

CARACTERIZAÇÃO ISOTÓPICA DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS DA ILHA DE SÃO LUÍS/MA-BRASIL

Lucilene Pereira¹; Maria Marlúcia Freitas Santiago¹; Luiz Alberto Ribeiro Mendonça¹;
Horst Frischkorn² & Josué Mendes Filho¹

Resumo - Foram utilizadas medidas dos isótopos estáveis oxigênio-18 e deutério e de condutividade elétrica de 31 poços localizados na cidade de São Luís/Maranhão, para identificar a origem das águas subterrâneas. A faixa de condutividade elétrica foi de 40 a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ que indica baixa dissolução de sais ocasionada pela alta pluviosidade local (2000 mm/ano). Foi feita uma comparação entre $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e o excesso de deutério nas águas subterrâneas locais com as da Finlândia, de Recife/PE, de Picos/PI, do Vale do Gurguéia/PI, da Chapada do Araripe-CE/PE e do Vale do Cariri/CE, e também, nas águas de chuvas em Belém/PA Manaus/AM e Caiena, na Guiana Francesa. A comparação entre estes parâmetros mostra que (a) as condições climáticas e geográficas determinam a composição isotópica das águas e (b) a recarga do aquífero Itapecuru (na Ilha de São Luís) ocorre através de eventos pluviométricos mais intensos.

Abstract - Measurements of steady isotopes oxygen-18 and deuterium and of electrical conductivity were carried out in water samples from 31 wells, located in Island of São Luís-Maranhão. The goal of this study is to identify the groundwater origin. The electrical conductivity values were found to be within the 40 - 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ range, thereby indicating low dissolution of salts caused by the high intensity of the local rainfall (2000 mm/year in average). By comparing the local meteoric straight line and the excess deuterium in Finlandia, Recife/PE, Picos/PI, Gurgueia Valley/PI, Araripe Plateau – CE/PE and Cariri Valley/CE, and rainfall in Belem/PA, Manaus/Am and Caiena, in the France Guiana allowed us to conclude: (a) climatic and geographic conditions determine the isotopic composition of the groundwater, and (b) the recharge of Itapecuru aquifer (in the Island of São Luis) is due to the high intensity of the local rainfall.

Palavras-chaves – Isótopos ambientais, água subterrânea, excesso de deutério.

¹ Departamento de Física da UFC, Tel.: (0xx85) 288.9913, Fax: (0xx85) 288.9450, e-mail: marlucia@fisica.ufc.br

² Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC, Caixa Postal 6018, CEP 60451-970, Fortaleza, CE, Tel.: (0xx85) 288.9775, Fax: (0xx85) 288.9627, e-mail: cariri@ufc.br

INTRODUÇÃO

Na Ilha de São Luís/MA ainda são poucos os conhecimentos sobre a sua geologia e seus recursos hídricos subterrâneos, mas há uma preocupação das autoridades locais para colocar em prática projetos que controlem a perfuração desenfreada de poços que põe em risco a qualidade das águas subterrâneas e a saúde da população.

A preocupação com o controle das águas aumenta pelo fato de São Luís ser uma ilha, onde a salinização pela mistura com água do mar pode ser provocada por bombeamento excessivo. Os órgãos governamentais como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), a Gerência Adjunta de Meio Ambiente (GAMA) e o Instituto Municipal de Controle Ambiental (IMCA) estão atuando para licenciar, fiscalizar e gerenciar os recursos naturais de São Luís. O primeiro processo seria produzir um diagnóstico ambiental e em seguida, fazer um levantamento cartográfico com o geoprocessamento de toda a ilha. No entanto, se esse processo fosse implantado hoje, ainda levaria pelo menos uns dez anos para mostrar resultados nítidos. Só para dar um exemplo: há somente 214 poços cadastrados pela companhia de água local (CAEMA), e segundo empresas perfuradoras, o número de poços perfurados na ilha chega a 4.000.

Este trabalho é uma contribuição para identificação da qualidade e condições de recarga das águas subterrâneas na Ilha de São Luís usando a técnica moderna dos isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério e medidas de condutividade elétrica.

As análises isotópicas de 31 poços, localizados na região metropolitana, foram utilizadas para identificar a origem das águas coletadas. Os resultados são comparados com águas subterrâneas da Finlândia, Recife/PE, Vale do Gurguéia-Picos/PI, Chapada do Araripe-CE/PE e Vale do Cariri/CE, e com águas de chuva de Belém, Manaus e Caiena.

LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

A Ilha de São Luís (Figura 1), capital do Estado do Maranhão, situa-se na região nordeste do Brasil e é delimitada pelos meridianos 44°22'37" a 44°11'11" de longitude oeste de Greenwich e pelos paralelos 2°45'02" a 2°27'11" de latitude sul. Ocupa 905 km² e tem cerca de 855.442 habitantes (IBGE/2000) e se liga ao continente pela ponte sobre o Estreito dos Mosquitos [1].

