

Caracterização isotópica (^{18}O , D) e hidroquímica das águas da bacia do rio da Prata de São Luís/MA e vizinhança

Isotopic (^{18}O , D) and hydrochemical characterization of water of the Prata river basin in São Luis/MA and surroundings

João Filomeno Barros¹; João Batista Almeida²; Carla Maria Salgado Vidal Silva³; Josué Mendes Filho⁴; Bruno Alves de Mesquita⁵; Maria Marlúcia Freitas Santiago⁷ e Horst Frischkorn⁶

^{1,2} Instituto Federal do Maranhão, MA, Brasil

rennan.barros@hotmail.com; bvapalmeida@yahoo.com.br

^{3,4,5,7} Universidade Federal do Ceará – Departamento de Física, CE, Brasil

carla@fisica.ufc.br; josue@fisica.ufc.br; bruno.mesquita@fisica.ufc.br; marlucia@fisica.ufc.br

⁶ Universidade Federal do Ceará – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, CE, Brasil

cariri@ufc.br

Recebido: 13/02/14 - Revisado: 16/07/14 - Aceito: 22/12/14

RESUMO

Os isótopos ambientais oxigênio-18 e deutério foram utilizados como ferramenta na identificação de interação água subterrânea/água superficial na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata – Maranhão. Foram georreferenciados 19 pontos, 02 na barragem do rio da Prata, 02 nascentes e 14 poços tubulares e uma cacimba, para coleta de amostras no período seco e no período chuvoso e medida da condutividade elétrica e análise isotópica; também foram coletadas e analisadas isotopicamente águas de chuva da bacia hidrográfica. Os resultados mostram que nas nascentes, na barragem e em 07 poços $\text{EC} < 100 \mu\text{S}/\text{cm}$, em 04 poços na faixa de 110 a 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e em 04 de 203 a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As medidas isotópicas distinguem as águas da barragem que apresentam os maiores valores por efeito da evaporação, com $\delta^{18}\text{O}$ de -3,55 a -3,01‰ e δD de -16,7 a -15,4‰, que as águas subterrâneas, com faixas de $\delta^{18}\text{O}$ de -6,90 a -3,45‰ e δD de -39,6 a -17,0‰. Devido o forte “efeito de quantidade” nas chuvas anuais bastante variáveis, a origem da recarga dos aquíferos na bacia e vizinhança pode ser identificada.

Palavras Chave: Rio da Prata - São Luís. Oxigênio-18 e deutério. Recarga de aquífero

ABSTRACT:

Environmental isotopes oxygen -18 and deuterium were used as tools for the identification of groundwater / surface water interaction in the basin of the Rio da Prata watershed - São Luís/ Maranhão . 19 points were georeferenced, 02 in the dam of the Rio da Prata , 02 springs and 14 drilled wells and one dug well for sampling in the dry season and the rainy one and for the measurement of electrical conductivity and isotope analysis; rainfall was also monitored and analyzed isotopically . The springs, the samples from the dam, and 07 wells showed $\text{EC} < 100 \mu\text{S}/\text{cm}$; 04 wells had EC from 110 to 137 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 04 from 203 to 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Isotopic measurements distinguish the waters of the dam with the highest values due to the effect of evaporation on $\delta^{18}\text{O}$, with -3.55 to -3.01 ‰, and on δD , with -16.7 to -15.4 ‰; groundwaters range from -6.90 to -3.45 ‰ for $\delta^{18}\text{O}$ and from -39.6 to -17.0 ‰ for δD . Due to the strong isotopic “amount effect” on strongly varying annual rainfall, the origin of groundwater recharge could be identified.

Keywords: Rio da Prata - São Luís. Oxygen -18 and Deuterium. Aquifer Recharge

INTRODUÇÃO

O abastecimento público de água de São Luís/Maranhão é feito pelo Sistema Sacavém, predominantemente, de água superficial armazenada no Reservatório Batatã, localizado no Parque Estadual do Bacanga, uma represa na Bacia Hidrográfica do Rio Bacanga e de água armazenada em um lago no rio da Prata, afluente do rio Batatã, localizado após a barragem do Batatã. Água subterrânea também contribui para o Sistema de abastecimento através de uma bateria de 14 poços tubulares.

Outros sistemas de abastecimento já foram desativados nos últimos 40 anos (PEREIRA et al., 2011); o do Rio Maracanã, que captava água para a Barragem do Batatã, o Sistema Olho D'Água e a antiga Barragem de São Raimundo. A Barragem do Rio da Prata, de onde as águas são bombeadas para a barragem do Batatã, pode ser mais uma fonte a ser desativada se as condições de recarga não forem conhecidas para conduzir a um uso sustentável.

