabalhos pioneiros de Urey *et al.* e Epstein & Mayeda na década de 50 (*in* Clark & Fritz, 1997). O emprego de isótopos ambientais, assim denominados por serem encontrados de forma generalizada no meio ambiente em

quantidades que permitem seu uso como traçadores ou marcadores cronológicos, é muito difundido a nível mundial, constituindo nos dias de hoje uma ferramenta que se pode considerar como tradicional no meio técnico hidrogeológico (Fritz & Fontes, 1980). No contexto hidrológico e hidrogeológico os isótopos ambientais são utilizados como traçadores (de águas superficiais e subterrâneas), em estudos de proveniência, de recarga e de idade de um aquífero (Clark & Fritz, 1997). Classicamente, os padrões de fluxo são determinados a partir de pontos onde se mede o nível piezométrico da água e as transmissividades são estimadas a partir de ensaios de bombeamento, sem que se tenha evidência direta do tipo, origem e idades da água. A hidrologia isotópica preenche parcialmente esta lacuna, e os isótopos ambientais são particularmente indicados pois representam os melhores traçadores uma vez que, no caso do 3H , 2H e 18O constituem as próprias moléculas de água. Não obstante o exposto, os isótopos ambientais não tem sido utilizados de forma substancial em nosso país, havendo ainda inclusive um certo desconhecimento no meio técnico especializado de suas peculiaridades e mesmo de potenciais situações em que estas técnicas poderiam ser úteis.

Os isótopos de um elemento químico são caracterizados pelo mesmo número atômico e diferentes números de massa. Esta diferença no número de massa é provocada pela variação do número de nêutrons do elemento e condiciona comportamentos distintos do elemento em relação a um determinado isótopo, modificando localmente a abundância relativa entre os vários isótopos na natureza, em um processo denominado de fracionamento isotópico. Quanto maior a diferença de massa entre eles, maior o fracionamento. O fracionamento pode ocorrer por mudança de fase ou estado, diferença na taxa de reação química e diferença na velocidade de difusão molecular (Clark & Fritz, 1997). Os isótopos podem ser radioativos (estarem sujeitos a desintegração no tempo por emissão de radioatividade) ou não.

Nem todos os isótopos ocorrem na natureza em proporções significativas ou mensuráveis. Dentre os isótopos radioativos, por exemplo, alguns são obtíveis somente de forma artificial, em laboratório. Os isótopos que têm ocorrência natural e que acompanham os ciclos naturais do meio ambiente (ciclo hidrológico, do carbono e outros) são denominados comumente de "ambientais". A maioria dos estudos com isótopos ambientais têm-se centrado na utilização dos isótopos de hidrogênio (^1H , ^2H , ^3H), carbono (^{12}C , ^{13}C , ^{14}C), nitrogênio (^{14}N , ^{15}N), oxigênio (^{16}O , ^{18}O) e enxofre (^{32}S , ^{34}S).

Este são os elementos mais importantes nos sistemas biológicos e participam na maioria das reações de interesse hidrogeoquímico (Fritz & Fontes, 1980). Mais recentemente o ^{36}Cl e o ^3He têm sido bastante utilizados. A distinção do uso de cada um desses isótopos é função dos objetivos de cada trabalho e dos meios de que se dispõe.

Geralmente a abundância do isótopo (abundância isotópica) na natureza é baixa, mas em alguns casos a ação antrópica ao longo do tempo favoreceu o aumento desta (como no caso de ^2H , ^3H , ^{13}C e ^{14}C com as bombas nucleares). As propriedades dos isótopos que tornam atrativo o seu uso são o fracionamento e a radioatividade (quando existente permite, através da abundância isotópica e da taxa de decaimento, estimar idades). As quantidades absolutas de isótopos presentes em uma amostra são difíceis de serem determinadas. Afortunadamente, as diferenças relativas entre os isótopos podem ser determinadas facilmente através de medição da relação diferencial (com espectrômetros de massa. Esta relação diferencial ou concentração isotópica (δ) é expressa, então, como uma proporção (partes por mil - ‰) entre a razão medida na amostra e a razão medida em um padrão de referência internacional (antigamente SMOW - *Standard Mean Ocean Water* e atualmente VSMOW - *Viena Standard Mean Ocean Water*), medidos simultaneamente no mesmo aparelho e expressos da seguinte forma para o ^{18}O como exemplo (Clark & Fritz, 1997):

$$\delta^{18}\text{O}_{amostra} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{amostra} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{padrão}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{padrão}} \quad (1)$$

onde $\delta^{18}\text{O}_{amostra}$ é a concentração isotópica em partes por mil de ^{18}O na amostra

$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{amostra}$ é a razão relativa entre ^{18}O e ^{16}O na amostra

$\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{padrão}$ é a razão relativa entre ^{18}O e ^{16}O no padrão internacional.

Até a chuva alcançar o lençol freático e mesmo depois, no fluxo da água subterrânea na zona saturada, a água tem sua composição modificada pelo fracionamento gerado pelos processo de evaporação, uso pelas plantas, mudanças climáticas e reações com o solo/rocha (Clark & Fritz, 1997). Neste contexto a caracterização isotópica das entradas atmosféricas serve de base para a compreensão dos processos atuantes em subsuperfície. Para 18O e 2H estudos intensivos da precipitação em todo o mundo estabeleceram uma reta de água meteórica onde as regiões mais frias são representadas pelas águas mais depletadas (Fig. 1). Para estudos locais o ideal é o uso de uma reta meteórica local (Clark & Fritz, 1997). Visando a calibração destes isótopos na atmosfera a Agência Internacional de Energia Atômica (OIEA) mantém um banco de dados da mensuração de 2H, 3H e 18O em estações meteorológicas ao longo de todo o mundo. As estações no Brasil (embora nem sempre com uma série temporal completa) são: São Gabriel, Belém, Manaus, Fortaleza, Benjamin Constant, Ceará Mirim, Porto Velho, Salvador, Cuiabá, Brasília, Rio de Janeiro e Porto Alegre.

