

MEDIDAS DE $\delta^{18}\text{O}$ E HIDROQUÍMICA DE ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS NO ESTUDO DA INTERAÇÃO RIO – AQUÍFERO, NA REGIÃO DE LIMOEIRO DO NORTE – BAIXO JAGUARIBE – CE

Diolande Ferreira Gomes¹, Horst Frischkorn², Jorge Satander Sá Freire³

RESUMO Objetivando investigar as perdas de fluxo do rio Jaguaribe, na região de Limoeiro do Norte, foram coletadas águas superficiais e subterrâneas, em épocas de estiagem e chuvosa, no período de 2 anos. Foram realizadas análises de oxigênio-18 e hidroquímicas. A origem da recarga dos aquíferos e a intercomunicação rio-aquífero foram avaliadas com base nos dados de oxigênio-18 e na análise comparativa da química das águas. Os resultados evidenciaram marcadas diferenças entre as águas do rio Jaguaribe ($\delta^{18}\text{O}$ médio = +1,6) e do aquífero Jandaíra ($\delta^{18}\text{O}$ médio = -2,4), forte variação sazonal nos valores de $\delta^{18}\text{O}$ do rio e valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ em alguns poços, homogeneidade química entre as águas do rio Jaguaribe e a maioria dos poços do aluvião. A análise geral dos dados indica uma constante alimentação do aquífero aluvial pelo rio, sobretudo na época de estiagem.

Palavras-chave: Oxigênio-18, hidroquímica, rio Jaguaribe, aquífero aluvial

ABSTRACT For an investigation in losses of river flow of Jaguaribe river, in the region of Limoeiro do Norte, surface and groundwater samples were taken, in dry and rainy seasons, during a period of 2 years. Oxygen-18 and hydrochemical analyses were performed to evaluate the origin of aquifer recharge and river/aquifer interaction. Results show pronounced differences in $\delta^{18}\text{O}$ between Jaguaribe river (mean: +1.6) and the Jandaíra aquifer (mean: -2.4), strong seasonal variations in $\delta^{18}\text{O}$ in the river water, positive values for this parameter in some wells, indicating the influence of the river, and chemical homogeneity of Jaguaribe river water and those from the majority of wells. A general analysis of the data indicates a constant recharge to the alluvial aquifer through river water, however more pronounced during dry seasons

Keywords: Oxygen-18, hydrochemical, river Jaguaribe, alluvial aquifer

INTRODUÇÃO

O fluxo d'água, na maioria dos rios, tem duas principais fontes: escoamento superficial das águas pluviais e descarga de água subterrânea. Suas respectivas contribuições diferem em cada sistema e dependem de parâmetros climáticos e hidrogeológicos. Como a água de um rio pode originar-se de várias fontes, sua composição isotópica também pode variar. Variações sazonais podem ser maiores em rios e riachos nos quais o escoamento superficial de precipitação recente é a principal fonte de fluxo, enquanto pequenas variações podem ser observadas em rios onde a água subterrânea é a fonte dominante. Portanto, contribuições de diferentes fontes superficiais e subterrâneas, cada uma com suas concentrações isotópicas características, determinarão a composição isotópica da água dos rios, podendo ser usada para identificar suas origens (IAEA, 1981).

A composição isotópica dos rios e reservatórios superficiais é modificada pela evaporação. Assim, nas zonas áridas, os elevados teores de oxigênio-18 nas águas dos rios

perenizados durante os meses secos são causados pelo enriquecimento isotópico por evaporação no açude que alimenta o rio.

A água apresenta composição química relacionada a vários fatores, como, solo, litologia, tempo de residência, clima, etc. Portanto, dificilmente, a composição hidroquímica por si só caracteriza a origem da água, além do que, não é propriedade conservativa da água; por exemplo, águas armazenadas em diferentes tipos litológicos, podem, quanto aos íons dominantes, serem iguais.

No entanto, o monitoramento da composição química, juntamente com outros parâmetros, como clima, composição isotópica (a qual é uma propriedade conservativa da água subterrânea) e variações do nível estático, podem auxiliar no estudo da infiltração de águas de rio. Este trabalho teve por objetivo avaliar a interação rio/aquífero no caso do rio Jaguaribe através de medidas de oxigênio-18, composição química das águas e variação do nível estático do aluvião.

¹ UFC – Departamento de Geologia, Geoquímica e Hidroquímica (diolande@ufc.br)

² UFC – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (cariri@ufc.br)

³ UFC – Departamento de Geologia, Geoquímica e Geologia Marinha (freire@ufc.br)

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo está inserida na sub-bacia do Baixo Jaguaribe (Figuras 1 e 2, Tabela 1), compreende um trecho do rio onde o alargamento da planície aluvial é pronunciado, cobre a área entre a BR-116 e encosta da Chapada do Apodi. Neste trecho, aproximadamente 5 km a jusante da localidade de Peixe Gordo, o rio Jaguaribe divide-se em dois braços, isolando uma faixa de terra com comprimento maior de 30 km e largura média de 5,5km. Esta porção ilhada de aproximadamente 170 km² é conhecida como Ilha de Limoeiro, na qual situa-se a sede de Limoeiro do Norte. O braço oeste compreende o rio Jaguaribe propriamente dito e o braço leste é conhecido na região como rio Quixeré. Além desse rio que escoam em terrenos aluvionais, a área de estudo abrange uma pequena parte do Rio Banabuiu e Riacho Seco, que escoam na região do embasamento cristalino. Os rios Jaguaribe e Banabuiu são vales perenizados pelos açudes Orós e Banabuiu, respectivamente.

A área de estudo está inserida numa região onde a precipitação normal (dados de 1953 a 1983) é de 800 mm/ano (IPLANCE, 1997). A distribuição temporal das chuvas na região mostra que o período chuvoso tende a iniciar em dezembro e terminar em julho; sendo que de dezembro até março o volume precipitado aumenta, e a partir daí diminui até parar de chover, iniciando o período seco, que vai de agosto até novembro. No período de amostragem para este trabalho, de abril de 2000 a novembro de 2002, o ano mais chuvoso foi 2000, com 1.042 mm, ultrapassando a precipitação média da região, enquanto 2001 foi um ano de escassez de chuva (411 mm), e no ano de 2002, a precipitação acumulada foi 841 mm, semelhante à média da região, assim como a distribuição temporal.

Tabela 1 – Coordenadas geográficas da área

Vértice	Coordenada N (km)	Coordenada E (km)
1	9.456,0	606,0
2	9.456,0	628,0
3	9.416,5	628,0
4	9.416,5	588,0
5	9.432,0	588,0

Parte do Baixo Jaguaribe, onde está inserida a área, é formada por uma planície com relevo

bastante plano na zona dos aluviões. A margem direita do rio é limitada pelas rochas do Grupo Apodi, o qual é formado por uma seqüência sedimentar de idade cretácea a terciária, que preenche a bacia Potiguar, sobrepostas às rochas metamórficas e ígneas. As rochas do Grupo Apodi, que afloram na área, pertencem as Formações Açú e Jandaira (Figura 2). A superfície topográfica da Chapada do Apodi é constituída pela Formação Jandaira, a qual consiste de camadas espessas de calcários de cor amarelada, cinza claro e branco, fossilífero e repousa sobre a Formação Açú (GASPARY *et al.*, 1967).

MÉTODO

Coletas: As coletas de águas superficiais e subterrâneas foram realizadas entre abril de 2000 e novembro de 2002. As coletas de água do rio Jaguaribe foram feitas a jusante e a montante da Ilha de Limoeiro do Norte e em trechos do rio na região da ilha. As águas do Rio Banabuiu e Riacho Seco foram amostradas sob a ponte da BR 116. Todas as coletas foram feitas diretamente em frascos plásticos, inertes, fechados hermeticamente. As amostras de água de poços e cacimbas foram coletadas através de bombeamento; quando isto não foi possível foi introduzido um pequeno coletor de PVC. Após a coleta, as amostras de água foram acondicionadas em frascos inertes e hermeticamente fechados. Os pontos de amostragem estão indicados na figura 2.