Os isótopos oxigênio-18 e deutério (D) na água subterrânea são excelentes traçadores porque conservam a composição em condições de temperatura normal e dificilmente são afetados pela interação água rocha (GAT, 1996; McCARTHY et al., 1992). Em águas superficiais, a evaporação promove o enriquecimento dos isótopos pesados. Entre as aplicações desta propriedade estão os estudos sobre a interação água superficial/água subterrânea, alguns identificando os percentuais de mistura (CLARK; FRITZ, 1997; KOHFAHL et al., 2008), a determinação da evaporação no estudo da qualidade das águas (LAAR et al., 2011), de recarga de aquíferos (ADOMAKO et al., 2011), a identificação de fontes de recarga (LIU; YAMANAKA, 2012; QIN et al., 2011; VANDERZALM et al., 2011; WASSENAAR; ATHANASOPOULOS; HENDRY 2011). Estes traçadores são aqui utilizados para caracterizar isotopicamente as reservas superficiais e subterrâneas na Bacia do Rio da Prata e vizinhança e identificar origem e a interação entre elas.

A área de estudo (Figura 1), a Bacia Hidrográfica do Rio da Prata, com 1,93 km² (CAEMA, 2010), está localizada na

porção sudoeste da Ilha de São Luís, inserida na Bacia do Rio Bacanga; suas coordenadas geográficas são a Norte: 02° 35' 40" e 44° 16' 30"; Sul: 02° 36' 56" e 44° 16' 14"; Leste: 02° 36' 19" e 44° 16' 3" e Oeste: 02° 36' 11".

O clima da área é tropical quente e úmido, por influência da Zona de Convergência Intertropical, caracterizado por duas estações bem definidas: uma seca e outra chuvosa. A estação chuvosa, de dezembro a junho, tem o mês de abril como o mais chuvoso. A pluviosidade normalmente ultrapassa 2000 mm/ano, o que fragiliza os solos e limita a atividade agrícola, já que as intensas chuvas provocam erosão e forte lixiviação (BRASIL, 2009).

A temperatura média da região é de 26°C, com amplitude térmica menor que 7°C no ano, e sofre influência da maré; quando está mais ou menos nublado, como durante a preamar, as massas de ar perdem parcialmente sua dinâmica deixando de circular, impedindo que o calor seja dissipado para a atmosfera, ocasionando aumento de temperatura. A temperatura local também é influenciada consideravelmente pela vegetação, principalmente nos brejos que, associados aos recursos hídricos, tornam o local aprazível em muitos dias do ano (FORTES, 2010).

A área em estudo está inserida numa Área de Proteção Ambiental; nela, foi construída uma barragem que forma um lago no Rio da Prata. Várias nascentes contribuem para o rio, algumas delas na área ou sob a influência da antiga Escola Agrícola do Maranhão, atualmente Instituto Federal do Maranhão, Campus do Maracanã, em São Luís.

Segundo Feitosa (1996), as estruturas geológicas superficiais na Ilha de São Luís, são constituídas por rochas da Formação Itapecuru, que datam do Cretáceo, sobrepostas, em algumas áreas, pela Formação Barreiras, originária do Terciário, e por sedimentos Quaternários da Formação Açuí, que são os terrenos recentes. Nos tabuleiros e nas vertentes estão as rochas de idade terciária; os sedimentos Quaternários estão na zona litorânea e nas desembocaduras.

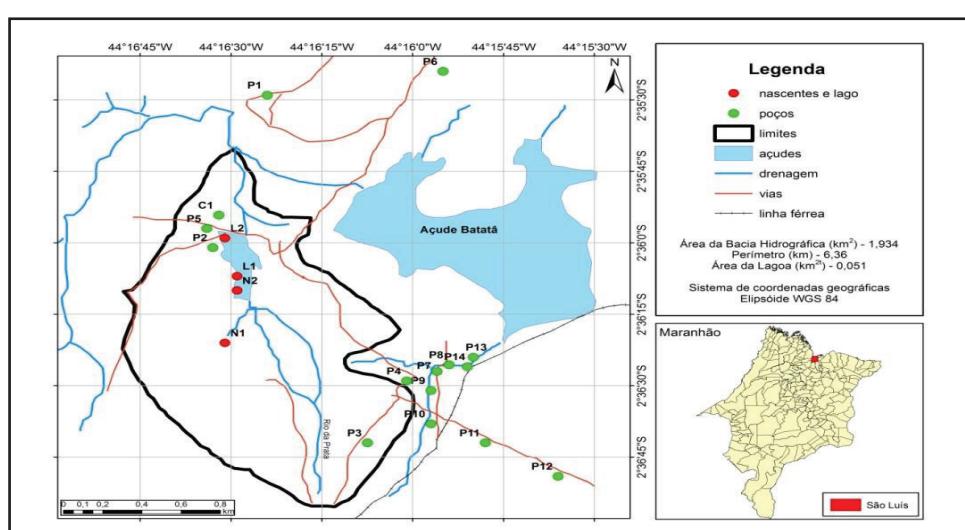


Figura 1 – Área de trabalho com localização dos pontos de amostragens

MATERIAIS E MÉTODOS

Os pontos de amostragem estão indicados na figura 1, sendo N1 e N2 respectivamente Nascente 1 e Nascente 2, L1 e L2, meio do lago (açude) e próximo à parede da barragem, respectivamente. Os 14 poços e 01 cacimba estão indicados como P1 a P14 e C1, sendo P1, P2 e P5 localizados na Bacia do Rio da Prata e os demais na vizinhança.