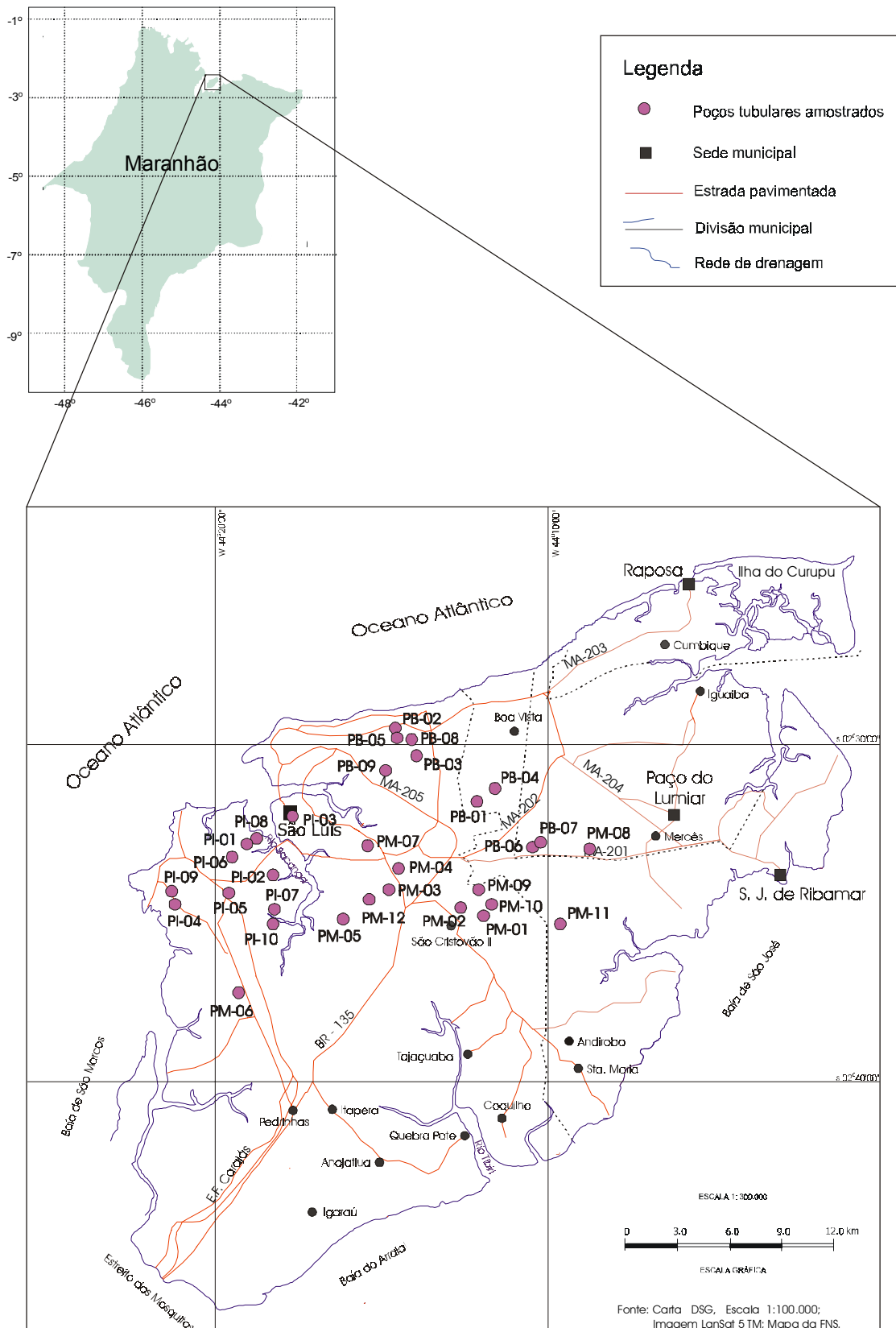


Figura 1. Localização da Ilha de São Luís e dos poços amostrados (Fonte: Embrapa – Mapa modificado).

ASPECTOS GEOLÓGICOS

A Ilha de São Luís situa-se na Bacia Cratônica de São Luís formada ao longo dos períodos Cretáceo e Quaternário - entre 1 e 135 milhões de anos - constituída, principalmente, pelas formações geológicas Itapecuru e Barreiras. Formada por um *graben* alongado de 15.000 km², esteve sob influência de esforços tectônicos e de sucessivas transgressões e regressões marinhas, com deposição, em distintos períodos, seqüências de estratos e camadas sedimentares, com uma espessura de 4.500 m dos quais 2.500 m são do Cretáceo Inferior e Médio [2]. As formações mais importantes são a Açuí, a Barreiras e a Itapecuru.

A Formação Açuí, do Quaternário, é constituída por depósitos aluvionares, dunas e solo laterítico. Os depósitos aluvionares são sedimentos heterogêneos, com mistura de detritos de granulometria variável, desde areia fina até seixos. As dunas são de areias quartzosas bem classificadas, desagregáveis, com pequena fração argilosa; o solo laterítico tem coloração vermelha-escura a preta com blocos de cimento ferruginoso e matriz quartzosa.

A Formação Barreiras, do Terciário, ocupa, essencialmente, todo o domínio continental de São Luís e é constituída de sedimentos clásticos mal selecionados variando de siltitos a conglomerados. As cores variam de creme a róseo/avermelhados dependendo do local. Os arenitos, em geral, são caulínicos com lentes de folhelhos. Suas espessuras variam de 50 a 145 metros, no sentido de oeste para leste da Ilha de São Luís.

A Formação Itapecuru, do Cretáceo Superior, é constituída por rochas de idade cretácea, quase exclusivamente, de arenitos de cores diversas, predominando o cinza, o róseo e o vermelho, finos, argilosos, com estratificações cruzadas e salicificações, principalmente no topo. Intercalam-se leitões de siltitos e folhelhos cinza-esverdeados. Em algumas áreas, aparece um conglomerado basal contendo seixos de basalto alterado. Na bacia Cratônica de São Luís foram acumulados mais de 2000 m de sedimentos da Formação Itapecuru como resultado da subsidência ao longo das falhas que limitam a fossa tectônica.

ASPECTOS HIDROGEOLÓGICOS

O sistema hidrogeológico de São Luís abrange toda a sua superfície da ilha e constitui-se de dois aquíferos: um livre, denominado de Aquífero Barreiras com espessura variando de 15 a 80 m e litologia composta, a partir da base, por arenitos e argilitos continentais e, no topo, por areias brancas quartzosas. É a unidade geológica mais promissora à captação de água subterrânea.

O outro constituinte desse sistema é o aquífero confinado denominado de Aquífero Itapecuru, composto por uma seqüência de sedimentos clásticos finos predominantemente arenosos, com interdigitações de argilas e siltitos na parte superior. A partir dos 40 m de profundidade, apresenta uma espessura variando de 20 a 95 m. Encontra-se confinado entre as seqüências

predominantemente argilosas. A camada argilosa da base com cerca de 100 m de espessura constitui uma barreira praticamente impermeável, protegendo o aquífero dos riscos de contaminação pelas águas salgadas que saturam o horizonte arenoso encontrado logo abaixo [2].

MEDIDAS ISOTÓPICAS

Os resultados das medidas dos isótopos oxigênio-18 e deutério são expressos em “delta por mil”, que representa a diferença relativa entre as razões isotópicas ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ou $^2\text{H}/^1\text{H}$) na amostra e as razões isotópicas em um padrão internacional (VSMOW), sendo definido, como:

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \frac{\left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\right)_{\text{amostra}} - \left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\right)_{\text{padrão}}}{\left(^{18}\text{O}/^{16}\text{O}\right)_{\text{padrão}}} \times 10^3$$

para o caso do oxigênio-18.

Analisando mais de 400 amostras de rios, lagos e chuva que não sofreram evaporação excessiva, Craig [3] verificou que os conteúdos de ^{18}O e ^2H , em relação ao SMOW, variavam de acordo com uma relação conhecida como Reta Meteórica Mundial,

$$\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$$

Águas que sofrem processo de evaporação tornam-se mais ricas em deutério e em oxigênio-18 e a reta de correlação entre $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ apresenta um coeficiente angular, normalmente em torno de 5. A relação entre estes dois parâmetros é conhecida como Reta de Evaporação.

Quando o aquífero é recarregado por rios, lagos, barragens ou canais, sua composição isotópica pode ser muito diferente da composição da chuva na área que satisfaz a uma equação do tipo da Reta Meteórica Mundial. Geralmente, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são mais altos, o que pode servir para identificar sua origem, pois a composição isotópica da água não é alterada durante a sua permanência no aquífero desde que não exista mistura com outras águas. O oxigênio-18 interage com o oxigênio dos minerais do terreno mas não sofre modificação isotópica ainda que a temperatura seja elevada como em certas águas hidrotermais profundas. No entanto, neste caso o deutério é alterado.