Análise do Oxigênio-18: O enriquecimento (ou empobrecimento) em oxigênio-18 é expresso em delta por mil (‰) definido por:

$$\delta\text{‰} = \frac{R_{amostra} - R_{padrão}}{R_{padrão}} \times 1000$$

onde R = ¹⁸O/¹⁶O é a razão isotópica para um padrão e para a amostra, respectivamente, como indicado na definição.

Estas medidas foram feitas no CENA/USP (Laboratório de Ecologia Isotópica) em Piracicaba – São Paulo.

A dependência da concentração de oxigênio-18 com a distância à costa (efeito continental) foi avaliada por Santiago (1984), a partir de dados de oxigênio-18 das chuvas de Fortaleza (10 km da costa), Pentecoste (50 km), Inhuporanga (65 km) e Paramoti (75 km).

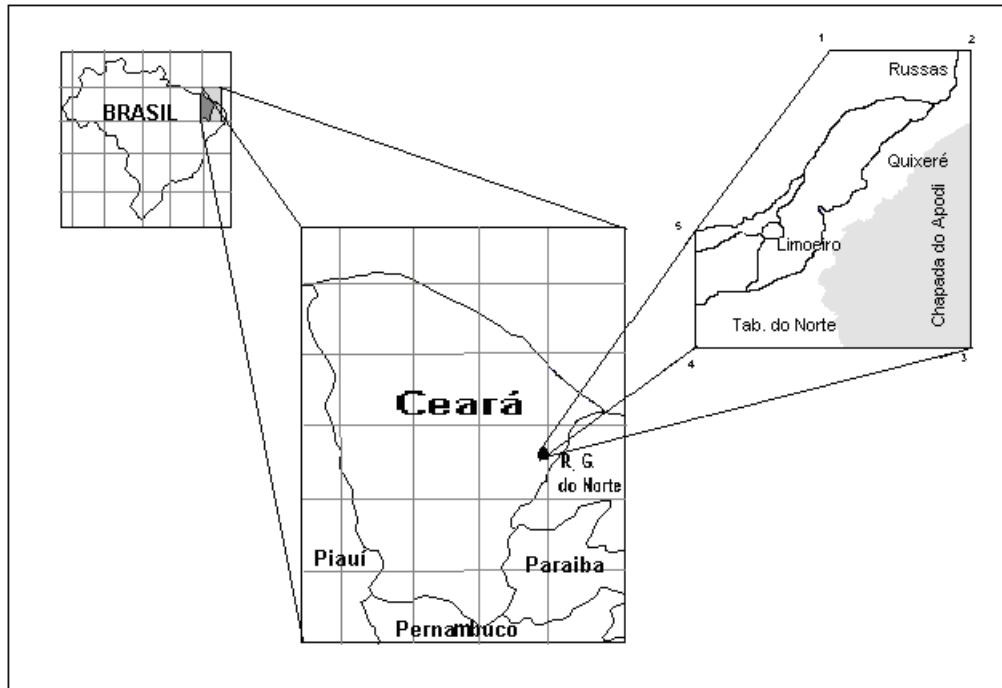


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

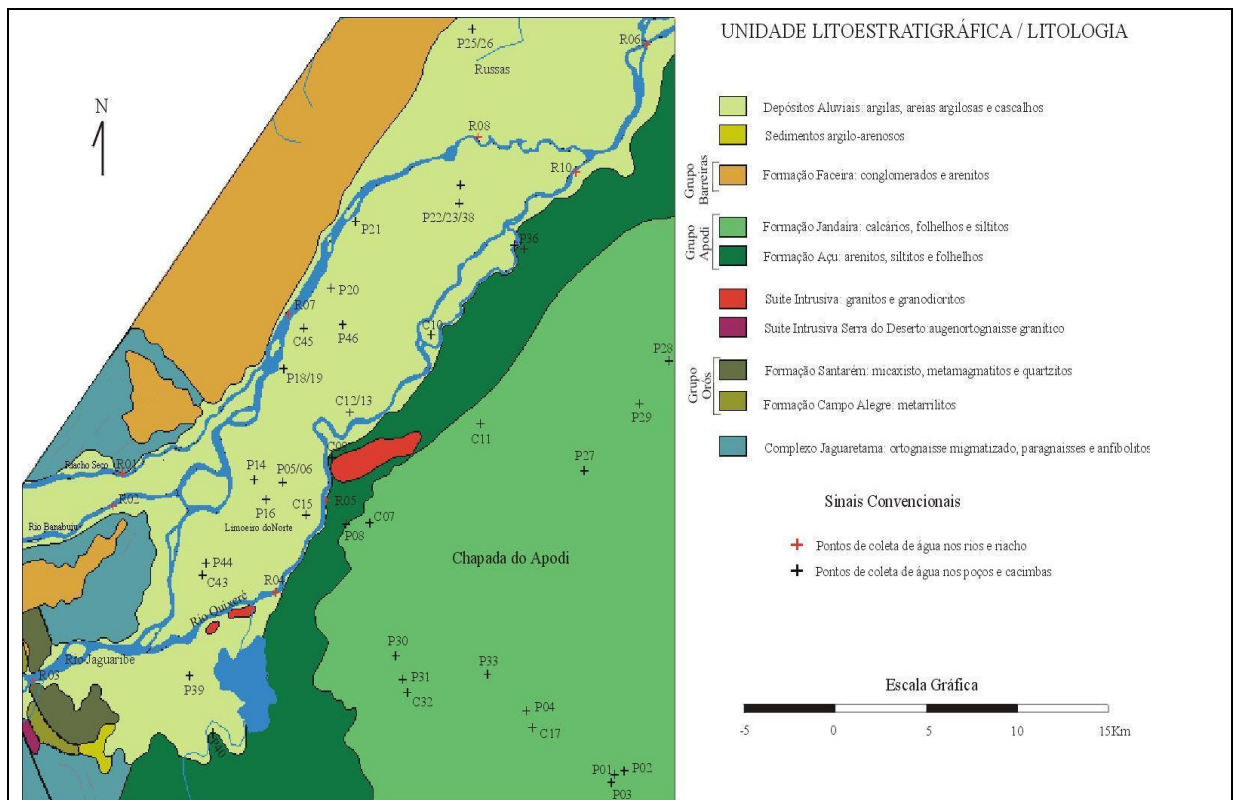


Figura 2 - Mapa geológico (CPRM, 2003) com localização dos pontos de amostragem.

A equação de correlação ($\delta^{18}O$ x distância) foi:

$$\delta^{18}O\text{‰} = -0,019 \frac{x}{km} - 1,43$$

Aplicando esta equação para as chuvas de Limoeiro do Norte, que dista cerca de 95 km do mar, obtém-se $\delta^{18}O\text{‰} \approx -3,2\text{‰}$. Este valor varia bastante com a pluviosidade do evento, mês e do ano. Porém, este valor concorda com valores encontrados no aquífero fraturado no interior do Ceará, que é considerado representativo de uma

média plurianual das chuvas (FRISCHKORN, 1989).

Análises Físico-Químicas: Foram realizadas determinações da condutividade elétrica da água e análises físico-químicas dos elementos majoritários (Cl^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2}), segundo metodologias descritas no *Standard Methods* (APHA, 1998). As análises foram realizadas no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFC. Na classificação da água, quanto aos íons dominantes, foi utilizado o diagrama trilinear de Piper.

RESULTADOS

Águas Superficiais: A figura 3 apresenta $\delta^{18}\text{O}$ para os rios Banabuiu e Jaguaribe. O rio Jaguaribe apresentou, na maioria das coletas, águas mais enriquecidas em oxigênio-18 do que o rio Banabuiu. Somente nos meses de abril/00 e fev/02, os de maior pluviosidade, o $\delta^{18}\text{O}$ do Banabuiu foi maior que a do Jaguaribe.