As coletas de amostras d'água nos poços foram realizadas nos períodos seco e de chuva; as duas primeiras campanhas em outubro e dezembro de 2011 (final do período seco) e as outras, nos meses fevereiro, abril, julho e setembro de 2012, no período chuvoso, e no início de período seco. Águas de chuvas mensais de 2012 foram coletadas de um posto na Vila Esperança, chácara Laurentina, localizada em $02^{\circ} 36' 26''$ de latitude sul e $44^{\circ} 15' 54,4''$ de longitude oeste. No lago e nas nascentes, as amostras foram coletadas em dezembro de 2011, março e junho de 2012.

Em campo, foram medidas as condutividades elétricas e em cada ponto foram coletadas três amostras em frascos plásticos com capacidade para 500 mL e destinadas à análise hidroquímica e uma amostra de 100 mL para análise isotópica.

As determinações de deutério e oxigênio-18 são feitas em espectrômetro de massa com dupla entrada e duplo coletor, onde a amostra e um padrão são medidos alternadamente. As concentrações isotópicas são expressas em δ em relação ao padrão VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

As análises foram realizadas no Laboratório de Isótopos

$$\delta^{18}\text{O} (\%) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{amostra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{padrão}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{padrão}}} \cdot 10^3 , \quad (1)$$

$$\delta\text{D} (\%) = \frac{(D/H)_{\text{amostra}} - (D/H)_{\text{padrão}}}{(D/H)_{\text{padrão}}} \cdot 10^3 , \quad (2)$$

Estáveis do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Brasília – LAIS/IG/UnB com erro das medidas de $\pm 1\%$ para o hidrogênio e $\pm 0,2\%$ para o oxigênio.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), relacionada com a salinidade (ppm) por um fator aproximadamente 0,64 (METCALF; EDDY, 1991), em amostras de três coletas de água superficial coletadas no lago, L1 na barragem e L2 no meio, e de águas subterrâneas coletadas nas nascentes N1 e N2, em poços P1 a P14 e em uma cacimba C1, está mostrada nas tabelas 1a, 1b e na figura 2. Nas nascentes, no lago e nos poços P1, P2 P5, P6, P8 e P14, os dois primeiros na Bacia Hidrográfica do Rio da Prata e os outros no seu entorno estão os valores mais baixos, com CE < 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$; na faixa de 60 a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ estão águas nos poços P7, P9 e P13 e valores >200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ são das águas dos poços P3, P10, P11 e P12. As águas na cacimba variaram da faixa de valores menores para a faixa de valores intermediários; ela estava seca nas duas últimas coletas. As mudanças com o tempo indicam o efeito da recarga no período chuvoso, mas elas mantêm as faixas, com exceção das amostras da cacimba.

As medidas de oxigênio-18 e deutério (Tabela 1 e Figuras 3a e 3b) apresentam valores mais elevados nas amostras do lago do que nas águas subterrâneas indicando o efeito da evaporação nas águas superficiais. Valores $\delta^{18}\text{O}$ na faixa logo abaixo são das águas nas nascentes e nos poços P4, P5, P10 a P14 e os mais baixos que $-4,2\%$ são das águas dos demais poços. As diferenças entre os valores na coleta de dezembro de 2011 (final do período seco) e junho de 2012 (final do período chuvoso) são pequenas, considerando o erro de medida de $0,2\%$ para $\delta^{18}\text{O}$, com exceção de P13 e P14.

As medidas isotópicas das águas do lago mostram mais claramente o efeito do processo de evaporação do que as me-

Tabela 1a- Condutividade elétrica de amostras coletadas em poços em outubro e dezembro de 2011, fevereiro, abril, julho e setembro de 2012 e oxigênio-18 e deutério em dezembro 2011 e julho 2012

Mês	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	C1
	Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)														
out-2011	55	20	394	98	57	51	120	42	97	358	200	254	132	61	46
dez-2011	64	30	310	101	46	50	101	52	100	400	230	297	117	50	60
fev-2012	67	26	377	105	52	56	137	55	96	278	210	282	86	39	95
abr-2012	59	22	339	102	57	52	96	53	87	288	206	200	130	33	95
jul-2012	57	20	-	101	51	55	93	49	80	260	223	318	130	41	-
set-2012	51	21	-	90	16	24	70	13	70	218	203	270	128	30	-
Mês	$\delta^{18}\text{O} (\%)$														
dez-2011	-4,38	-4,71	-4,40	-3,81	-3,90	-5,54	-4,79	-4,97	-4,57	-4,31	-3,65	-3,77	-4,01	-4,17	-3,66
jul-2012	-4,36	-4,98	-	-3,93	-3,45	-5,21	-4,33	-5,09	-4,75	-4,08	-3,83	-3,81	-5,00	-6,90	-
Mês	$\delta\text{D} (\%)$														
dez-2011	-22,1	-24,9	-22,2	-18,2	-19,8	-30,2	-26,7	-28,6	-26,7	-23,7	-18,1	-18,4	-18,4	-19,9	-17,5
jul-2012	-21,3	-25,5	-	-18,1	-18,9	-27,7	-23,0	-28,1	-25,8	-19,7	-18,0	-17,0	-25,2	-39,6	-