Um outro importante parâmetro para identificar a origem das águas é o excesso de deutério, que é controlado por efeitos cinéticos associados com a evaporação da água na superfície dos oceanos e é definido por:

$$d = \delta^2H - 8 \delta^{18}O$$

Este parâmetro é calculado para cada amostra e o excesso de deutério para uma determinada região é obtido pela média aritmética do conjunto de amostras.

O excesso de deutério de amostras coletadas próximas à costa é menor que +10‰ e aproximadamente 0‰ na Antártica. Em áreas onde a umidade relativa é um pouco maior que acima do oceano, d é maior que +10‰. Por exemplo, d = +22‰ no leste do Mediterrâneo [4].

O aumento no excesso de deutério de amostras de chuva pode ser decorrente da umidade reevaporada do litoral em relação ao vapor d'água de regiões afastadas, ou seja, em águas sob evaporação intensa os efeitos cinéticos são muito fortes.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tabela 1 apresenta os valores de condutividade elétrica (CE), de oxigênio-18 e de deutério nas primeira e segunda coletas de águas subterrâneas feitas nos meses de abril e de novembro de 2001, respectivamente.

A faixa de valores para a condutividade elétrica, na primeira coleta (período chuvoso), é de 40 a 1200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, enquanto que na segunda coleta (período seco), os valores ficaram entre 45,6 e 1145 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como a condutividade elétrica mede a concentração de sais dissolvidos, vê-se que as águas eram pouco mineralizada. Estes resultados são esperados pela alta pluviosidade local, em torno de 2000 mm/ano, e pela geologia local constituída por sedimentos.

Os poços que exploram o aquífero Barreiras apresentaram os menores valores de CE indicando rápidas recargas pelas águas das chuvas. Já os poços que exploram o aquífero Itapecuru têm mais elevados valores de CE e o maior valor foi encontrado no poço PI-04 que apresentou 1200 e 1146 $\mu\text{S}/\text{cm}$, na primeira e segunda coletas, respectivamente.

A diferença da CE deste poço e a dos demais poderia indicar mistura com água do mar provocada por bombeamento excessivo, mas os valores $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ são bem diferentes da água do mar, que são 0‰.

Tabela 1: Oxigênio-18, deutério e condutividade elétrica nas águas subterrâneas nas duas coletas.

PI: poço no Aquífero Itapecuru; PB: poço no Aquífero Barreiras; PM: poço com a mistura dos dois aquíferos.

1ª Coleta – abril/2001					2ª Coleta – nov/2001				
Poço	R.G.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Poço	R.G.	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^2\text{H}$ (‰)	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
PI-01	3445	-3,68		460	PI-01	3514	-3,79		464
PI-02	3446	-4,01	-26,65	610	PI-02	3515	-3,82	-22,03	733
PI-03	3449	-3,59		530					
PI-04	3444	-4,33	-29,17	1200	PI-04	3516	-3,85	-25,21	1146
PI-05	3442	-3,82		650	PI-05	3517	-3,86		675
PI-06	3447	-3,66	-24,05	400	PI-06	3518			451
PI-07	3443	-4,18	-29,90	360	PI-07	3519	-4,46	-27,14	385
					PI-08	3520	-3,60	-18,86	507
					PI-10	3522	-4,58		415
PM-01	3438	-3,67	-24,4	40	PM-01	3523	-3,52		52,5
PM-02	3439	-3,57		67					
PM-03	3432	-3,41		107					
PM-04	3436	-3,31		96					
PM-05	3433	-3,99		240	PM-05	3525	-4,31		306
PM-06	3448	-3,15	-20,45	143	PM-06	3526	-3,37		137
PM-07	3437	-3,50	-24,01	490					
PM-08	3440	-3,60		76					
					PM-11	3530	-3,64	-20,73	133
					PM-12	3531	-4,33	-26,43	389
PB-01	3434	-3,67		83					
PB-02	3431	-3,60		79					
PB-03	3430	-3,72	-24,16	67	PB-03	3534	-3,63		121,7
PB-04	3435	-3,67	-22,85	163	PB-04	3535	-4,03		85,1
PB-05	3441	-3,42	-22,46	80					
					PB-07	3538	-3,78	-21,49	45,6
					PB-08	3539	-3,54	-20,90	83,2

A Tabela 1 mostra que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ estão na faixa de -4,18 a -3,31‰ na primeira coleta e de -4,58 e -3,15‰ na segunda coleta. Mostra, também, que os valores mais baixos correspondem à águas armazenadas no aquífero Itapecuru. As faixas de $\delta^2\text{H}$ para a primeira e segunda coletas são, respectivamente, -29,9 a -20,45‰ e -27,14 a -18,86‰. Como este aquífero é confinado, a sua recarga deve ocorrer com chuvas mais intensas.

Os parâmetros condutividade elétrica versus $\delta^{18}\text{O}$ separam as amostras dos aquíferos, Barreiras e Itapecuru. (Figura 2). No primeiro aquífero estão as amostras de menores condutividades elétricas e $\delta^{18}\text{O}$ acima de -4,0‰; no segundo, estão as amostras com CE relativamente mais elevadas e parte delas têm valores abaixo de -4,0‰. Este comportamento é apresentado nas duas coletas, a do período chuvoso e a do período seco.

Esta identificação dos aquíferos, feita através dos dois parâmetros CE e $\delta^{18}\text{O}$, foi utilizada por Santiago et al. [5] para separar as águas subterrâneas nas Formações Rio da Batateira, Missão Velha e Mauriti da Bacia Sedimentar do Araripe.

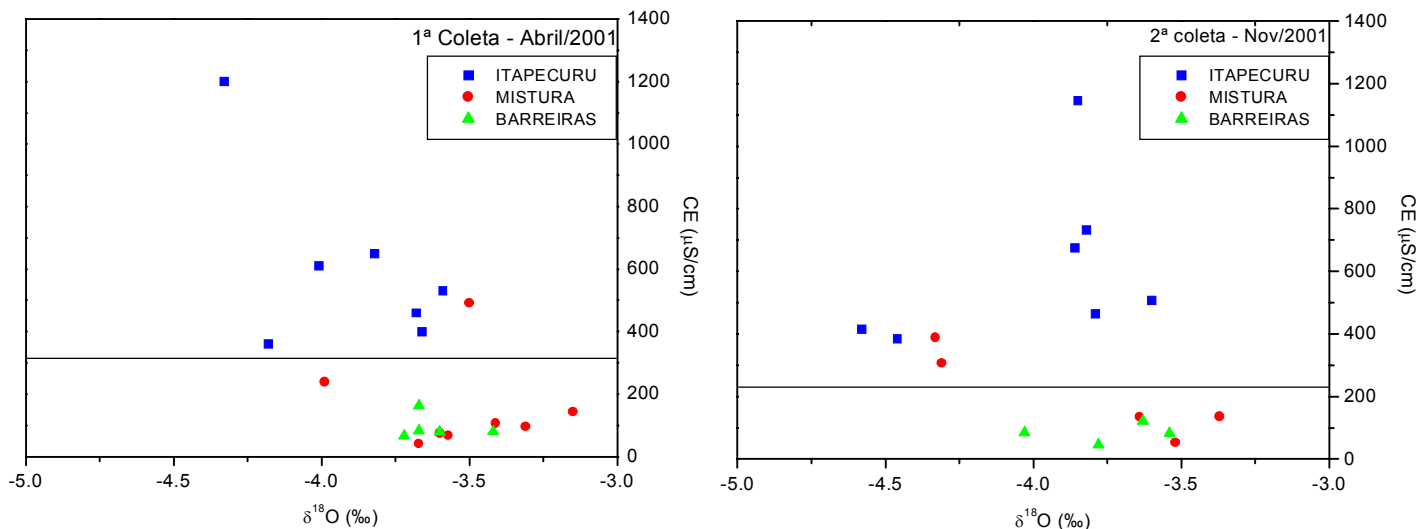


Figura 2. Oxigênio-18 versus condutividade elétrica das águas subterrâneas da 1ª coleta (período chuvoso) e da 2ª coleta (período seco).