O maior enriquecimento em oxigênio-18 das águas do rio Jaguaribe pode estar associado aos parâmetros geométricos do açude que alimenta o rio, como maior razão área de superfície/volume do açude Orós em relação ao açude Banabuiu, o que promove uma evaporação relativa maior no primeiro; também contribui a distância entre o açude Orós e o ponto de coleta de água, 190 Km, enquanto que a distância entre o açude Banabuiu e o ponto de coleta é 110 Km. A razão entre a área e o volume acumulado do açude Orós é $0,17 \text{ km}^{-1}$ e a do Banabuiu é 0,06 (Ministério dos Transportes, 2001).

Na época chuvosa, por outro lado, esta distância também favorece um maior aporte de água pluvial pelo rio Jaguaribe, diluindo suas águas isotopicamente enriquecidas, e tornando-as pobres em isótopos pesados, em relação às do Banabuiu.

Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰): Os rios Jaguaribe e Banabuiu apresentaram uma forte variação sazonal no $\delta^{18}\text{O}$, com periodicidade relativamente bem definida. Os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ foram

observados sempre nos meses de maior pluviosidade, com menor $\delta^{18}\text{O}$ verificado em abril de 2000. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos rios Jaguaribe e Banabuiu neste mês foram respectivamente -2,31‰ e -0,63‰. As águas dos rios tornaram-se enriquecidas em oxigênio-18 nos meses secos, de elevada evaporação. O $\delta^{18}\text{O}$ foi máximo em novembro de 2001, com valor de +5,88‰ no rio Jaguaribe e média de +5,5‰. Neste mês, final do período de estiagem, os níveis dos dois açudes foram os mais baixos e as maiores vazões liberadas ocorreram. Vale ressaltar que estes valores refletem mais o estado evaporimétrico dos açudes alimentadores desses rios, Jaguaribe e Banabuiu, do que a pluviosidade atual sobre a bacia hidrográfica.

Nos meses secos, a vazão liberada pelo Orós é cerca de $12 \text{ m}^3/\text{s}$, e nos meses de intensa pluviosidade a vazão é 0,5 a $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (vazão ecológica). Portanto, as maiores concentrações de isótopos pesados, verificadas durante os meses secos, refletem a composição isotópica das águas dos açudes e as menores concentrações refletem, basicamente, a composição isotópica das águas pluviais locais.

Este comportamento também pode ser verificado comparando as figuras 3 e 4, pois na figura 4 (volume x tempo) observa-se que no período chuvoso de 2001 praticamente não houve renovação das águas dos açudes Orós e Banabuiu, portanto, se os rios neste período tivessem recebido águas de tais açudes, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ continuariam refletindo águas evaporadas. No entanto, na figura 3, observa-se que neste período, marcadamente em abril/01, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ diminuem sensivelmente, coincidindo com o maior pico de chuva do período chuvoso de 2001.

A larga variação sazonal na composição isotópica da água do rio Jaguaribe, sugere que este rio, não recebe contribuição significativa de águas subterrâneas, as quais são, na sua maioria, isotopicamente mais leves, refletindo a composição da precipitação, e mais constantes.

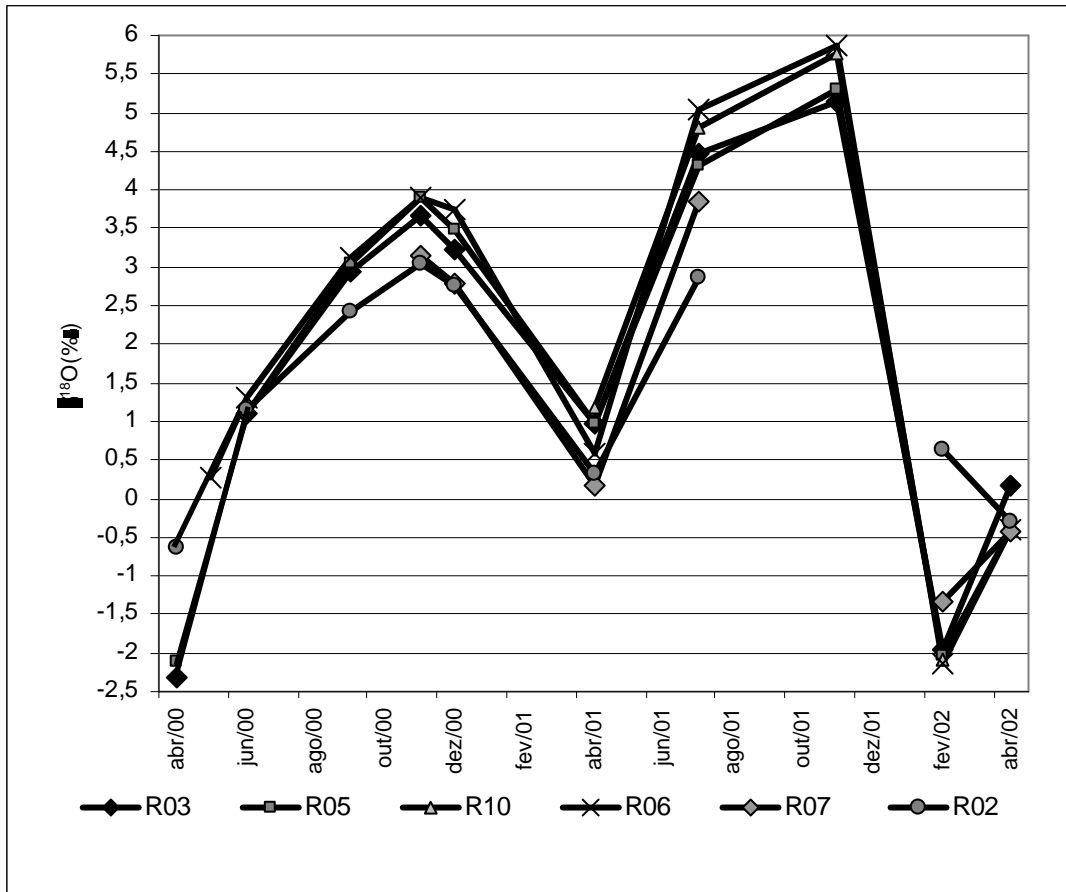


Figura 3 - Variação temporal e espacial do $\delta^{18}\text{O}$ nos rios Jaguaribe (R03, R05, R06, R07 e R10), e Banabuiú (R02).

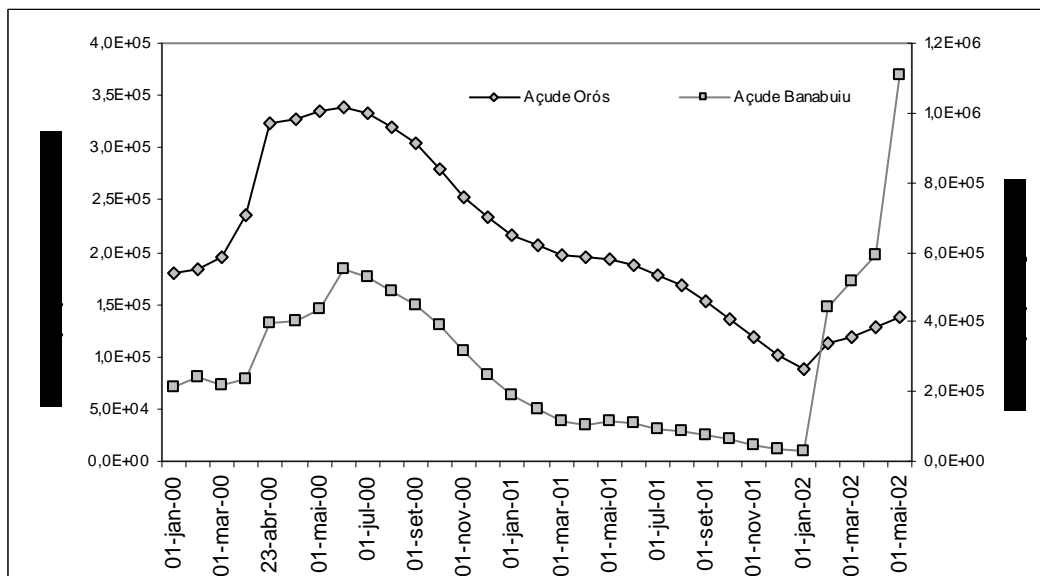


Figura 4 – Volumetria dos açudes Orós e Banabuiú *versus* tempo

Variação sazonal de $\delta^{18}\text{O}$ (‰): Os rios Jaguaribe e Banabuiú apresentaram uma forte variação sazonal no $\delta^{18}\text{O}$, com periodicidade relativamente bem definida. Os menores valores de $\delta^{18}\text{O}$ foram observados sempre nos meses de maior pluviosidade, com menor $\delta^{18}\text{O}$ verificado em abril de 2000. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ dos rios