Tabela 1b – Condutividade elétrica (CE), oxigênio-18 e deutério de amostras de nascentes (N1 e N2) e lago (L1 e L2) coletadas em dezembro de 2011, março e junho de 2012

Mês	L1	L2	N1		L1		L2	N1		N2	
			CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)			$\delta^{18}\text{O}$ (‰)				δD (‰)	
dez/2011	51	56	48	55	-3,38	-3,01	-3,94	-4,03	-16,3	-16,3	-18,1
mar/2012	50	50	40	44	-	-	-	-	-	-	-
jun/2012	47	50	43	44	-3,55	-3,22	-3,76	-3,72	-16,7	-15,4	-16,5
											-16,6

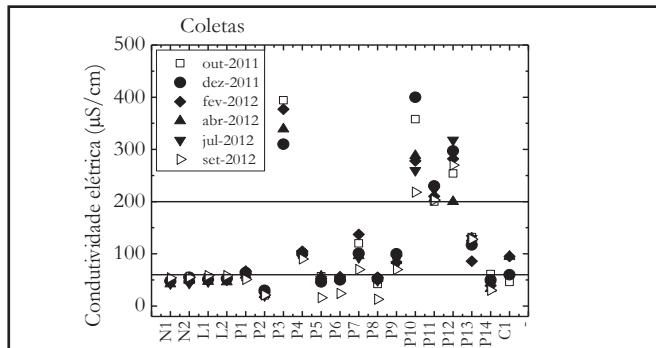


Figura 2 - Condutividade elétrica em nascentes (N1 a N2), lago (L1 e L2), poços (P1 a P14) e cacimba (C1) em outubro e dezembro de 2011 e fevereiro, abril, julho e setembro de 2012

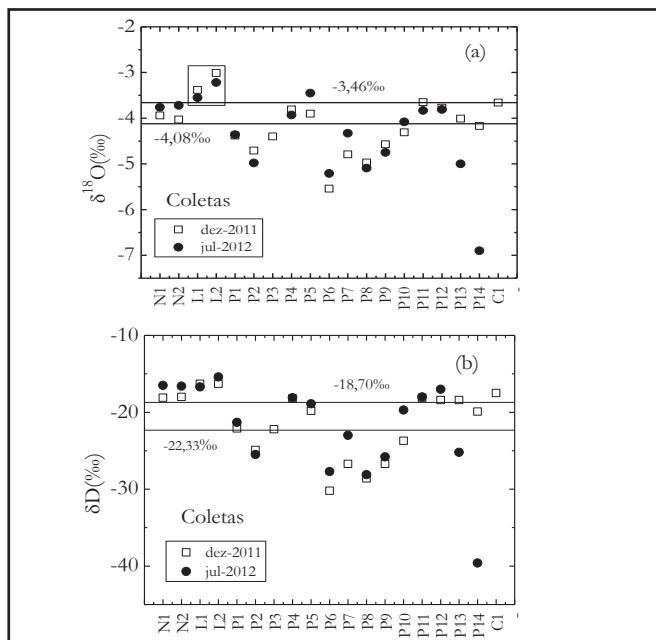


Figura 3 - (a) $\delta^{18}\text{O}$ e (b) δD em amostras de nascentes (N1 e N2), lago (L1 e L2), poços (P1 a P14) e cacimba (C1) coletadas em dezembro de 2011 e julho de 2012

didas de condutividade elétrica como se observa comparando as figuras 2 e 3.

Para identificar isotopicamente as águas de recarga, foram medidos a pluviosidade mensal, $\delta^{18}\text{O}$ e δD de janeiro a junho de 2012 (Tabela 2 e Figura 4); os resultados mostram que quanto maior é a quantidade de chuva, mais negativos são os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD , o que caracteriza o “Efeito de Quantidade”. A composição isotópica das chuvas é função de fatores

Tabela 2 – Medidas de $\delta^{18}\text{O}$, δD , excesso de deutério (d) nas chuvas e pluviometria no Posto Meteorológico da chácara Laurentina Vila Esperança em São Luís/MA, nos meses de janeiro a junho /2012

Mês	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	δD (‰)	d (‰)	P (mm)
jan	-1,47	-1,8	9,96	100,2
fev	-3,27	-19,3	6,86	238,1
mar	-4,44	-24,9	10,62	331,7
abr	-4,37	-23,1	11,86	249,5
mai	-1,32	-0,1	10,46	86,4
jun	-1,09	1,0	9,72	50,8

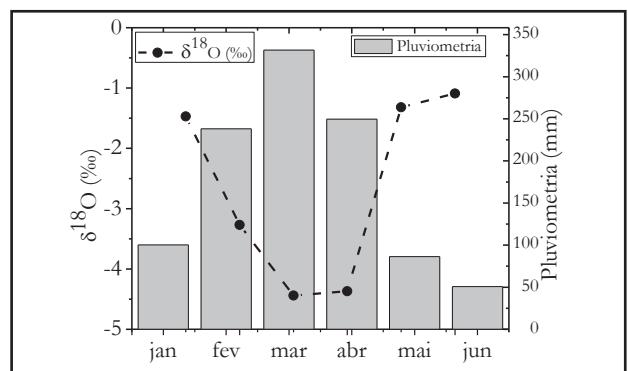


Figura 4 - $\delta^{18}\text{O}$ nas chuvas de janeiro a junho/2012 e pluviometria

como intensidade, pressão atmosférica e número de ciclos de evaporação e condensação (DANSGAARD, 1964).