$\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ para as duas coletas é mostrado na Figuras 3. Para a primeira coleta, os valores pertencem à reta $\delta^2\text{H} = 7,96 \delta^{18}\text{O} + 4,90$ e para a segunda coleta, a reta é $\delta^2\text{H} = 8,08 \delta^{18}\text{O} + 8,47$. Os coeficientes angulares destas retas são próximos aos da reta meteórica mundial $\delta^2\text{H} = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, indicando que são águas de chuvas formadas em condições de equilíbrio e sem evaporação durante a queda das gotas.

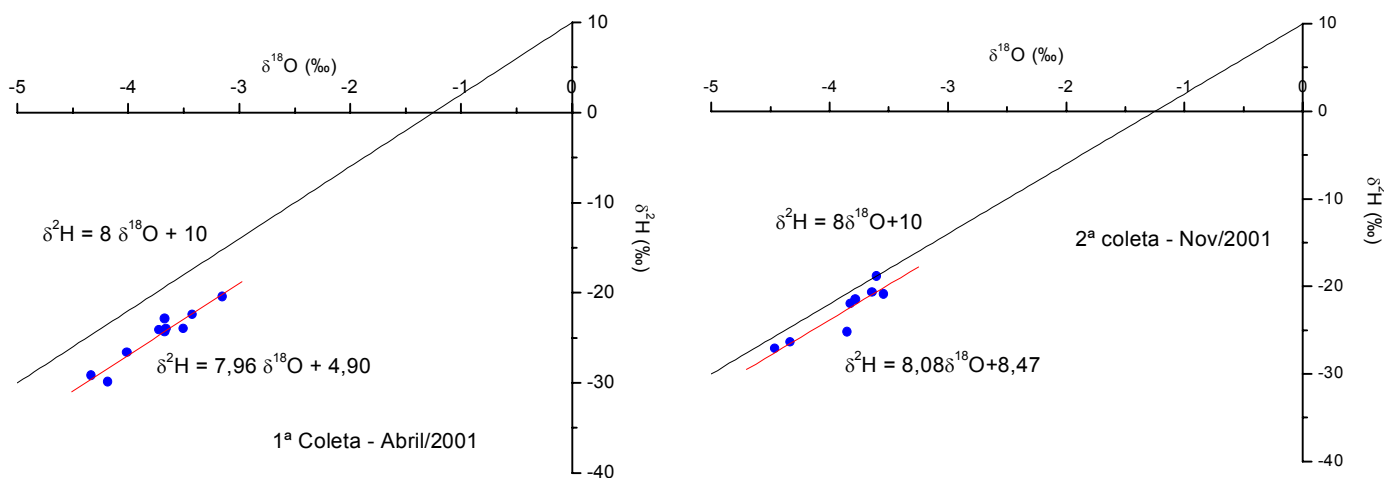


Figura 3. Oxigênio-18 versus deutério nas águas subterrâneas da 1ª coleta (período chuvoso) e da 2ª coleta (período seco).

Em um estudo isotópico das águas subterrâneas na Finlândia feito por Kortelain [6], foram analisadas 980 amostras que produziram a reta $\delta^2\text{H} = 7,9 \delta^{18}\text{O} + 8,5$, que é semelhante à reta da 2ª coleta de São Luís. As condições climáticas na Finlândia são muito diferentes das condições climáticas da Ilha de São Luís; a temperatura média anual da Finlândia está em torno de -3°C no norte e de $+5^\circ\text{C}$ no sul, enquanto que em São Luís é de 35°C , indicando que a temperatura ambiente média não é um parâmetro determinante da reta.

A Tabela 3 apresenta as retas que correlacionam $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ em águas subterrâneas no Vale do Cariri, sul do Ceará [7,8], Região Metropolitana do Recife [9], Picos [10] e Vale do Gurguéia [11] no Piauí. Os coeficientes destas retas indicam que as chuvas que alimentam estes aquíferos, com exceção da Região Metropolitana do Recife e do Vale do Cariri, são formadas em condições de equilíbrio.

Tabela 3. $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e valores médios de excesso de deutério (d) em amostras de águas subterrâneas do nordeste do Brasil e da Finlândia.

Localização	Reta	d (‰)
Recife/PE	$\delta^2\text{H} = 4,9 \delta^{18}\text{O} + 9,9$	15,4
Vale do Gurguéia/Picos-PI	$\delta^2\text{H} = 7,4 \delta^{18}\text{O} + 6,1$	8,9
Chapada do Araripe-CE/PE	$\delta^2\text{H} = 8,1 \delta^{18}\text{O} + 6,5$	6,1
Vale do Cariri/CE	$\delta^2\text{H} = 6,7 \delta^{18}\text{O} + 7,3$	11,8
São Luís/MA – 1ª Coleta	$\delta^2\text{H} = 8,0 \delta^{18}\text{O} + 4,9$	5,0
São Luís/MA – 2ª Coleta	$\delta^2\text{H} = 8,1 \delta^{18}\text{O} + 8,5$	8,2
Finlândia	$\delta^2\text{H} = 7,9 \delta^{18}\text{O} + 8,5$	10

As amostras do Vale do Gurguéia e Picos são provenientes da Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí. Estas amostras foram estudadas por Frischkorn et al. [12] e os resultados mostraram a presença de paleoáguas derivadas de chuvas ocorridas na transição do Pleistoceno para o Holoceno (10000-12000 anos) quando a temperatura na região da Bacia Sedimentar Maranhão-Piauí sofreu um aumento de 5°C .

A Chapada do Araripe e o Vale do Cariri estão localizados na Bacia Sedimentar do Araripe. Nesta bacia, também foi detectada a presença de paleoáguas. A Chapada está cerca de 400 m acima do Vale, podendo ser observado pequeno efeito de altitude. A região metropolitana do Recife está localizada na costa, no estado de Pernambuco.

$\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ das águas de chuvas das cidades de Belém/PA, Manaus/AM, situadas no norte brasileiro e de Caiena, na Guina Francesa [13] são discutidos a seguir.