No presente artigo procurar-se-á discutir a experiência brasileira no uso desses isótopos, através da descrição e discussão de casos observados na literatura à luz do estágio atual de conhecimentos. Além disso, incluem-se também comentários sobre as causas do uso reduzido das técnicas ambientais, laboratórios especializados no país e perspectivas futuras de uso com base na experiência dos autores. Para isso foi elaborada uma pesquisa bibliográfica e, diante do uso ainda incipiente desta técnica, foram considerados os estudos hidrológicos como um todo, e atenção especial foi dada aos de caráter hidrogeológico.

2 Histórico da Utilização de Isótopos Ambientais no Brasil

Em estudos hidrológicos no Brasil os isótopos comumente utilizados são ¹⁸O, ²H e ³H. O uso destes isótopos é função de três fatores: i) a abundância compatível com a resolução dos métodos de análise; ii) estes elementos são os constituintes principais da água (hidrogênio e oxigênio) e por isso o comportamento deles é muito próximo ao da água, funcionando como excelente traçador ("traçador ideal"); iii) especificamente para o ³H, a medição da sua radioatividade (meia-vida / $\lambda=12,43$ anos) é um indicativo da idade das águas. Entretanto o uso do ³H e secundariamente ²H no hemisfério sul é limitado porque o aumento da concentração deles na atmosfera é relacionado ao resíduo das bombas nucleares das décadas de 50 e 60. Como estas bombas foram localizadas

principalmente no hemisfério norte, a abundância destes isótopos no hemisfério sul é pequena, dificultando os estudos (Gat & Gonfiantini, 1981). Os demais isótopos têm utilização limitada em função da baixa abundância isotópica, dificuldade de mensuração e/ou meia-vida (λ) não apropriada (muito curta ou muito longa) como no caso do ^{36}Cl ($\lambda=301.000$ anos) e ^{14}C ($\lambda=5730$ anos) que devem ser utilizados para regiões de recarga muito antiga.

Os primeiros estudos com isótopos ambientais em uso hidrológico no Brasil datam do final da década de 60, início da década de 70 e tiveram como alvos principais o Nordeste brasileiro a Amazônia e posteriormente a região sudeste (basicamente o aquífero Botucatu) (Tabela 1).

No Nordeste os estudos foram motivados pela seca e salinização das águas, apoiados pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), e inicialmente tinham como objetivos o conhecimento da origem e dos mecanismos de recarga dos aquíferos, a causa da salinização, o tempo de trânsito e a datação destes aquíferos (Gat *et al.*, 1968; Ferreira de Melo *et al.*, 1969; Campos, 1971; Prado & Bedmar, 1976; Salati *et al.*, 1979a).

Os estudos na Amazônia tiveram início com o objetivo de cálculo da vazão dos rios Negro e Solimões e estimativa da contribuição de afluentes para o rio Amazonas através do método da distância de boa mescla (Matsui *et al.* 1972). Os isótopos utilizados foram 2H e 18O , que agiram como traçadores no rio. Paralelamente a esta linha de pesquisa, a caracterização da composição isotópica da chuva foi impulsionada pela necessidade de elaboração de uma reta meteórica local. Neste contexto foram desenvolvidos vários trabalhos de calibração, mensuração e discussão do fracionamento isotópico da chuva, principalmente na Amazônia (Dall'Olio *et al.*, 1979; Salati *et al.*, 1979b; Matsui *et al.*, 1983) e também mais gerais (Gonfiantini, 1985). O conhecimento da reta meteórica para a chuva na Amazônia demonstrou que esta era condicionada em parte pelos processos de evapotranspiração da floresta (Salati *et al.*, 1979b; Matsui *et al.*, 1983) e estimulou estudos de detalhe destes processos (Leopoldo *et al.*, 1980 e Leopoldo *et al.*, 1984).

Com a compreensão da composição isotópica da chuva e do papel da evapotranspiração na Amazônia, os estudos evoluíram para a caracterização do ciclo