O excesso de deutério (Tabela 2) é definido como $\delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$ (MERLIVANT; JOUZEL, 1979; ele depende das condições da umidade durante a evaporação (MERLIVAT; JOUZELL, 1979; PFAHL; WERNLI, 2008).

As médias ponderadas com a pluviosidade mensal (Figuras 3a e 3b) de todas as chuvas de 2012 e dos três meses mais chuvosos são $\delta^{18}\text{O} = -3,46\text{‰}$ e $-4,08\text{‰}$ (Figura 4), respectivamente, e $\delta\text{D} = -18,70\text{‰}$ e $-22,33\text{‰}$, respectivamente. Como na recarga dos aquíferos, águas provenientes de pluviosidade maior são preferidas (enquanto chuvas fracas retornam para a atmosfera por evapotranspiração), consideramos os valores trimestrais como característicos da recarga em 2012. Para 2011 não dispomos de valores isotópicos; podemos, porém usar o

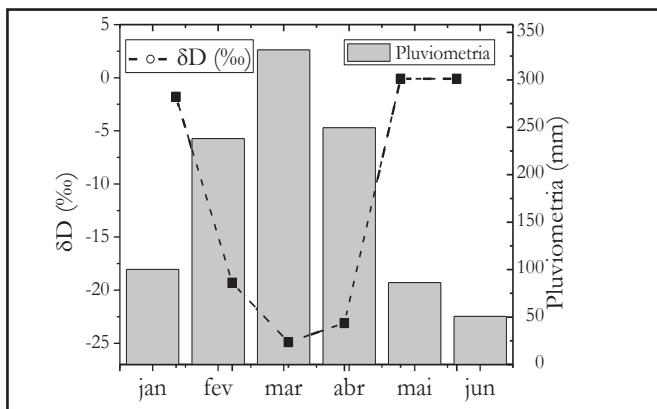


Figura 5 - δD nas chuvas de janeiro a junho/2012 e pluviometria

efeito de quantidade para obter valores aproximados para este ano, que foi, com 2715 mm acumulados, principalmente, nos primeiros 04 meses o mais chuvoso dos últimos dez anos. Assim, com os valores do Efeito de Quantidade indicados na figura 7 e com as pluviosidades para os primeiros quatro meses de 2011, resultam valores estimados de $\delta^{18}\text{O} \approx -7\text{\textperthousand}$ e de $\delta\text{D} \approx -53,5\text{\textperthousand}$.

Os valores, abaixo de $-4,08\text{\textperthousand}$ para ^{18}O e $-22,33\text{\textperthousand}$ para D que aparecem em grande parte das amostras, devem ser produzidos por recargas com chuvas mais intensas de 2011; já o ano de 2012 foi de poucas chuvas na área, promovendo recarga fraca e, com isso, imprimindo uma marcação isotópica fraca.

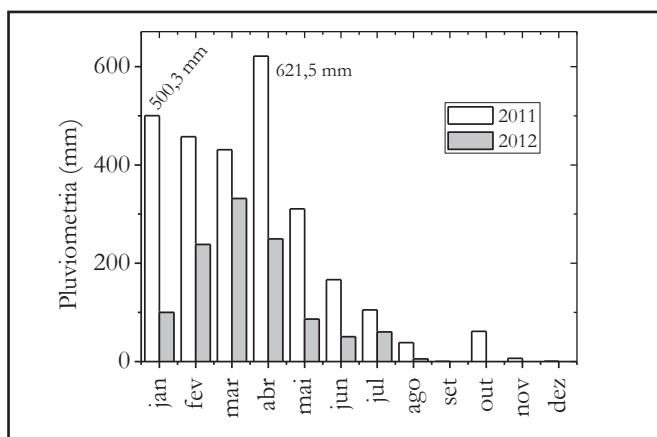


Figura 6 - Histograma de pluviometria no período de janeiro de 2011 a dezembro de 2012 no posto meteorológico NUGEO-UEMA

Assim, o Efeito de Quantidade explica valores de $\delta^{18}\text{O}$ e δD menores que das chuvas de 2012; são águas de recarga de anos anteriores quando a pluviosidade anual foi acima de 2000 mm, especialmente em 2011. Com isso, os menores valores encontrados nos poços, $\delta^{18}\text{O} = -6,9\text{\textperthousand}$ e $\delta\text{D} = -39,6\text{\textperthousand}$, podem ser explicados pela recarga pelas chuvas intensas em 2011.