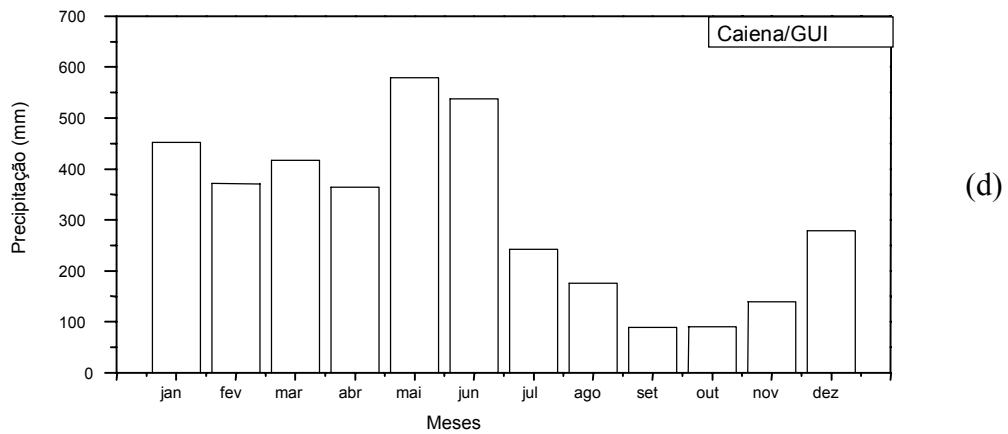
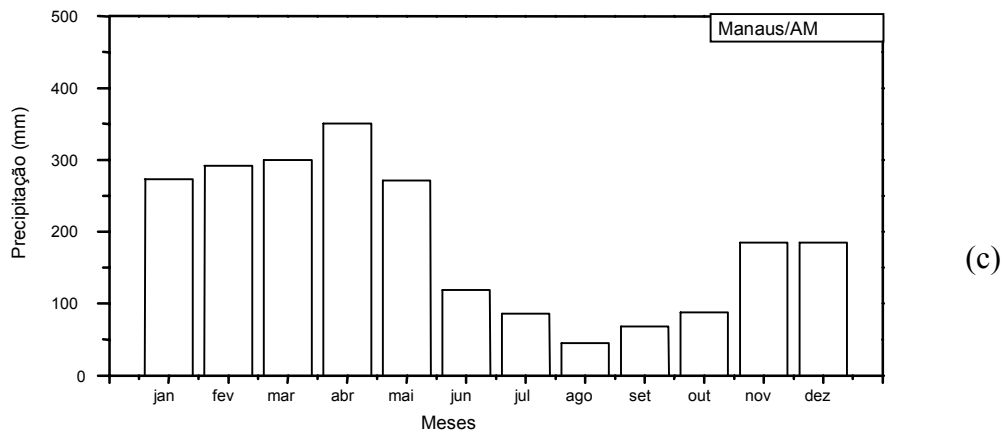
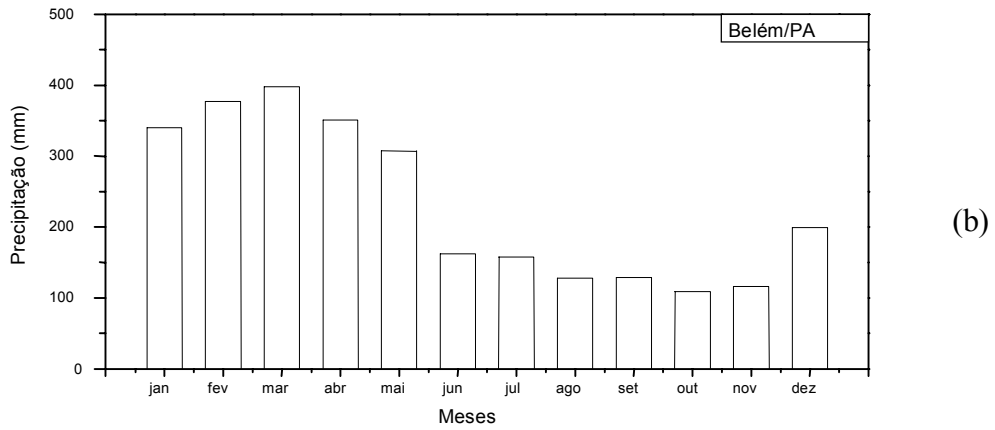
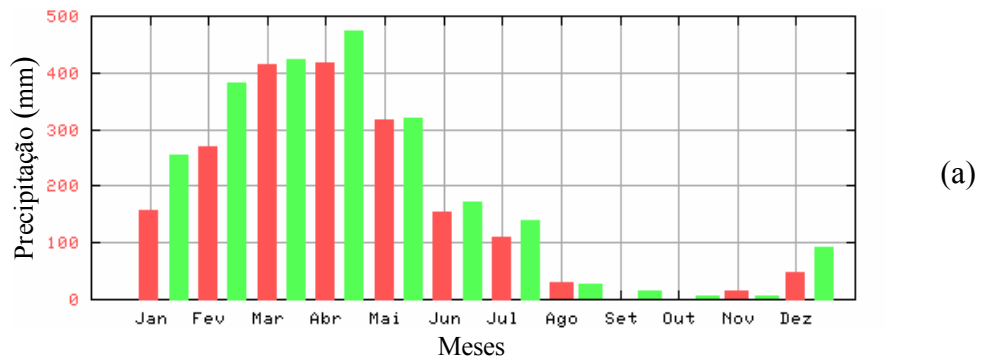
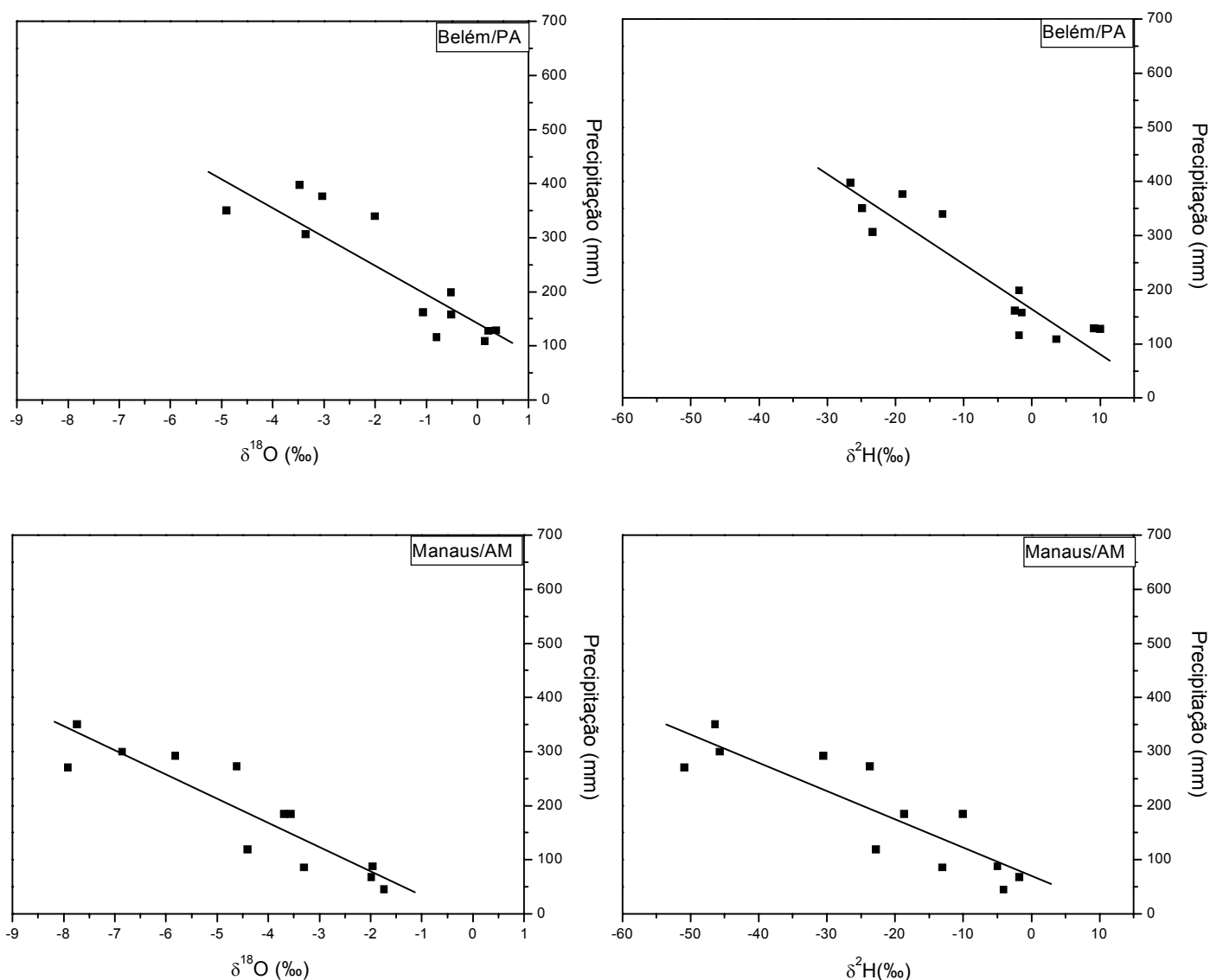