Publicação	Área de estudo	Objetivo do estudo	Isótopos utilizados
Gat <i>et al.</i> (1968)	Nordeste	Discussão teórica da aplicação da técnica de isótopos para os aquíferos do Nordeste	Os resultados referentes às amostras coletadas não foram publicados
Ferreira de Melo <i>et al.</i> (1969)	Bacia Potiguar - (região Nordeste)	Origem da água subterrânea	^2H e ^{18}O
Campos (1971)	Região Nordeste	Levantamento preliminar dos teores de ^3H nas águas superficiais, subterrâneas e de chuva	^3H
Matsui <i>et al.</i> (1972)	Amazônia	Cálculo de vazão de rio	^2H e ^{18}O
Prado & Bedmar (1976)	Bacia do Maranhão (região Nordeste)	Caracterização hidrogeológica	^3H , ^2H e ^{18}O
Reis <i>et al.</i> (1977)	Marajó	Mapear a área de influência do rio Amazonas na baía de Marajó	^2H e ^{18}O
Dall'Olio <i>et al.</i> (1979)	Amazônia	Origem do vapor d'água responsável pelas chuvas na região	^{18}O
Salati <i>et al.</i> (1979a)	Região Nordeste	Caracterização hidrogeológica	^3H , ^2H , ^{18}O e ^{14}C
Salati <i>et al.</i> (1979b)	Amazônia	Origem do vapor d'água responsável pelas chuvas na região	^2H e ^{18}O
Leopoldo <i>et al.</i> (1980)	Laboratório	Evapotranspiração	^2H e ^{18}O
Matsui <i>et al.</i> (1980)	Brasil	Caracterização de águas superficiais e subterrâneas para a escolha de uma fonte para a produção de "água pesada" (enriquecida em ^2H)	^2H
Leopoldo <i>et al.</i> (1982)	Área experimental na Amazônia	Relação entre a composição isotópica da chuva e o fracionamento isotópico dado pela floresta e pelo solo	^2H e ^{18}O
Matsui <i>et al.</i> (1983)	Amazônia	Caracterização isotópica espacial e temporal da chuva e do vapor d'água	^2H e ^{18}O
Leopoldo <i>et al.</i> (1984)	Laboratório	Estudo teórico da evapotranspiração	^2H e ^{18}O
Gonfiantin. (1985)	Regiões tropicais do mundo	Correlação entre os valores isotópicos da chuva e a circulação atmosférica	^2H e ^{18}O
Silva <i>et al.</i> (1985)	Aquífero Botucatu (bacia do Paraná)	Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica	^3H , ^2H , ^{18}O , ^{13}C e ^{14}C

Tabela 1 Listagem histórica simplificada dos principais estudos hidrológicos no Brasil que fizeram uso de isótopos ambientais

Publicação	Área de estudo	Objetivo do estudo	Isótopos utilizados
Kimmelman <i>et al.</i> (1986)	Aquífero Botucatu (bacia do Paraná)	Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica	^3H , ^2H , ^{18}O , ^{13}C e ^{14}C
Mortatti <i>et al.</i> (1987)	Amazônia	Analisar o comportamento espacial e sazonal do ^{18}O em rio	^{18}O
Kimmelman <i>et al.</i> (1987)	Águas de São Pedro - São Paulo	Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica	^2H e ^{18}O
Kimmelman <i>et al.</i> (1988)	Aquífero Botucatu (bacia do Paraná)	Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica	^2H , ^{18}O , ^{13}C e ^{14}C
Kimmelman <i>et al.</i> (1989)	Aquífero Botucatu (bacia do Paraná)	Caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica	^3H , ^2H , ^{18}O , ^{13}C e ^{14}C
Frischkorn <i>et al.</i> (1989)	Ceará	Caracterização hidrogeológica	^3H , ^{18}O e ^{14}C
Santiago <i>et al.</i> (1990)	Ceará	Caracterização hidrogeológica	^3H e ^{14}C
Silva <i>et al.</i> (1996)	Ceará	Caracterização hidrogeológica	^{14}C
Batista <i>et al.</i> (1998)	Piauí	Caracterização hidrogeológica	^2H e ^{18}O
Caneiro <i>et al.</i> (1998)	Piauí	Caracterização hidrogeológica	^2H e ^{18}O
Costa Filho <i>et al.</i> (1998)	Recife	Origem da salinidade da água subterrânea	^2H e ^{18}O

Tabela 1 (continuação) Listagem histórica simplificada dos principais estudos hidrológicos no Brasil que fizeram uso de isótopos ambientais

hidrológico, incluindo águas subterrâneas e expandindo a caracterização das águas superficiais. Nesta linha, destacam-se os trabalhos de Reis *et al.* (1977) em Marajó para caracterizar a influência das águas oceânicas e continentais na ilha; Matsui *et al.* (1980) em um primeiro levantamento de escala nacional de caracterização de ^2H em várias águas superficiais e subterrâneas; Leopoldo *et al.* (1982) correlacionando a composição isotópica da chuva, do solo e do igarapé em uma bacia de drenagem da floresta amazônica e Mortatti *et al.* (1987) que expandiu os trabalhos de Matsui *et al.* (1972) analisando a contribuição de vários rios tributários para o rio Solimões/Amazonas, o efeito da sazonalidade e da vazão na concentração de ^{18}O .

No sudeste do Brasil os estudos isotópicos em hidrologia iniciaram-se na década de 80, principalmente em São Paulo, onde o uso de águas subterrâneas no abastecimento estimulou a caracterização isotópica de grandes aquíferos, como o Botucatu (Silva *et al.*, 1985; Kimmelman *et al.*, 1986; Kimmelman *et al.*, 1988; Kimmelman *et al.*, 1989). No fim da década de 80 os estudos no Nordeste foram retomados e atualmen-

te têm o enfoque de caracterização dos aquíferos locais. Estudos hidrogeológicos recentes com isótopos estão principalmente concentrados nos aquíferos de São Paulo e do Nordeste (Tabela 1).

3 Caracterização Isotópica da Precipitação

Com o objetivo de monitorar a concentração dos isótopos ^2H , ^3H e ^{18}O na atmosfera a OIEA (Agência Internacional de Energia Atômica) mantém estações meteorológicas em várias partes do mundo. Com base nesta série temporal (até 1981) Gonfiantini (1985) analisou o comportamento isotópico da chuva em regiões tropicais e concluiu que as estações meteorológicas interiores são mais depletadas em isótopos pesados do que as costeiras. Além disso foi observada uma correlação negativa entre a quantidade de chuva e a concentração de ^{18}O na chuva.