Na figura 8, observa-se que amostras com CE < 150 $\mu\text{S}/\text{cm}$ têm $\delta^{18}\text{O}$ na faixa de -3 a $-7\text{\textperthousand}$ e que as águas com CE > 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mantêm $\delta^{18}\text{O}$ na faixa de $-4,40$ a $-3,65\text{\textperthousand}$, caracterizando dois sistemas aquíferos diferentes.

$$\delta\text{D} = 7,67 \delta^{18}\text{O} + 8,86 \quad . \quad (3)$$

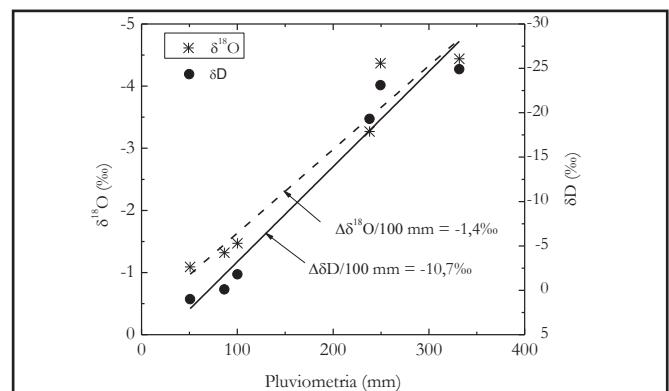


Figura 7 - δD e $\delta^{18}\text{O}$ nas chuvas de janeiro a junho/2012 versus pluviometria

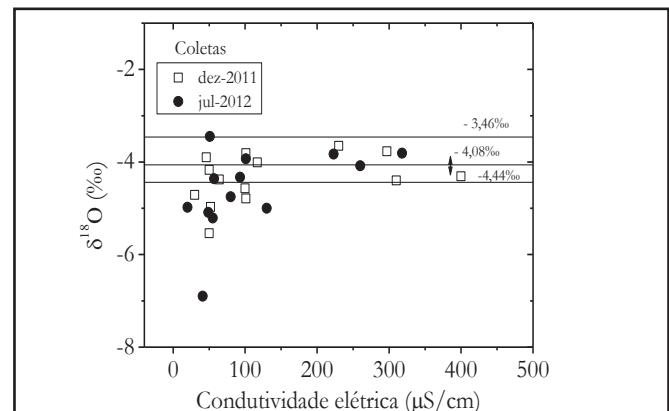


Figura 8 - $\delta^{18}\text{O}$ versus condutividade elétrica em amostras de poços coletadas em dezembro/2011 e junho/2012

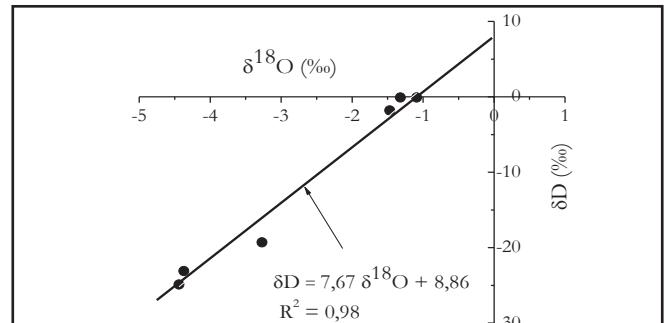


Figura 9 - δD versus $\delta^{18}\text{O}$ das chuvas na Vila Esperança em São Luís/MA em 2012

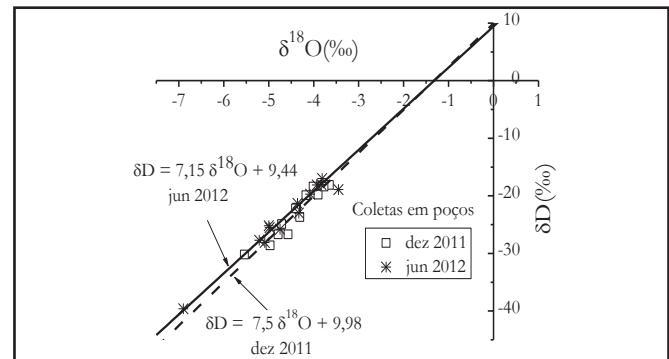


Figura 10 - δD versus $\delta^{18}\text{O}$ em águas subterrâneas coletadas no final do período seco (dez/2011) e final do período chuvoso (junho/2012)

A relação δD versus $\delta^{18}\text{O}$ nas águas de chuva em 2012 (Figura 9) a Reta Meteórica Local, é expressa por:

Nas águas subterrâneas, estas relações nas coletas de

$$\delta D = 7,50 \delta^{18}\text{O} + 9,98 , \quad (4)$$

$$\delta D = 7,15 \delta^{18}\text{O} + 9,44 , \quad (5)$$

dezembro de 2011 e junho de 2012 são respectivamente (Figura 10):