Figura 4. Distribuição mensal das precipitações de São Luís/MA, Belém/PA, Manaus/AM e de Caiena, na Guiana Francesa.

São Luís, Belém e Manaus têm, praticamente, a mesma distribuição anual de chuvas, como mostra a Figura 4a, b e c; os meses mais chuvosos são dezembro a maio. Como elas estão no mesmo paralelo, a cerca de 2,5° sul, as massas de vapor d'água devem ser as mesmas. A distribuição de chuvas em Caiena, mostrada na Figura 4d, indica valores mensais mais elevados do que no norte do Brasil.

$\delta^{18}\text{O}$ versus precipitação e $\delta^2\text{H}$ versus precipitação em Belém, Manaus e Caiena, estão apresentados na Figura 5, onde observa-se que as chuvas mais intensas têm valores mais baixos de $\delta^{18}\text{O}$ de $\delta^2\text{H}$.



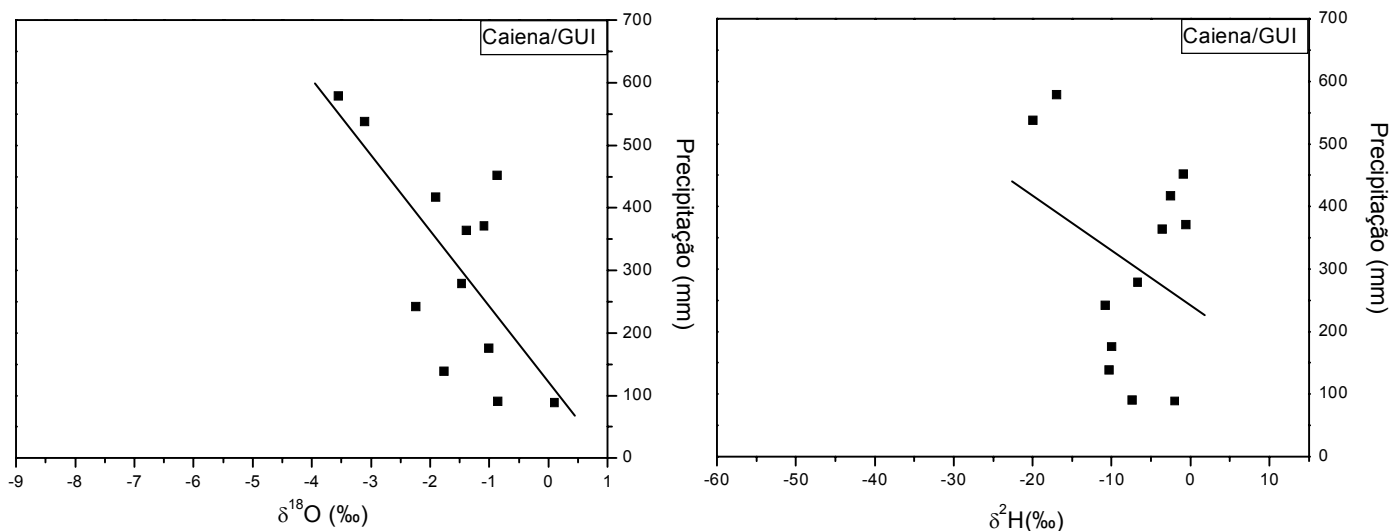


Figura 5. $\delta^{18}\text{O}$ versus precipitação e $\delta^2\text{H}$ versus precipitação para as cidades de Belém, Manaus e Caiana.

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ em águas subterrâneas são mais baixos do que nas chuvas devido a recarga dos aquíferos ocorrer pelas chuvas intensas. Os baixos valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ nas amostras de águas subterrâneas de São Luís são decorrentes da alta pluviosidade local.

A Figura 6 mostra $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ das águas de chuvas de Belém, Manaus e Caiana. Nas duas primeiras localidades, os dois parâmetros são bem correlacionados e apresentam as retas $\delta^2\text{H} = 7,3 \delta^{18}\text{O} + 3,9$ e $\delta^2\text{H} = 7,8 \delta^{18}\text{O} + 12,2$, cujos coeficientes angulares estão próximos ao da Reta Meteórica Mundial; as chuvas de Caiana, apresentaram a reta $\delta^2\text{H} = 4,9 \delta^{18}\text{O} + 0,25$ com coeficiente angular menor que 8 indicando evaporação durante a queda das gotas.