Jaguaribe e Banabuiú neste mês foram respectivamente -2,31‰ e -0,63‰. As águas dos rios tornaram-se enriquecidas em oxigênio-18 nos meses secos, de elevada evaporação. O $\delta^{18}\text{O}$ foi máximo em novembro de 2001, com valor de +5,88‰ no rio Jaguaribe e média de +5,5‰. Neste mês, final do período de estiagem, os

níveis dos dois açudes foram os mais baixos e as maiores vazões liberadas ocorreram. Vale ressaltar que estes valores refletem mais o estado evaporimétrico dos açudes alimentadores desses rios, Jaguaribe e Banabuiu, do que a pluviosidade atual sobre a bacia hidrográfica.

Nos meses secos, a vazão liberada pelo Orós é cerca de $12\text{m}^3/\text{s}$, e nos meses de intensa pluviosidade a vazão é $0,5$ a $1\text{m}^3/\text{s}$ (vazão ecológica). Portanto, as maiores concentrações de isótopos pesados, verificadas durante os meses secos, refletem a composição isotópica das águas dos açudes e as menores concentrações refletem, basicamente, a composição isotópica das águas pluviais locais.

Este comportamento também pode ser verificado comparando as figuras 3 e 4, pois na figura 4 (volume x tempo) observa-se que no período chuvoso de 2001 praticamente não houve renovação das águas dos açudes Orós e Banabuiu, portanto, se os rios neste período tivessem recebido águas de tais açudes, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ continuariam refletindo águas evaporadas. No entanto, na figura 3, observa-se que neste período, marcadamente em abril/01, os valores $\delta^{18}\text{O}$ diminuem sensivelmente, coincidindo com o maior pico de chuva do período chuvoso de 2001.

A larga variação sazonal na composição isotópica da água do rio Jaguaribe, sugere que este rio, não recebe contribuição significativa de águas subterrâneas, as quais são, na sua maioria, isotopicamente mais leves, refletindo a composição da precipitação, e mais constantes. Uma alimentação do rio com água subterrânea, assim, amenizaria as mudanças sazonais. No entanto, vale ressaltar que esta contribuição poderia ocorrer apenas de forma temporária, não sendo registrada no período de estudo, e/ou representar um pequeno percentual.

Variação espacial de $\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$: Seguindo a direção do fluxo do rio Jaguaribe, do ponto R03 (Peixe Gordo-TN) para o ponto R05 (Pedrinhas-LN), as concentrações aumentaram nos meses de abril/00, set/00, dez/00 e nov/01 sob efeito da evaporação. Já nos meses de jul/01 e fev-abr/02 houve uma pequena redução nos valores de $\delta^{18}\text{O}$. O decréscimo verificado no mês seco (jul/01) pode estar associado a um período em que o rio é alimentado pelo aquífero aluvial, recebendo águas menos evaporadas que o valor de referência do ponto R05. No entanto, a diferença é muito pequena ($\Delta\delta^{18}\text{O}\text{‰} = -0,025$) podendo estar associada a erros de análise (de $\approx 0,15\text{‰}$). Além disso, nos pontos a jusante (R10 e R06) do

ponto R05, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ continuam aumentando no mês de julho/01, sugerindo não ocorrer entrada de água subterrânea no rio. Nos meses chuvosos a inversão de valores de $\delta^{18}\text{O}$, ao longo do rio é resultado de um maior aporte de água pluvial ao longo do rio, como verificado para os demais trechos (do R05 para o R06), nos meses chuvosos de abril/01 e fev-abr/02.

O contínuo aumento na composição de oxigênio-18, ao longo da direção do fluxo do rio Jaguaribe/Quixeré, verificado em todos os meses secos, corrobora com a hipótese que este rio não é alimentado pelas águas subterrâneas, as quais tornariam o enriquecimento isotópico por evaporação menos evidente. Além disso, o mapa potenciométrico da área, realizado em diferentes períodos do ano hidrológico, mostra apenas linhas de fluxo, a partir do rio, em direção ao aquífero aluvial (GOMES, 2005).

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO AOS ÍONS DOMINANTES

Para classificar quimicamente as águas superficiais, utilizou-se o diagrama de Piper, por suportar um número elevado de amostras e representar a distribuição iônica total, isto é, este diagrama indica a característica química da água e aponta semelhanças entre várias águas (porém, é insensível à concentração absoluta). Através dos diagramas de Piper (Figuras 10, 11, 12 e 13) observa-se que o cátion dominante nas águas superficiais foi invariavelmente o sódio, não havendo mudança qualitativa em nenhuma época do ano. Durante todo o período, a distribuição dos cátions, por abundância de maior a menor, segue, salvo raras exceções, a seguinte relação: $r\text{Na} > r\text{Ca} \geq r\text{Mg} > r\text{K}$.

O ânion dominante nas águas do riacho Seco, rio Banabuiu e rio Jaguaribe Oeste foi o cloreto, o que juntamente com as observações em campo, evidencia que estas porções do rio não receberam água no período de estudo; no entanto outros fatores podem estar relacionados com a dominância do cloreto. O rio Jaguaribe Oeste recebe água do rio Banabuiu, o qual escoar em terrenos cristalinos, e as águas armazenadas nas fendas dessas rochas são geralmente cloretadas. A concentração média dos ânions para estas águas resulta na seguinte relação: $r\text{Cl} > r\text{HCO}_3 > r\text{CO}_3 > r\text{SO}_4$.

No rio Jaguaribe, a montante e jusante da Ilha de Limoeiro (pontos R03 e R06), a concentração de bicarbonato foi quase sempre superior a do íon cloreto. A concentração média

dos ânions para estas águas resulta na seguinte relação: $r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{CO}_3 > r\text{SO}_4$.

A predominância do íon bicarbonato, devido à renovação de um pequeno volume na estação chuvosa, é característica de águas jovens. Os tipos de água encontrados foram cloretada sódica e bicarbonatada sódica. O tipo cloretada sódica predominou no riacho Seco, rio Banabuiú e rio Jaguaribe Oeste, ocorrendo mudança nos meses jul/00, set/00, nov/00 e dez/00 para água do tipo bicarbonatada sódica. Esta mudança pode estar relacionada com a renovação das águas do açude Banabuiú devido a chuvas ocorridas em julho e agosto daquele ano (Figura 4); e a alternância de água bicarbonatada para cloretada parece não estar relacionada com a concentração de cloreto por evaporação da água, visto que os valores de $\delta^{18}\text{O}$ não mostraram relação com o tipo químico (Tabela 2).

No rio Quixeré (R04 e R05) e no Jaguaribe (R03) a montante da ilha, o tipo encontrado, com exceção do mês de nov/01 e fev/02, foi bicarbonatada sódica. No mês de nov/01 a água foi cloretada sódica e em fev/02, bicarbonatada mista. Um dos fatores que causam a mudança verificada no mês de nov/01 pode ser atribuído ao efeito da evaporação, visto que neste mês foi observada a maior concentração de $\delta^{18}\text{O}$ e alguns trechos dos rios não foram amostrados porque estavam quase secos.