Considerando o erro nas medidas isotópicas, os coeficientes angulares das retas, RML e das amostras de dezembro/2011 são muito semelhantes e são de águas que sofreram leve processo de evaporação quando comparadas à Reta Meteórica Mundial (ROZANSKI; ARAGUÁS-ARAGUÁS; GONFIANI-

$$\delta D = 8,17 \delta^{18}\text{O} + 11,17 , \quad (6)$$

NI, 1993) (Com sua primeira determinação, $\delta D = 8 \delta^{18}\text{O} + 10$, feita por CRAIG (1961)):

A composição isotópica das chuvas é função da quantidade e intensidade, da temperatura da atmosfera e do número

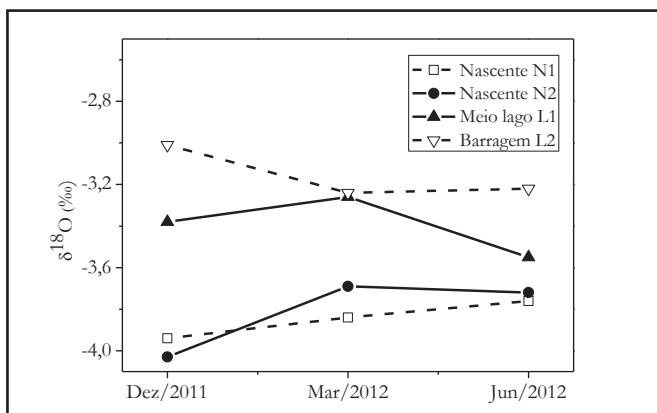


Figura 11 – $\delta^{18}\text{O}$ em amostras de duas nascentes (N1 e N2) e dois pontos no lago (L1 e L2) coletadas em dezembro/2011, março/2012 e junho/2012

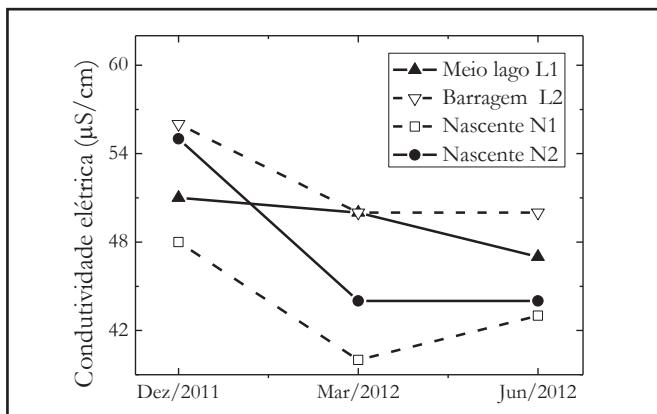


Figura 12 – Condutividade elétrica em amostras de duas nascentes (N1 e N2) e dois pontos no lago (L1 e L2) coletadas em dezembro/2011, março/2012 e junho/2012

de ciclos de evaporação e condensação, portanto depende da localização (DANSGAARD, 1964).

$\delta^{18}\text{O}$ (Figura 11) e condutividade elétrica (Figura 12) em amostras do lago e de duas nascentes junto a ele, coletadas em dezembro/2011, março/2012 e junho/2012, mostraram dois efeitos, o da recarga no período chuvoso que empobrece as águas nos isótopos pesados e o da evaporação que as enriquece. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ no lago são sempre mais elevados do que nas nascentes e os mais baixos nas nascentes são os de final do período seco; nesta época a interação lago aquífero era inexpressiva.

A condutividade elétrica esteve mais alta no final do período seco com valores na barragem próximo ao da Nascente 2, que está em conexão hidráulica com o lago; em março as amostras do lago tinham o mesmo valor e em junho os das duas nascentes se aproximaram.

Com a chegada do período chuvoso, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ e CE no lago diminuíram sob o efeito da renovação pelas chuvas que têm mais baixos valores isotópicos e de condutividade elétrica. Com o período chuvoso, $\delta^{18}\text{O}$ aumentou nas nascentes porque as chuvas que recarregaram o aquífero em 2012 tiveram valores mais elevados do que as do ano anterior pelo Efeito de Quantidade. A condutividade elétrica diminuiu nas nascentes com a recarga aumentando depois por efeito de mistura com as águas residuais, mais salinas.

CONCLUSÃO

As concentrações isotópicas de oxigênio e hidrogênio marcam as águas na área estudada; na bacia do Rio da Prata, as amostras nas nascentes, cacimba e em um poço tinham oxigênio-18 e deutério com valores da média das chuvas mensais do ano; as amostras do lago tinham os mais altos valores encontrados resultantes do processo de evaporação. Na maioria dos poços da vizinhança, os valores estavam na faixa entre a média mensal de todas as chuvas e média mensal das chuvas mais intensas; valores mais baixos correspondem às chuvas dos anos anteriores, de maior pluviosidade dos dez últimos anos.