A concentração isotópica da chuva depende, entre outros fatores, da origem do vapor d'água. Segundo Dall'Olio *et al.* (1979), com base em isótopos de ^{18}O da chuva da região amazônica, o processo de evapotranspiração da floresta é responsável por aproximadamente 50% do vapor d'água que forma a precipitação. Desta forma a floresta tem um papel fundamental no balanço hídrico da região sendo do ponto de vista hidrometeorológico a bacia amazônica não é homogênea isotopicamente (Salati *et al.*, 1979b). Ou seja, a reciclagem de água através do processo de evapotranspiração é maior na porção central e leste da bacia.

Embora na Amazônia a caracterização isotópica da chuva tenha sido alvo de muitos estudos, geralmente nos trabalhos hidrogeológicos brasileiros a reta meteórica mundial serve de base de comparação para evitar um adicional de amostragens (Silva *et al.*, 1985; Frischkorn *et al.*, 1989; Kimmelman *et al.*, 1986; Kimmelman *et al.*, 1989; Kimmelman *et al.*, 1988; Silva *et al.*, 1996).

4 Estudos de Evapotranspiração

Os estudos intensivos de caracterização isotópica da chuva na Amazônia originaram um modelo de fracionamento isotópico para a região Amazônica que considerava o efeito da

evapotranspiração da floresta Amazônica (Dall'Olio *et al.*, 1979; Salati *et al.*, 1979b). Seguindo esta discussão, sucederam-se estudos do fracionamento isotópico durante o processo de evapotranspiração (Leopoldo *et al.*, 1980 e Leopoldo *et al.*, 1984).

Com base em mensuração em laboratório de plantas irrigadas com soluções com diferentes valores de 2H e 18O, foi observado que a retenção de isótopos pesados segue a ordem: folha > raiz > água de irrigação. O enriquecimento em isótopos pesados foi maior no período diurno e diretamente proporcional à temperatura do ar atmosférico mas inversamente proporcional à umidade relativa (Leopoldo *et al.*, 1980). A manutenção do teor constante de 2H no solo demonstra uma ausência de fracionamento isotópico para solos de textura arenosa (Leopoldo *et al.*, 1980). Com base nesta linha de pesquisa Leopoldo *et al.* (1984) elaboraram um modelo teórico de estimativa da concentração de 2H nas folhas em função da temperatura e umidade relativas desta, e também em função dos valores de 2H e 18O na água do solo e no vapor d'água atmosférico.

5 Caracterização Isotópica da Água Subterrânea

Com o objetivo de discutir o uso de isótopos ambientais em trabalhos hidrogeológicos no Brasil, foram selecionadas três regiões (região Nordeste, região amazônica e bacia do Paraná), onde a utilização desta técnica foi mais frequente.

5.1 Região Nordeste

O Nordeste brasileiro engloba 10 estados em um total 1.606.000 Km² sendo que mais da metade desta área está incluída no "Polígono das Secas" caracterizado por clima semi-árido, baixa precipitação (valores mínimos podem chegar a 250 mm/ano), altas taxas de evapotranspiração, escassez de recursos hídricos, solos com baixa capacidade de infiltração e água subterrânea com alto conteúdo de sais (350-25.000 ppm de total de sais dissolvidos), segundo Salati *et al.* (1979a). Os estudos isotópicos da água subterrânea na região Nordeste do Brasil iniciaram-se com a preocupação de caracterizar e compreender os mecanismos de recarga dos principais aquíferos da região para fins de abastecimento (Gat *et al.*, 1968).

A reta meteórica local, obtida com várias estações meteorológicas da região foi:

$$\delta^2H = 10(\pm 2) + 8.2(\pm 0.8)\delta^{18}O \quad (2)$$

que é próxima da reta meteórica mundial (Fig. 1) (Salati *et al.*, 1979a).

A bacia Potiguar (principalmente a Formação Açú e o embasamento) foi uma das primeiras áreas investigadas para água subterrânea com o uso de isótopos (Ferreira de Melo *et al.*, 1969). Os resultados mostraram uma composição isotópica próxima à da chuva, indicando a origem meteórica para as águas subterrâneas (Ferreira de Melo *et al.*, 1969). A ocorrência do processo de evaporação foi verificada pelo aumento no conteúdo de isótopos pesados tanto na chuva como nas águas subterrâneas. Não foi observada uma correlação significativa entre o conteúdo de sais e a composição isotópica da água o que é um indicativo de que os mecanismos de mineralização são independentes dos mecanismos de recarga d'água no Nordeste brasileiro (Ferreira de Melo *et al.*, 1969). Salati *et al.* (1979a) e Frischkorn *et al.* (1989) também não observaram relação entre o tempo de residência das águas subterrâneas (por meio de isótopos ^{18}O , 3H , 2H e ^{14}C) e a salinidade destas. Estes resultados apontam para uma origem independente dos sais e da água subterrânea. Entre as hipóteses de explicação destaca-se a de uma transgressão marinha pretérita, a formação de sais por evaporação intensa ou ainda a influência dos ventos marinhos no carreamento de sais (Ferreira de Melo *et al.*, 1969).

Resultados de 3H e ^{14}C indicaram tempos de residência de 10 a 100 anos para os aquíferos cristalinos e de mais de 30.000 anos para os aquíferos sedimentares (Salati *et al.*, 1979a). Nas áreas sedimentares existem indícios (baixa composição isotópica em relação a chuva) de que estes aquíferos sofreram recarga por águas meteóricas antigas, em condições distintas das atuais, ou seja, um paleoclima (Salati *et al.*, 1979a).