Do ponto R03 até R10, também escoam a mesma água, ou seja, não é notado um aporte de água de outro tipo nesse trecho, pois no mês de abr/01, em ambos os pontos a água é do mesmo tipo (bicarbonatada sódica) e $\delta^{18}\text{O}$ é o mesmo, e no mês jul/01, no R10 a água muda para cloretada em decorrência apenas da evaporação, quando pôde-se notar o aumento progressivo, ao longo do rio, nos valores $\delta^{18}\text{O}$; o efeito da evaporação sobre a química da água vai até nov/01 quando o trecho mais longo do rio (R03 para R06) apresenta águas cloretadas sódicas com valores máximos de delta de $\delta^{18}\text{O}$, da ordem de 5‰ (Tabela 2). Neste trecho do rio (R03 para R06), em duas situações (jun/00 e abr/01), foi observada uma mudança no tipo de água, ao longo do rio, no ponto R06; esta mudança para cloretada, associada a concentração de $\delta^{18}\text{O}$, reflete águas do rio Banabuiú, indicando que em alguns meses a vazão no braço oeste, do rio Jaguaribe, pode ser significativa.

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Aqüífero Jandaíra

Oxigênio-18: Medidas de $\delta^{18}\text{O}$ foram efetuadas em 4 poços (P01, P28, P08, P27) localizados na Chapada do Apodi, distribuídos espacialmente, com menor distância entre eles de 6 km. Os resultados indicam que as águas do aqüífero Jandaíra são muito uniformes (com média de $\delta^{18}\text{O} = -2,43$ e desvio padrão $\pm 0,1\%$). O valor médio de $-2,28 \pm 0,15\%$ de seis poços localizados numa área de 422 hectares, amostrados por Fernandes (2003) em ago/01, nov/01 e jun/02, inserida também na área de pesquisa da Chapada do Apodi, ratifica a homogeneidade no $\delta^{18}\text{O}$ destas águas. Isso sugere uma única fonte de recarga para este aqüífero, em todas as épocas do ano, uma vez que os valores médio de $\delta^{18}\text{O}$ referem-se à épocas chuvosas, secas e após a chuva.

Comparando estes valores com os dos rios, nota-se que o $\delta^{18}\text{O}$ na água subterrânea é muito inferior à média das águas superficiais (+1,6), o que sugere que este aqüífero não é alimentado por águas superficiais. Comparando com o valor médio das chuvas na região, que é da ordem de -3,2 ‰, os valores aproximam-se, o que sugere que as águas não sofrem evaporação significativa em superfície.

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO AOS ÍONS DOMINANTES

O comportamento químico espacial e temporal da água do aqüífero Jandaíra mostra que existem dois tipos dominantes: O tipo bicarbonatada mista, representado pelos poços P01, P03, C07 e P17 e o tipo cloretada mista, representado pelos poços C11, P27, P28, P29, P31 e P32. Nesses poços as variações temporais não chegam a mudar o tipo químico da água, de acordo com o Diagrama de Piper (Figuras 10, 11, 12 e 13).

Comparando as águas do aqüífero Jandaíra com as do rio Jaguaribe, observa-se, através das figuras 10, 11, 12 e 13, que em nenhuma época do ano os rios apresentam águas quimicamente iguais às do aqüífero; isto aconteceria se o rio recebesse uma importante contribuição do aqüífero Jandaíra. Nota-se que no rio os pontos sobre o diagrama de Piper estão mais concentrados numa área, enquanto no aqüífero os pontos estão mais dispersos, indicando maior heterogeneidade na geoquímica da água do aqüífero, devida principalmente as variações espaciais (litologia) e sazonais.

A concentração média (meq L^{-1}) dos cátions e ânions maiores, mostra a seguinte relação: $\text{rHCO}_3 > \text{rCl} > \text{rSO}_4 > \text{rCO}_3$ e $\text{rCa} > \text{rMg} > \text{rNa} > \text{rK}$.

$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$ DO AQUÍFERO ALUVIAL

O $\delta^{18}\text{O}$ das águas do aquífero aluvial (Figuras 5 e 6) apresentou uma ampla variação espacial. Em nov/01 e abr/02, quando foi amostrado um maior número de poços, a distribuição ficou entre -3,3 a +4,2‰ e entre -3,6 a +3,9‰, respectivamente. Essa ampla distribuição de $\delta^{18}\text{O}$ sugere que as águas do aquífero aluvial são uma mistura, em proporções variadas, de componentes de diferentes origens.

Os poços e cacimbas situados mais próximos do rio Quixeré (C09, C10 e P36) foram os que apresentaram valores mais positivos, entre +1,1 e +4,2‰, e o poço 05 foi o que apresentou os valores mais negativos, entre -2,6 e -3,58‰.

A maioria dos poços e cacimbas mostra variação significativa do $\delta^{18}\text{O}$ ao longo do ano; em época de chuva os valores de $\delta^{18}\text{O}$ tendem a valores menores, depois tende a aumentar devido a mistura das águas. Estas variações na concentração de $\delta^{18}\text{O}$ mostram que o aquífero responde rapidamente às mudanças sazonais, indicando uma recarga rápida e fácil.

Os poços C09, C10 e P36 são os que recebem maior alimentação pelo rio, visto que seus valores de $\delta^{18}\text{O}$ são sempre de águas evaporadas, estando, na maioria das vezes, acima do valor médio do rio (Figuras. 5 e 6). Os demais poços apresentam concentrações características de águas misturadas, formadas por água de origem pluvial e fluvial, havendo dominância em determinados meses de apenas uma fonte de recarga. O poço P19, por exemplo, em nov/01 apresenta menor valor do período, sendo compatível com o valor de chuva. Já o poço P05, em dez/00, jul/01 e nov/01, apresenta valores mais elevados, porém mais próximos da chuva que do rio, o valor médio para esses três meses

foi -2,5‰. Nos meses chuvosos, os valores tornam-se ainda menores, chegando a -3,58‰, indicando uma alimentação pelas chuvas fortes, ou além da chuva, uma alimentação, em profundidade, pelas águas da Formação Açú, as quais foram mais negativas que a chuva em dois poços (P40 e P37) situados na faixa de afloramento desta Formação. Para o poço P05, da observação conjunta das medidas de $\delta^{18}\text{O}$ e superfície piezométrica da Ilha (GOMES, 2005), fica evidenciado que a zona do aquífero na qual ocorre maior retirada de água subterrânea é também a que recebe a maior contribuição relativa oriunda das chuvas da época.

Os poços P16, P22 e P38, situados na porção central da ilha de Limoeiro, apresentaram valores de $\delta^{18}\text{O}$ mais próximos aos de chuva, no entanto o poço P16 mostra em nov/01 uma forte mistura com água superficial, passando de -3,35‰ (abr/01) para 0,44‰ (nov/01). De um modo geral, nota-se que as águas dos rios escoam significativamente em direção ao aquífero durante a descida do nível da água subterrânea, alcançando os poços mais distantes do rio (P05 e P16), nos períodos de estiagem, deixando as águas mais enriquecidas em O-18, caracterizando mistura com as águas evaporadas dos rios.

Para comparação do $\delta^{18}\text{O}$ entre as águas superficiais (rios) e do aquífero aluvial, foi utilizada a técnica estatística de Análise de Variância (ANOVA) (VIEIRA, 1999), com nível de significância de 5%. O resultado da análise estatística constatou que existe diferença média anual significativa (anos 2000 e 2001). No entanto, como já visto, em algumas áreas do aquífero as águas podem apresentar valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$, caracterizando influência de águas evaporadas (rio). Apenas nos meses chuvosos (ano de 2002) as águas superficiais e do aquífero aluvial, foram estatisticamente iguais, mostrando a dominância das chuvas.