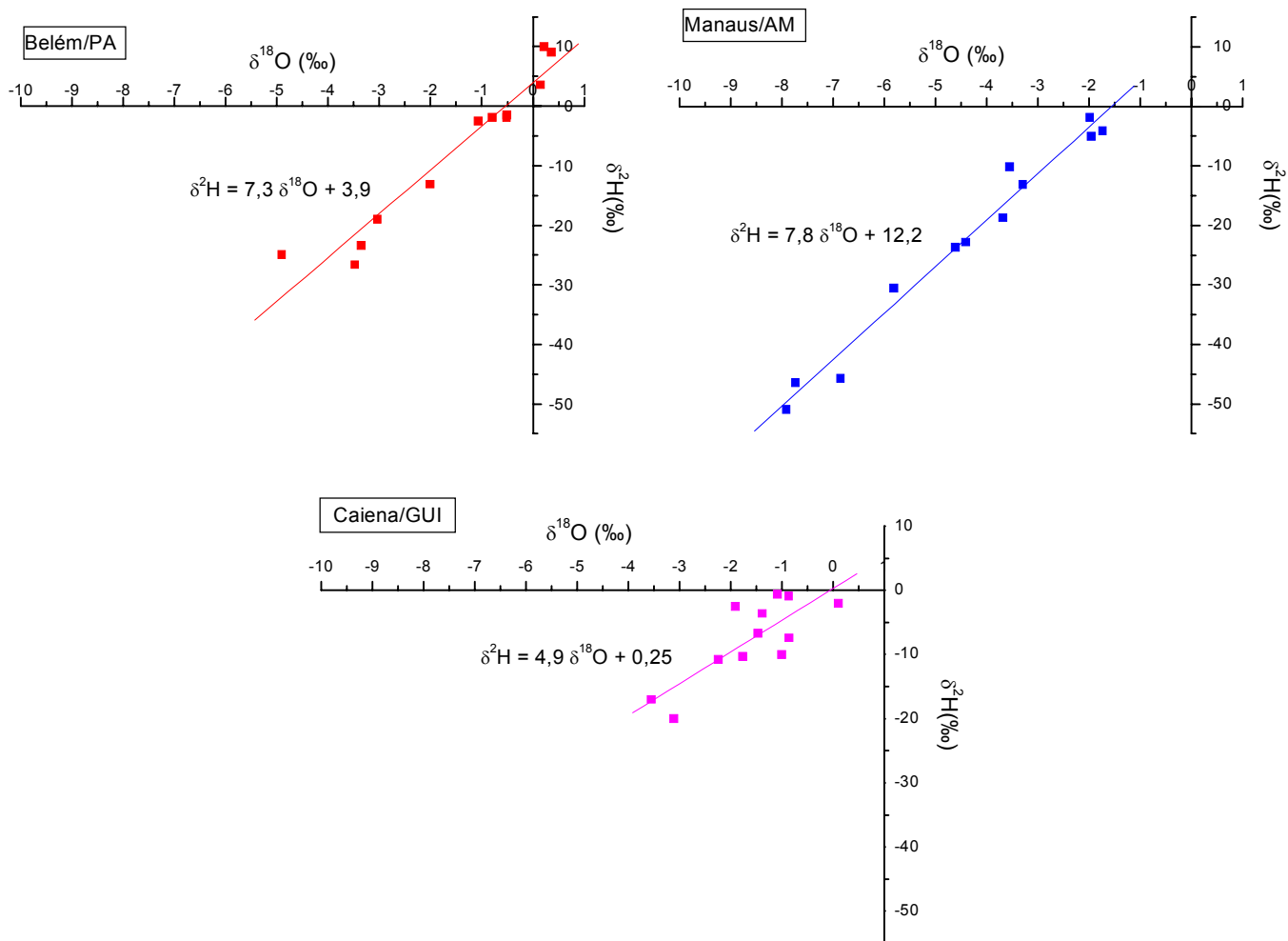


Figura 6. $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ para as cidades de Belém, Manaus e Caiena.

O parâmetro excesso de deutério (Tabela 3) nas duas amostragens em São Luís apresenta valores diferentes; 5,0‰ no período chuvoso e 8,2‰ no período seco. Para discutir esta expressiva mudança, vamos comparar os parâmetros da nossa área com os parâmetros de outras diferentes localidades com diferentes distâncias à costa ou com diferentes climas.

O excesso de deutério da maioria das amostras da Finlândia ficou em torno de 10‰ [6] igual ao coeficiente linear da reta meteórica de Craig.

A distribuição dos excessos de deutério para as demais áreas está apresentada na Figura 7, onde é possível identificar os valores médios deste parâmetro para cada uma delas. As suas médias ficaram em torno de 5‰ na 1ª coleta em São Luís, de 6‰ na Chapada do Araripe, de 8‰ na 2ª coleta de São Luís, de 9‰ nas amostras do Piauí, de 12‰ no Vale do Cariri e de 15‰ nas amostras da região metropolitana de Recife.

O excesso de deutério ocorre por causa da maior difusividade das moléculas de $^1\text{H}^2\text{H}^{16}\text{O}$ em relação às moléculas $^1\text{H}_2^{18}\text{O}$ produzindo uma separação adicional do deutério. Por isso, ele pode ser

usado para identificar a origem do vapor d'água que produz as chuvas. Nestas áreas estudadas, as chuvas que recarregam os aquíferos são originadas de diferentes massas de vapor d'água.

O desnível de cerca de 400 m entre o Vale do Cariri e a Chapada do Araripe produz um efeito de altitude que muda o excesso de deutério de 12‰ no Vale para 6‰ na Chapada.