Estudos mais recentes no Ceará (bacia do Cariri), onde o abastecimento hídrico é feito exclusivamente por água subterrânea, indicam uma diferenciação isotópica entre os aquíferos sedimentares profundos (Rio da Bateira e Missão Velha) e o aquífero dos aluviões (Silva *et al.*, 1996). Nos aquíferos Rio da Bateira e Missão Velha existe uma correlação negativa entre o conteúdo de ^{14}C e a condutividade elétrica. Segundo Silva *et al.* (1996) quanto menor o conteúdo de ^{14}C nestas águas (maior a idade da água, porque são anteriores às bombas nucleares), mais efetivo o processo de dissolução, aumentan

do a condutividade elétrica. Nos aluviões a correlação positiva foi associada à entrada de águas modernas com alta concentração de ^{14}C e também a lavagem de aerossóis do ar e do solo pela chuva e pelo escoamento, aumentando a condutividade elétrica (Silva *et al.*, 1996). Situação semelhante também foi observada para a Formação Pimenteiras na bacia Piauí-Maranhão (Batista *et al.*, 1998). O detalhamento da composição isotópica (^{14}C e ^3H) do aquífero Missão Velha permitiu reconhecer, na parte superior, idades até 3100 anos, e na parte inferior idades de 1900 a 9200 anos (Santiago *et al.*, 1990).

Estudos nos aquíferos sedimentares (sistema aquífero Cabeças) da bacia Piauí-Maranhão não identificam uma correlação entre idades mais antigas e o aumento da salinização porque de maneira geral as águas são pouco mineralizadas. Neste contexto, o parâmetro condutividade elétrica não fornece indícios da idade das águas (Carneiro *et al.*, 1998).

No Recife um uso recente de isótopos ambientais negou a salinização dos aquíferos costeiros pelo avanço da cunha salina. Segundo Costa Filho *et al.* (1998) a diferença isotópica (^{18}O e ^2H) entre a água subterrânea e a água do mar invalida a hipótese de intrusão marinha. Provavelmente os sais foram originados de um processo interno de dissolução e/ou mistura com águas marinhas provenientes de manguezais.

5.2 Região Amazônica

A bacia Amazônica tem 6.000.000 Km², com precipitação entre 2000 e 4200 mm por ano (Salati *et al.*, 1979b). Nesta região os trabalhos de caracterização hidrogeológica com isótopos são ainda incipientes e muitas vezes associados ou derivados de trabalhos de composição isotópica dos principais rios (Reis *et al.*, 1977; Leopoldo *et al.*, 1982).

Na ilha de Marajó, com base na caracterização isotópica da chuva, de poço, de rios e do mar foi sugerido que as águas do Amazonas (isotopicamente mais leves que as do mar e do rio Tocantins) têm influência até o sul da ilha. Além disso, em toda a orla da ilha a relação $d^2\text{H} \times d^{18}\text{O}$ para as águas está sobre a reta meteórica, não evidenciando grande contribuição da água marinha. No interior da ilha a evaporação é um processo relevante (Reis *et al.*, 1977).

Em uma pequena bacia de drenagem na floresta a reta obtida para os valores de ^{18}O e ^2H na chuva, precipitação interna e água do solo indicaram que não ocorre um fracionamento significativo entre estes processos. O empobrecimento da água do igarapé foi relacionado a mistura de água da chuva (mais enriquecida em isótopos pesados) com água com tempo de residência maior no solo (mais empobrecida em isótopos pesados) (Leopoldo *et al.*, 1982). Este trabalho foi um dos pioneiros na caracterização isotópica de várias etapas do ciclo hidrológico como um indicativo dos processos de transporte da água no solo até o rio.

5.3 Bacia do Paraná

O aquífero Botucatu (Formação Botucatu) é o mais importante na bacia do Paraná. A sua extensão (818.000 Km² no Brasil) e o seu uso, principalmente em São Paulo, no abastecimento justificaram vários trabalhos de caracterização hidrogeológica. Na região também destacam-se os aquíferos do Grupo Tubarão (Formação Tatuí e Formação Itararé) que também foram alvo de estudos isotópicos.

O aquífero Botucatu é confinado na maior parte da sua extensão, estando sob os basaltos da Formação Serra Geral, sendo livre apenas nas bordas da bacia (Kimmelman *et al.*, 1986). As maiores espessuras ocorrem no centro da bacia e alguns dados relacionados a caracterização físico-química deste aquífero são apresentados de forma sintética na Tabela 2.

Com base em uma amostragem de 20 poços (Silva *et al.* 1985), que foi expandida para 30 poços (Kimmelman *et al.*, 1986) e posteriormente para 40 poços (Kimmelman *et al.*, 1989) em várias porções do aquífero (São Paulo, Paraná, Goiás, Mato Grosso do Sul, Santa Catarina e Rio Grande do Sul), a água subterrânea foi caracterizada isotopicamente como originada por infiltração da precipitação nas áreas aflorantes. Esta conclusão foi subsidiada pelo fato das amostras de água subterrânea caírem em uma reta muito próxima da reta meteórica mundial para ^{18}O e ^2H (Fig. 2). Com o aumento do tempo de residência no aquífero (aumento das condições confinantes) as águas ficam mais mineralizadas (Kimmelman *et al.*, 1986). As águas das porções mais confinadas são preferencialmente bicarbonatadas sódicas, tem temperatura mais elevada, e resíduo seco maior (Kimmelman *et al.*, 1986). Neste contexto os isótopos