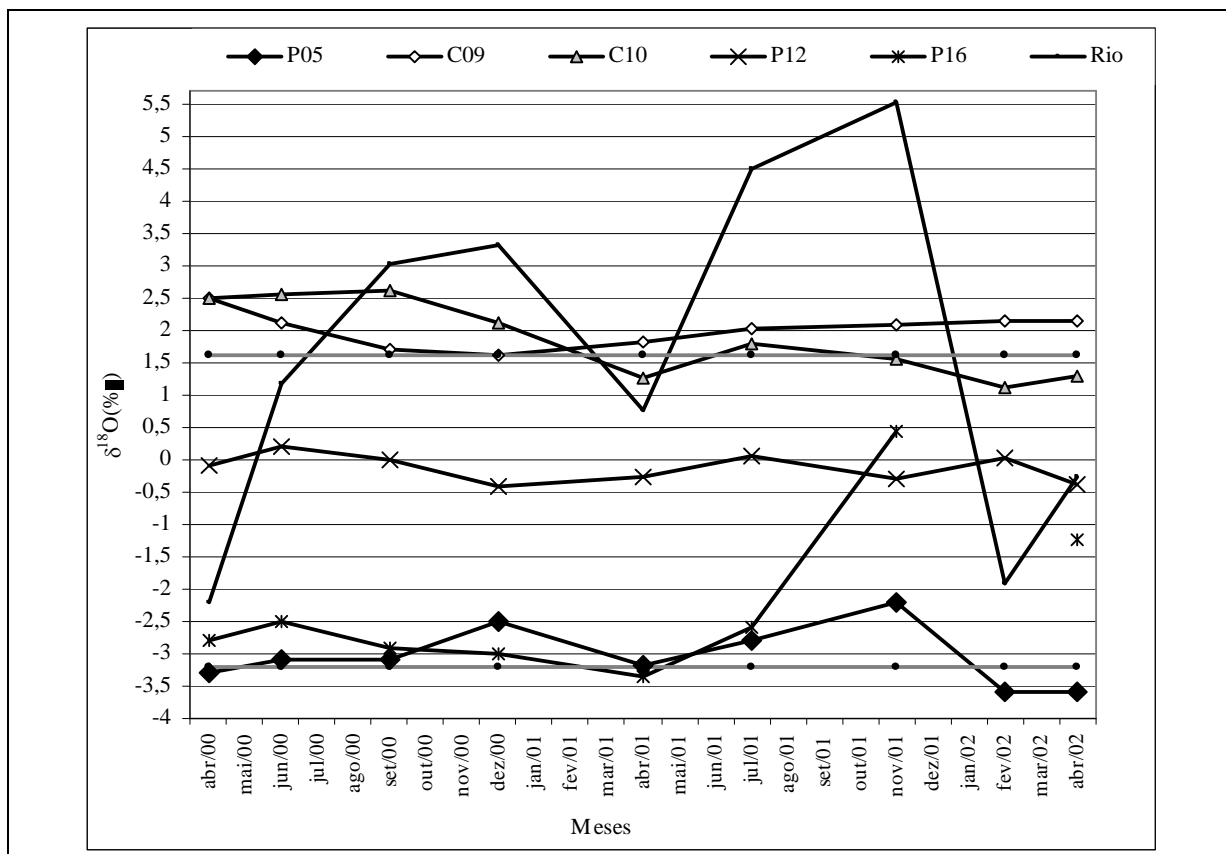


Figura 5 - Variação temporal do $\delta^{18}\text{O}$ no aquífero aluvial (poços P05, C09, C10, C12, P16) e no Rio Jaguaribe (média dos pontos R03, R05, R06, R10, R07)

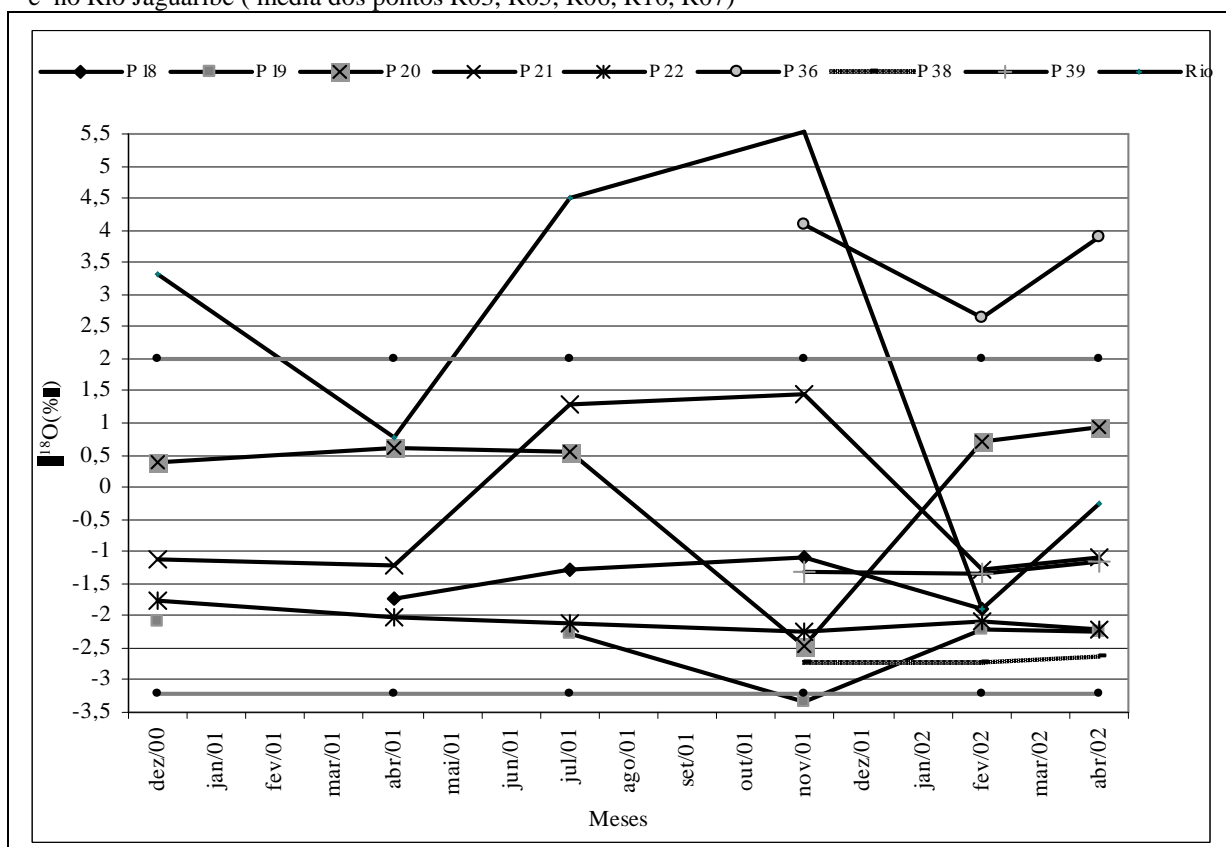


Figura 6 - Variação temporal do δO^{18} no aquífero aluvial (poços P18, P19, P20, P21, P22, P36, P38 e P39) e no Rio Jaguaribe (média dos pontos R03, R05, R06, R10, R07)

RELAÇÕES ENTRE O-18, NÍVEL ESTÁTICO E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA

Estas relações podem ser melhor compreendidas nos poços e cacimbas que tiveram um maior período de observação e que estão distribuídos a diferentes distâncias do rio. Para tanto, consideramos o poço P05 e a cacimba C10. Poço 05 – este poço localiza-se praticamente no centro da ilha de Limoeiro do Norte, dista cerca de 2,5 Km do braço leste do rio Jaguaribe (rio Quixeré) e 2,8 km do braço oeste do rio Jaguaribe; tem profundidade em torno de 25 m.

Através do gráfico da figura 7, observa-se que os parâmetros $\delta^{18}\text{O}$ e NE têm praticamente o mesmo comportamento ($r = 0,88$). Nos períodos em que o nível da água sobe, o $\delta^{18}\text{O}$ diminui, com valores de águas pluviais, caracterizando períodos de recarga de fonte predominantemente pluvial. No período chuvoso compreendido entre janeiro e abril/02, os valores de $\delta^{18}\text{O}$ foram menores que o valor de chuva ($-3,2\text{‰}$). Estes eventos podem estar associados a maior precipitação, uma vez que a abundância do $\delta^{18}\text{O}$ diminui quando as chuvas são mais intensas (efeito de quantidade).