REFERÊNCIAS

- ADOMAKO, D.; GIBRILLA, A.; AKITI1, T. T.; FIANKO, R.; MALOSZEWSKI, P. Hydrogeochemical Evolution and Groundwater Flow in the Densu River Basin, Ghana. *Journal of Water Resource and Protection*, v. 3, n. 7, p. 548-561, July 2011.
- BRASIL. Projeto de recuperação Ambiental da Mata Ciliar do Rio da Prata. Relatório Técnico Final 2009. São Luís: IFMA, 2009.
- CAEMA – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão. Relatório anual da qualidade da água produzida pelo sistema de abastecimento de água de São Luís e São José de Ribamar. São Luis: [s.n.], 2010.
- CLARK, I.; FRITZ, P. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Boca Raton: Ed. Lewis, 1997.

- CRAIG, H. Isotopic variations in meteoric Waters. *Science*, v. 133, n. 3465, p. 1702-1703, May 1961.
- DANSGAARD, W. Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, v. 16, p. 436-468, 1964.
- FEITOSA, A. C. *Dinâmica dos processos geomorfológicos da área costeira a nordeste da Ilha do Maranhão*. 1996. 102 f. Tese (Doutorado) – UNESP, Rio Claro, 1996.
- FORTES, R. (Org.). *Área de Proteção Ambiental do Maranhão: Subsídios ao manejo e à Educação Ambiental*. São Luís: Ed. Café e Lápis, 2010.
- GAT, J. R. Oxygen and hydrogen isotopes in the hydrologic cycle. *Annual Review of Earth Planetary Science*, v. 24, p. 225-262, May 1996.
- KOHFAHL, C.; RODRIGUEZ, M.; CORD FENK, C.; CHRISTIAN MENZ, C.; BENAVENTE, J.; HUBBERTEN, H.; MEYER, H.; PAUL, L.; KNAPPE, A.; LÓPEZ-GETA, J. A.; PEKDEGER, A. Characterizing flow regime and interrelation between surface-water and ground-water in the Fuente de Piedra salt lake basin by means of stable isotopes, hydrogeochemical and hydraulic data. *Journal of Hydrology*, v. 351, p. 170-187, 2008.
- LAAR, C.; AKITI, T. T.; BRIMAH, A. K.; FIANKO, J. R.; OSAE, S.; OSEI, J. Hydrochemistry and Isotopic Composition of the Sakumo Ramsar Site. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, v. 3, n. 2, p. 146-152, 2011.
- MCCARTHY, K. A.; MFARLAD, W. D.; WILKINSON, J. M.; WHITE, L. D. The dynamic relationship between 5 ground water and the Columbia River: using deuterium and oxygen-18 as tracers. *Journal of Hydrology*, v. 135, p. 1-12, 1992.
- MERLIVAT, L.; JOUZEL, J. Global climatic interpretation of the deuterium-oxygen 18 relationship for precipitation. *Journal of Geophysical Resources*, v. 84, n. C8, p. 5029–5033, Aug. 1979.
- METCALF; EDDY, Inc. *Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse*. McGraw-Hill International Editions, 3rd ed., New York, 1991
- PEREIRA, E.D.; CAVALCANTI JÚNIOR, F.A.; COSTA, H.O.S.; CASTRO, M.D.F. Reservatório Batatã: importância hídrica e conflitos de uso e ocupação no município de São Luís, Maranhão/Brasil. *Revista Geográfica de América Central*, Número Especial EGAL, Costa Rica, pp. 1-9, II Semestre 2011.
- PFAHL, S.; WERNLI, H. Air parcel trajectory analysis of stable isotopes in water vapor in the eastern Mediterranean. *J. Geophys. Res.* 113, D20104, 2008.
- QIN, D.; YU QIAN, Y.; HAN, L.; WANG, Z.; LI, C.; ZHAO, Z. Assessing impact of irrigation water on groundwater recharge and quality in arid environment using CFCs, tritium and stable isotopes, in the Zhangye Basin, Northwest China. *Journal of hydrology*, v. 405, n. 1-2, p. 194-208, July 2011.
- RODRIGUES, T. L. N. et al. (Org) *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil*. São Luís, Folha SA-23-2-A, Cururupu Folha SA-23-X-C, escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 1994.
- ROZANSKI, K.; ARAGUÁS-ARAGUÁS, L.; GONFIANTINI, R. Isotopic patterns in modern global precipitation. 1. In: SWART, P. K.; LOHMANN, K. C.; MCKENZIE, J.; SAVIN, S. (Ed.). *Climate change in continental isotopic records*. Washington, D. C.: American Geophysical, 1993. p. 1–36. (Geophysical monograph series, 78).
- VANDERZALM, J. L.; JEUKEN, B. M.; WISCHUSEN, J. D. H.; PAVELIC, P.; SALLE, C. LE G. LA; KNAPTON, A.; DILLON, P. J. Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in alluvial basins in arid central Australia. *Journal of Hydrology*, v. 397, n. 1-2, p. 71–82, Jan. 2011.
- WASSENAAR, L. I.; ATHANASOPOULOS P.; HENDRY, M. J. Isotope hydrology of precipitation, surface and ground waters in the Okanagan Valley, British Columbia, Canada. *Journal of hydrology*, v. 411, n. 1, p. 37-48, Dec. 2011.