Parâmetro	Valor
Espessura (m)	300
Porosidade efetiva (%)	10 - 20
Permeabilidade	$2,4 \times 10^{-6}$ - $4,5 \times 10^{-5}$
Transmissividade (m ² /s)	$4,7 \times 10^{-4}$ - $1,5 \times 10^{-2}$ (10 ⁻³)
Capacidade específica (m ³ /h/m)	1 - 23 (10-15)
Coefficiente de armazenamento	4×10^{-5} - 2×10^{-4}
Temperatura (°C)	22 - 61
pH	5,40 - 10,35
Total de Sólidos Dissolvidos (TSD) (mg/l)	31 - 650
Classificação da água	bicarbonatadas magnesianas ou mistas (onde o aquífero é menos confinado) - bicarbonatadas sódicas e cloretadas-sulfatadas sódicas (onde o aquífero é mais confinado)

Tabela 2 Principais parâmetros hidrogeológicos e hidrogeoquímicos do aquífero Botucatu. Em parênteses estão os valores mais freqüentes (modificado de Kimmelman *et al.*, 1989).

também indicaram uma gradação entre as águas de menor confinamento (valores de ²H e ¹⁸O menos negativos) para as de maior confinamento (valores de ²H e ¹⁸O mais negativos, mais depletados) sugerindo a existência variações climáticas pretéritas (Kimmelman *et al.*, 1986). Dados de ¹³C também distinguem as áreas mais confinadas (valores menos negativos) das áreas de recarga e/ou menos confinadas (valores mais negativos em função da interação com a biota). Datação destas águas por ¹⁴C e ³H confirmaram idades variadas entre as bordas norte e oeste da bacia (Goiás e Mato Grosso do Sul) que são de 500 a 2.000 anos até a borda leste (São Paulo e ao longo da calha do rio Paraná) que chegam até 38.000 anos. Segundo Kimmelman *et al.* (1988) com base em ³H e ¹⁴C, o aumento da idade das águas deste aquífero é gradual das áreas aflorantes para a parte central da bacia, seguindo o sentido da calha do rio Paraná, acompanhando as direções de escoamento subterrâneo e o confinamento progressivo do aquífero.

Região	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Idade por 3H e 14C	Observações
Chuva	- 6,4 (Cuiabá) - 4,85 (PortoAlegre) - 7,1 (São Paulo)	-	-	
Porção Nordeste da bacia	-8,1 à -9,6	-56 à -67	17.000 à 38.000 anos	valores de ^{18}O e ^2H muito depletados indicando um possível paleoclima durante a época de recarga
Porção Noroeste da bacia	-5,7 à -6,8	-32 à -47	moderna à 3.124 anos	valores similares ao da chuva, indicando condições pouco ou não confinantes
Parte central da bacia	-6,6 à -8,7	-42 à -59	recente	aquífero confinado, porém pode ter sofrido recarga recente
extremo sudeste da bacia	-4,8 à -6,2	-28 à -40	na maior parte das amostras idade recente	aquífero não confinado e pouco confinado
Extremo sudoeste	-5,3 à -6,0	-32 à -47	mistura de água nova e velha com idade média de 18.000 anos	aquífero não confinado e pouco confinado

Tabela 3 Caracterização isotópica da chuva e do aquífero Botucatu (bacia do Paraná) por região (modificado de Kimmelman *et al.*, 1989).

Uma linha de 30.000 - 38.000 anos pode ser feita na porção central e mais confinada da bacia. Na Tabela 3 são apresentados os principais resultados isotópicos relativos ao aquífero Botucatu, por região.

Nas áreas mais confinadas da bacia uma anomalia de flúor pode ser correlacionada com a idade mais elevada do aquífero (Kimmelman *et al.* 1988). Kimmelman *et al.* (1989) sugerem que o flúor possa ser originário da percolação de água pelo basalto, o que explicaria a relação entre a concentração deste elemento e a idade das águas.

A análise isotópica de águas subterrâneas dos aquíferos do Grupo Tubarão (Formação Itararé e Formação Tatuí) indica uma recarga por origem meteórica atual (Kimmelman e Silva *et al.* (1987).

6 Considerações Finais

Apesar do aumento verificado nos últimos anos do uso de isótopos ambientais em estudos hidrogeológicos esta técnica ainda não se popularizou no Brasil. Basicamente, o uso de isótopos restringe-se a datação das águas, sendo poucos os estudos como traçadores do fluxo e do comportamento da recarga de água subterrânea. A escassa utilização desta técnica no Brasil tem duas razões principais: a primeira é a concentração isotópica relativamente baixa de ^3H e ^{14}C no hemisfério sul, devido aos padrões globais de circulação atmosférica associados à quase ausência de testes nucleares neste hemisfério. Nestas condições, o método analítico deve apresentar um limite de detecção baixo, próximo ao background correspondente ao ^{14}C e ^3H cosmogênicos, restringindo sobremaneira seu uso como traçador. Outro fator restritivo ao uso de isótopos é o custo elevado das análises, associado à escassa existência de laboratórios equipados para esta técnica no Brasil. Até há pouco tempo, só se dispunha em nosso país de escassos laboratórios capacitados a realizar estas análises isotópicas ambientais. Diante desta realidade, uma iniciativa valiosa é a manutenção das estações meteorológicas da OIEA (Agência Internacional de Energia Atômica) de medição de isótopos na chuva.

Há uma tendência desta situação de uso restrito das técnicas tratadas modificar-se nos próximos anos, pela ampliação da base laboratorial disponível no Brasil e pela maior facilidade no envio de amostras para a realização de ensaios no exterior, onde vários laboratórios (inclusive o laboratório da OIEA em Viena) oferecem preços e prazos freqüentemente competitivos e vantajosos. Esta ampliação do emprego das técnicas isotópicas ambientais também é impulsionada pelo crescente interesse em estudos hidrogeológicos de contaminação em zonas urbanas, industrial e agrícola, pois as técnicas isotópicas ambientais têm ampla utilização potencial em tal categoria de estudos.