Em dezembro de 2000, uma pequena contribuição de águas evaporadas, diminuindo sensivelmente o NE e tornando os valores de $\delta^{18}\text{O}$ menos negativos, caracterizando períodos de recarga e mistura. Durante a descida da água subterrânea, o teor em $\delta^{18}\text{O}$ aumenta, no NE máximo, registrado em nov/01, o teor em $\delta^{18}\text{O}$ é o maior, indicando que nos períodos em que NE aumenta o aquífero pode drenar águas do rio, ocasionando mistura das águas.

As curvas de $\delta^{18}\text{O}$ e CE das figuras 7 e 8, respectivamente, mostram que nos meses em que $\delta^{18}\text{O}$ é menos negativo a CE é maior. Para o mês de dez/00, como a água que entra no aquífero é do rio, o qual tem CE menor, o aumento na CE é decorrente de um processo de salinização interna do aquífero. No mês de nov/01 a elevação na CE não se deve à entrada de águas mais salina, visto que o NE não subiu. Neste mês é observada uma mistura com águas evaporadas e processo interno de salinização da água do aquífero.

Nos meses chuvosos a salinidade das águas do aquífero é a menor, o que juntamente com NE e $\delta^{18}\text{O}$ confirma eventos de recarga do aquífero pelas águas pluviais.

Apesar do poço 05 e do rio apresentarem comportamento quase paralelo ($r = 0,87$), sugerindo que este poço recebe águas do rio ao

longo do ano, isto é pouco provável devido à grande distância entre o poço e o rio. Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ coincidem com o valor de chuva, assim a recarga é feita, preferencialmente, pela chuva.

Cacimba C09 – situada na margem leste do rio Quixeré (braço leste do rio Jaguaribe), a cerca de 300 m do mesmo, com profundidade em torno de 10 m e vazão em torno $40\text{m}^3/\text{d}$.

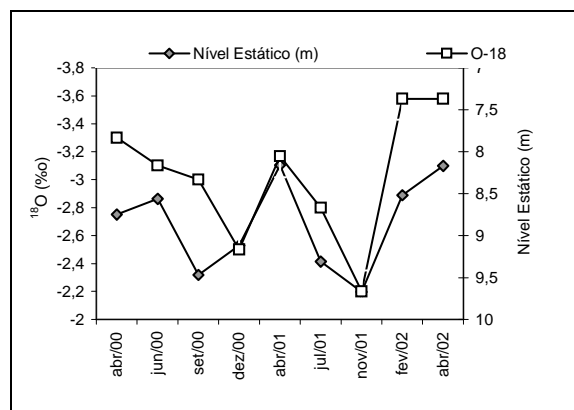


Figura 7 - $\delta^{18}\text{O}$ vs. nível estático no poço P05, com forte influência da chuva.

As concentrações de $\delta^{18}\text{O}$ refletem águas evaporadas durante todo o período de estudo, o que demonstra que as cacimbas próximas ao rio produzem águas filtradas deste durante todo o ano, e a recarga direta pela chuva é pouco significativa; os valores mostram pouca variação, situando-se muito perto do valor médio do rio. Esta cacimba produz água proveniente do rio, porém com variações de $\delta^{18}\text{O}$ reduzidas, em decorrência da distância ao rio.

A cacimba 09, juntamente com a cacimba 10 e o poço 36 (Figuras 5 e 6), demonstra que o aquífero aluvionar à direita do rio Quixeré, até cerca de 300 m de extensão a partir do rio, está em conexão direta com o rio, o qual é perenizado pelo açude Orós; portanto, esses poços podem ter uma elevada capacidade de produção.

Comparando o comportamento da condutividade elétrica da água com a precipitação, observa-se que a condutividade foi maior em alguns períodos de chuva, principalmente em 2001 (Figura 09), o que pode estar associado a uma contribuição de águas provenientes da Chapada do Apodi (Aquífero Jandaíra), as quais têm condutividade elétrica mais elevada que as águas do aluvião.

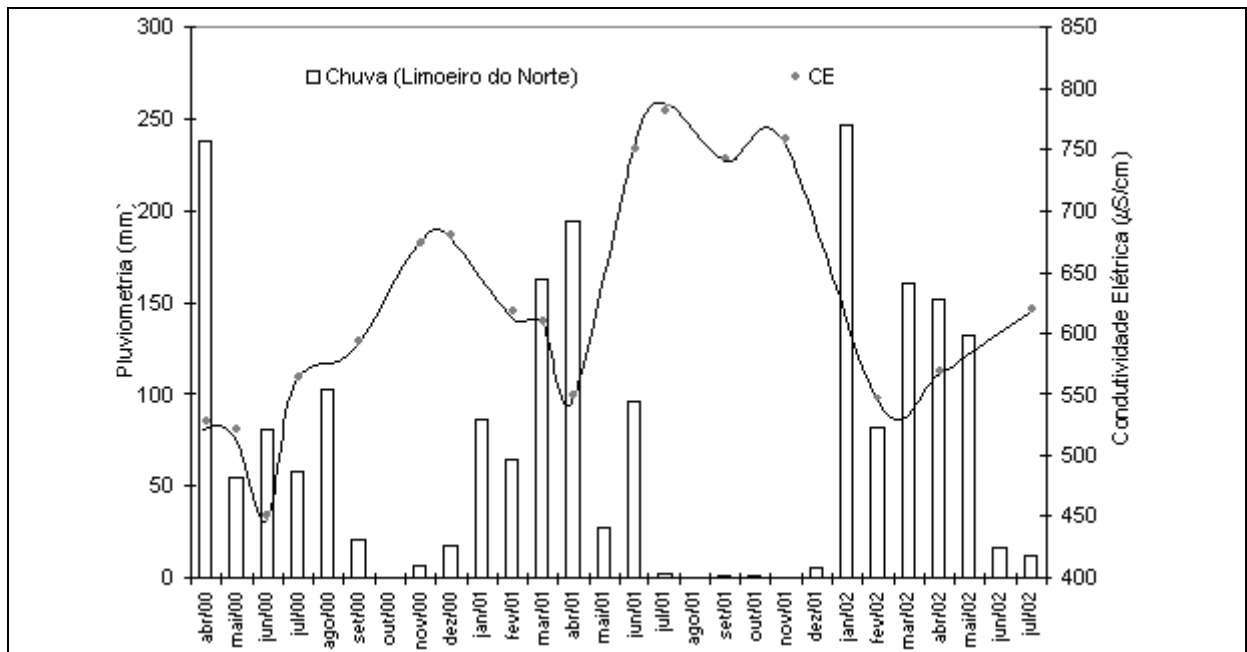


Figura 8 – Pluviosidade vs. condutividade elétrica no poço P05, com forte influência da chuva.

A condutividade elétrica média das águas de poços no aquífero Jandaira, na Chapada do Apodi, em Limoeiro do Norte, obtida de 74 poços é 1530 µm/cm com desvio padrão de 413 (GOMES, 2005 e CPRM, 1992).

Comparando o comportamento da condutividade elétrica da água com a precipitação, observa-se que a condutividade foi maior em alguns períodos de chuva, principalmente em 2001 (Figura 09), o que pode estar associado a uma contribuição de águas provenientes da Chapada do Apodi (Aquífero Jandaira), as quais têm condutividade elétrica mais elevada que as águas do aluvião. A condutividade elétrica média das águas de poços no aquífero Jandaira, na Chapada do Apodi, em Limoeiro do Norte, obtida de 74 poços é 1530 µm/cm com desvio padrão de 413 (GOMES, 2005 e CPRM, 1992).