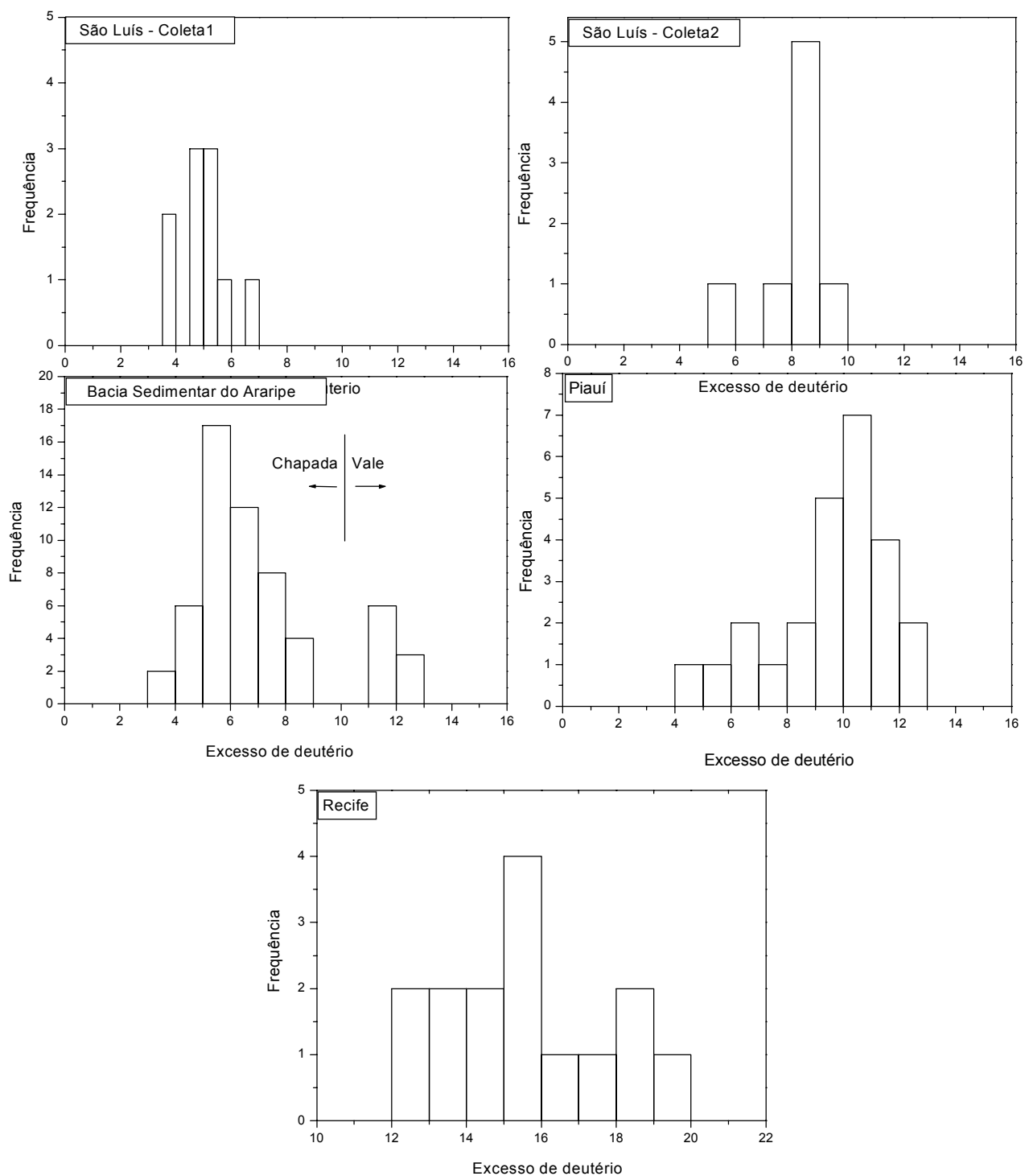


Figura 7. Distribuição do excesso de deutério em São Luís, Bacia Sedimentar do Araripe, Piauí e Recife.

A Tabela 4 apresenta as retas que correlacionam os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e de $\delta^2\text{H}$ [13] e a média do excesso de deutério em amostras de águas de chuva das cidades de Belém, Manaus e Caiena nos períodos seco e chuvoso.

Os excessos de deutério das águas de chuvas para a cidade de Belém, nos períodos seco e chuvoso, são praticamente iguais ao excesso de deutério das amostras de águas subterrâneas da 2ª coleta de São Luís/MA. Isso confirma, mais uma vez, que as águas subterrâneas de São Luís são provenientes de chuvas intensas ocorridas no local. O valor de d para o período seco em Belém é maior do que o d para o mesmo período em São Luís devido à quantidade de chuvas ser maior e sofrer menos evaporação.

Para a localidade de Caiena, os valores do excesso de deutério diferem de um período para o outro. No período seco a umidade é menor do que a do oceano e no período chuvoso, o valor de d é igual ao da reta meteórica de Craig, indicando que as chuvas, neste período, foram formadas em condições de equilíbrio.

Tabela 4. $\delta^{18}\text{O}$ versus $\delta^2\text{H}$ e valores médios de excesso de deutério (d) em amostras de águas de águas de chuva das cidades de Belém, Manaus e Caiena nos períodos seco (PS) e chuvoso (PC).

Localização	Reta	d (‰)
Belém/PA	$\delta^2\text{H} = 7,3 \delta^{18}\text{O} + 3,9$	7,0 (PS) 7,8 (PC)
Manaus/AM	$\delta^2\text{H} = 7,8 \delta^{18}\text{O} + 12,2$	13,2 (PS) 12,9 (PC)
Caiena (Guiana Francesa)	$\delta^2\text{H} = 4,9 \delta^{18}\text{O} + 0,25$	6,8 (PS) 10,0 (PC)

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, à Funcap, pelo apoio financeiro, à CAEMA, na pessoa do geólogo Afonso Ernani Arraes Braúna, pela realização das coletas e pelas informações técnicas dos poços, ao CENA/USP-Piracicaba/SP, na pessoa de Plínio Barbosa de Carvalho, pelas análises de oxigênio-18 e deutério.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CPRM. **Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, São Luís. Folha SA. 23-Z-A Cururupu Folha SA. 23-X-C**, CPRM, 1994.
- [2] SOUSA, Sergio B. **Sistema Aquífero da Ilha do Maranhão**, 1st Joint World Congress on Grounwater, 1998.
- [3] CRAIG, D. Lal. **Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters**, Science, 1883-4, 1961.
- [4] CLARK, I., FRITZ, P., **Enviromental isotopes in Hidrogeology**, Lewis Publishers, New York, 1997.
- [5] SANTIAGO, M. M. F., SILVA, C. M. S. MENDES FILHO, J., FRISCHKORN, H.. **Characterization of groundwater in the Cariri (Ceará/Brazil) by environmental isotopes and electric conductivity**. Radiocarbon, 39(1): 49-60, 1997.
- [6] www.camnl.wr.usgs.gov/kinwater/kortelai.pdf
- [7] SILVA, C. M. S. **Modelo Fenomenológico para a circulação de água na Bacia Sedimentar do Cariri com base em isótopos e hidroquímica**. Tese de Doutorado. UFC – Fortaleza/CE, 162 p.,1998.
- [8] MENDONÇA, L. A. R. **Recursos hídricos da Chapada do Araripe**. Tese de Doutorado. UFC – Fortaleza/CE, 193 p., 2001.
- [9] FILHO, W. D. **Estudo hidroquímico nos aquíferos da Planície do Recife**. Dissertação de Mestrado. UFC – Fortaleza/CE, 204 p., 1997.
- [10] BATISTA, J. R. X. **Estudo isotópico e hidroquímico da dinâmica de recarga das águas no município de Picos-PI**. Dissertação de Mestrado. UFC – Fortaleza/CE, 73 p., 1998.
- [11] CARNEIRO, C. E. C. D. **Isótopos ambientais, condutividade elétrica e hidroquímica no estudo da circulação de águas subterrâneas no Vale do Gurguéia**. Dissertação de Mestrado. UFC – Fortaleza/CE, 83 p, 1998.
- [12] FRISCHKORN, H., SANTIAGO, M. M. F. **The paleoclimate of the Northeast of Brazil according to Isotope Hydrology**. Impacts of Climate Variations and Sustainable Development in Semi-arid Regions (ICID), Fortaleza, 27/01 a 01/02/1992, 18p., 1992
- [13] IAEA. **Statistical Treatment on the Environmental Isotope Data in Precipitation**. Technical Reports Science, nº 206, 1981.