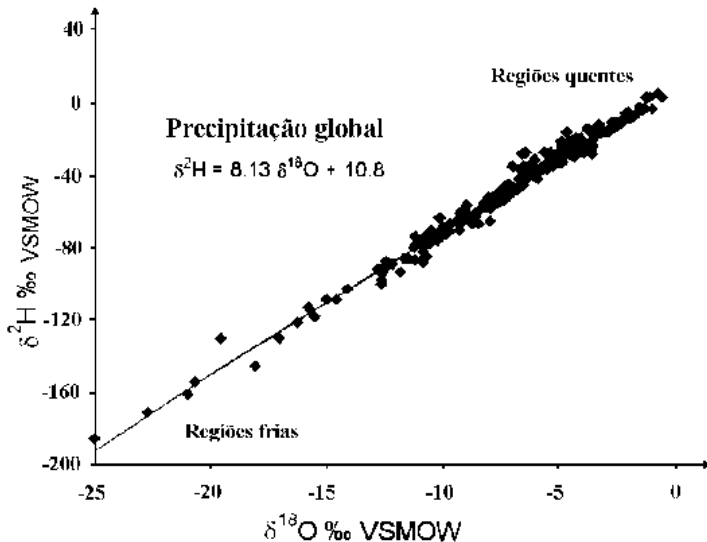


Figura 1 Reta meteórica mundial mostrando a relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ na chuva. Os valores mais enriquecidos em $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são representativos da precipitação nas regiões mais quentes do mundo (modificado de Clark & Fritz, 1997).

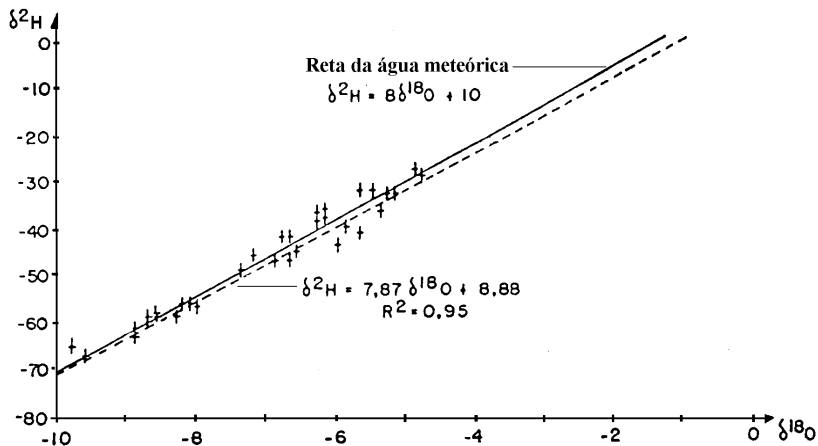


Figura 2 Relação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ para as águas subterrâneas do aquífero Botucatu. A reta de regressão (- - -) é próxima da reta meteórica mundial (- -) evidenciando que a recarga ocorre principalmente por infiltração da precipitação (modificado de Kimmelman *et al.*, 1989).

7 Referências

- Batista, J.R.X.; Santiago, M.M.F.; Frischkorn, H.; Mendes Filho, J. & Foster, M. 1998. Isótopos ambientais na água subterrânea de Picos - PI. *In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10, 1998, São Paulo. CD-ROM. São Paulo, ABAS.
- Campos, M.M. 1971. Levantamento preliminar de teores de trítio em águas do Nordeste brasileiro. Relatório do IPR, Belo Horizonte. 10p.
- Carneiro, C.E.C.D.; Santiago, M.M.F.; Frischkorn, H.; Mendes Filho, J. & Foster, M. 1998. Oxigênio-18, Deutério e condutividade elétrica para caracterização da água subterrânea no vale do Gurguéia. *In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10., 1998, São Paulo. CD-ROM. São Paulo, ABAS.
- Clark, I. & Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. New York, CRC Press. 328p.
- Costa Filho, W.D.; Santiago, M.M.F; Costa, W.D. & Mendes Filho, J. 1998. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife. *In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 10, 1998, São Paulo. CD-ROM. São Paulo, ABAS.
- Dall'olio A.; Salati, E.; Azevedo, C.T. & Matsui, E. 1979. Modelo de fracionamento isotópico da água na bacia Amazônica (Primeira aproximação) *Acta Amazonica*, 9: 675-687.
- Ferreira de Melo, F.A.; Rebouças, A.C.; Gat, J.R. & Mazon, E. 1969. Preliminary Isotope survey of water sources in Northeastern Brazil. SUDENE, Spec. Report 18p.
- Frischkorn, H.; Santiago, M.F. & Serjo, A.N. 1989 Isotope study of wells in crystalline rock of the semi-arid northeast of Brazil. *In: REGIONAL SEMINAR FOR LATIN AMERICA ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN HYDROLOGY*, 1989, Ciudad de México. Abstracts... Ciudad de México, OIEA, p. 73-89.
- Fritz, P. & Fontes, J. Ch. (eds.) 1980. *Handbook of environmental isotope geochemistry*. Elsevier, Amsterdam. 322 p.
- Gat, J.R.; Mazon, E. & Mercado, A. 1968. Aplicações potenciais de técnicas isotópicas e geoquímicas aos problemas hidrológicos do Nordeste brasileiro. *Relatório à Comissão de Energia Atômica e à SUDENE*. 28p.
- Gat J.R. & Gonfiantini, R. 1981. Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. Vienna. OIEA. (Techn. Report series N° 210).
- Gonfiantini, R. 1985. On the isotopic composition of precipitation in tropical stations *Acta Amazonica*, 15: 121-139.
- Kimmelman, A.A.; Silva, R.B.G; Rebouças, A.C. & Santiago, M.M.F. 1986. Hidrologia isotópica e química do aquífero Botucatu - Bacia do Paraná - Brasil. *In: CONG.*

- BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 4, 1986, Brasília, DF. Anais. Brasília, ABAS, p. 1-25.
- Kimmelmann E Silva, A.A.; Yoshinaga, S.; Murakami, H.; & Mattos, J.A. 1987. Novos aspectos hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos das águas termominerais de Águas de São Pedro no estado de São Paulo. *In: SIMP. BRAS. REC. HÍDRICOS*, 7, 1987, Salvador. *Anais*. Salvador, ABRH. p. 26-35.
- Kimmelmann, A.A.; Rebouças, A.C. & Santiago, M.M.F. 1988. ¹⁴C dating of the Botucatu aquifer system in Brazil. *In: INST. RADIOCARBON CONF.*, 13 Dubrovnik, Iugoslávia. *Abstracts*. Dubrovnik, p. 110.
- Kimmelmann E Silva, A.A.; Rebouças, A.C.; Santiago, M.M.F. & Silva, R.B.G. 1989. Isotopic study of the Botucatu aquifer system in the Brazilian portion of the Paraná basin. *In: REGIONAL SEMINAR FOR LATIN AMERICA ON THE USE OF ISOTOPE TECHNIQUES IN HYDROLOGY*, 1989, Ciudad de México. *Abstracts*. Ciudad de México, OIEA, p. 51-71.
- Leopoldo, P.R.; Matsui, E.; Sousa, A.P. & Salati, E. 1980. Fracionamento isotópico aplicado ao estudo de evapotranspiração. *Energia Nuclear e Agricultura*, 2: 57-70.
- Leopoldo, P.R.; Matsui, E.; Salati, E.; Franken, W. & Ribeiro, M.N.G. 1982. Composição isotópica da água de chuva e da água do solo em floresta amazônica do tipo terra firme, região de Manaus. *Acta Amazonica*, 12: 7-13.
- Leopoldo, P.R.; Matsui, E.; Foloni, L.L. & Salati, E. 1984. Variação dos valores de δD e $\delta^{18}O$ em água de folha durante o processo de evapotranspiração. *Energia Nuclear e Agricultura*, 6: 3-18.
- Matsui, E.; Salati, E.; Brinkmann, W.L.F. & Friedman, J. 1972. Vazões relativas dos rios Negro e Solimões através das concentrações de ^{18}O . *Acta Amazonica*, 2: 31-46.
- Matsui, E.; Azevedo, C.T. & Salati, E. 1980. Distribuição de deutério (2H) nas águas superficiais e subterrâneas no Brasil. *Energia Nuclear e Agricultura*, 2: 149-165.
- Matsui, E.; Salati, E.; Ribeiro, M.N.G.; Reis, C.M.; Tancredi, A.C.S.N.F. & Gat, J.R. 1983. Precipitation in the Central Amazon basin: - The isotopic composition of rain and atmospheric moisture at Belém and Manaus. *Acta Amazonica*, 13: 307-369.
- Mortatti, J.; Martinelli, L.A.; Matsui, E.; Victoria, R.L. Richey, J.E. 1987. Isotopic variation of oxygen in the water of river Solimões/Amazon and its main tributaries. *Energia Nuclear e Agricultura*, 8: 14-23
- Prado, E.B. & Bedmar, A.P. 1976. Aportación de diversas técnicas isotópicas al estudio hidrogeológico de la cuenca de Maranhão (Brasil). *Hidrologia*, abril-julio: 65-79.
- Reis, C.M.; Tancredi, A.C.F.N.S.; Matsui, E. & Salati, E. 1977. Caracterização das águas da região de Marajó através de concentrações de $O-18$ e D . *Acta Amazonica*, 7: 209-222.

- Salati, E.; Leal, J.M. & Campos, M.M. 1979a. *Isótopos ambientais aplicados a um estudo hidrogeológico do Nordeste brasileiro*. Recife, SUDENE. Série Hidrogeologia, nº 58. 55p.
- Salati, E.; Dall'olio A.; Matsui, E. & Gat, J.R. 1979b. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. *Water Resources Research*, 15: 1250-1258.
- Santiago, M.F.; Frischkorn, H. & Serejo, A.N. 1990. Estudo isotópico das águas do Cariri. *In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 4, 1986, Porto Alegre. *Anais*. Porto Alegre, ABAS, p.338-342.
- Silva, R.B.G.; Kimmelman, A.A. & Rebouças, A.C. 1985. Estudo hidrogeoquímico e isotópico das águas subterrâneas do aquífero Botucatu - resultados parciais para a região norte da bacia do Paraná. *In: SIMP. REG. DE GEOLOGIA*, 5, 1985, São Paulo. *Atas São Paulo*. v.2, p.489-502.
- Silva, C.M.S.V.; Santiago, M.F.; Frischkorn, H & Mendes Filho, J. 1996. Distinção entre águas dos aluviões e águas profundas nos municípios de Crato e Juazeiro do Norte - CE. CD-ROM. *In: CONG. BRAS. ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 9, 1996, Salvador. CD-ROM São Paulo, ABAS.