RAZÕES DE MISTURA

As águas subterrâneas em determinada zona do aquífero aluvial, são misturas de águas de diferentes origens: águas provenientes de rios e de chuvas. Numa mistura de águas de diferentes δ¹⁸O, o valor δ da mistura é a média ponderada dos valores δ dos componentes, permitindo obter

a razão da mistura. É possível identificar os percentuais de cada componente, pelas equações de conservação isotópica e de volume,

$$V_r \delta_r + V_a \delta_a = V_p \delta_p \tag{2}$$

$$V_r + V_a = V_p \tag{3}$$

onde, δ_p, δ_a e δ_r são respectivamente os valores de δ¹⁸O do poço, do aquífero e do rio. V_p, V_a e V_r são respectivamente os volumes de água explotada pelo poço, do aquífero e do rio. Com as equações (2) e (3) obtém-se que:

$$\frac{V_r}{V_p} = \frac{\delta_p - \delta_a}{\delta_r - \delta_a} \tag{4}$$

O δ¹⁸O do aquífero refere-se a água de chuva infiltrada, sem sofrer evaporação, portanto o poço 05, com δ¹⁸O médio de -3 (Figura 5) é o que melhor representa essa condição, enquanto δ¹⁸O dos demais poços do aluvião do Jaguaribe é resultado da mistura da água do rio com a do aquífero.

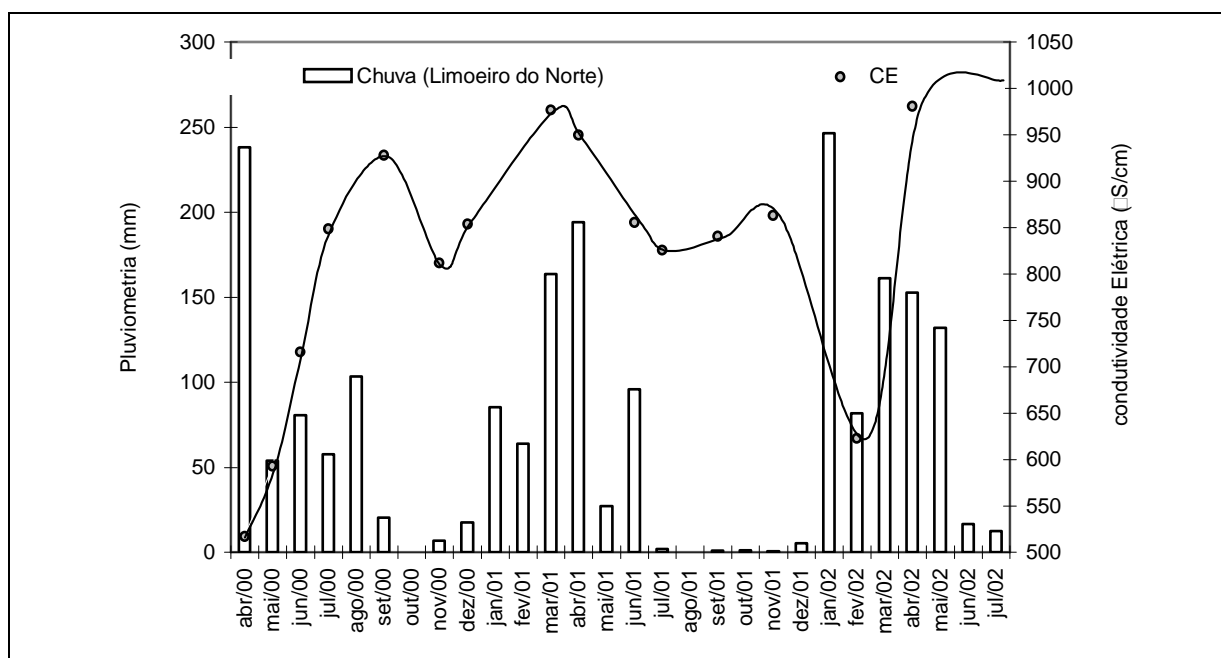


Figura 9 - Pluviosidade x condutividade elétrica no poço C09, com forte influência das águas superficiais

Tabela 3 - Percentual de água do rio Jaguaribe em águas subterrâneas bombeadas pelo poço P12

δ_p (médio)	δ_a	δ_r (médio)	$\frac{V_r}{V_p}$ (%)
-0,1	-3,0	+1,6	63

Tabela 4 - Percentual de água dos rio Jaguaribe em águas subterrâneas bombeadas pelo poço P16

Data da coleta	δ_p	δ_a	δ_r	$\frac{V_r}{V_p}$ (%)
Abr/00 a Abr/01	-2,9	-3,0	+1,43	2
Nov/01	+0,44		+5,52	40

Tabela 5 - Percentual de água do rio Jaguaribe em águas subterrâneas bombeadas pelo poço P21

Tabela 5 - Percentual de água do rio Jaguaribe em águas subterrâneas bombeadas pelo poço P21

Data da coleta	δ_p	δ_a	δ_r	$\frac{V_r}{V_p}$ (%)
Abr/01	-1,21	-3,0	+0,70	48
Nov/01	+1,44		+5,52	52
Fev/02	-1,29		-1,49	≈ 100

Os poços escolhidos para calcular as razões de mistura foram:

Poço C12: Como exemplo de poço que mantêm o $\delta^{18}\text{O}$ quase constante

Poço P16: Como exemplo de um poço que recebe recarga pluvial, mas no final da época seca recebe água do rio (Figura 6).

Poço P21: Como exemplo de poço que acompanha as variações de $\delta^{18}\text{O}$ do rio.

Utilizando a equação 4 obtém-se a contribuição de água superficial nos poços acima mencionados, considerando um erro de $\pm 5\%$. Os resultados estão nas tabelas 3,4 e 5 acima.

Os valores obtidos da razão de mistura indicam o quanto pode ser variado o percentual de água do rio bombeado pelos poços e que a razão de mistura deve ser avaliada somente na estação seca, visto que na chuvosa o $\delta^{18}\text{O}$ do rio torna-se mais negativo que o do poço, resultando em valores maiores que 100%, como observado em fev/02.

CLASSIFICAÇÃO DAS ÁGUAS QUANTO AOS ÍONS DOMINANTES

As águas do aquífero aluvial, assim como no rio Jaguaribe (Quixeré), são predominantemente sódicas. A ordem de cátions é $rNa > rCa > rMg > rK$. Quanto aos ânions, ocorrem águas bicarbonatadas, em maior quantidade, mistas e cloretadas.

As águas captadas pelos poços P05, P06, C12, C13, P14, C15, P21, P39, P43, P44, P45 e P46, com profundidades entre 15 e 25 metros, são hidroquimicamente similares (ou iguais) às águas do rio Quixeré e Jaguaribe (braço oeste). No diagrama de Piper (Figuras 10 e 11), estas águas se localizam numa área bem definida, de águas bicarbonatadas sódicas, em toda época do ano. É bem visível a similaridade com as águas do rio Jaguaribe/Quixeré.

O P16 também, na maioria das vezes cápta água bicarbonatada sódica, mas em alguns meses a química da água muda, acompanhada pelo $\delta^{18}O$, que vai de -0,35 a +0,44. Os poços P20 e

P25 captam águas quimicamente iguais às do rio Jaguaribe Oeste, as quais são predominantemente cloretadas sódicas (Figura 12).

Apenas os poços C10 e P36 apresentam águas com composição química mais aproximada às do aquífero Jandaíra, nas quais o sódio não é dominante; as águas destes poços são bicarbonatadas mistas. Como já visto, o $\delta^{18}O$ nestes poços é sempre positivo e apresenta variações. Portanto, pode-se supor que estes poços captam águas formadas da mistura da água do rio Jaguaribe/Quixeré, em maior proporção, do aquífero Jandaíra/Açu e da infiltração direta das chuvas.

Os poços P18, P19, P22 e P38 captam águas diferentes da maioria dos outros poços. São águas com concentrações relativamente elevadas em sulfato, resultando em águas mistas sódicas; mas em determinados meses foram observadas, nos poços P18 e P19, também águas iguais às do rio Jaguaribe/Quixeré.

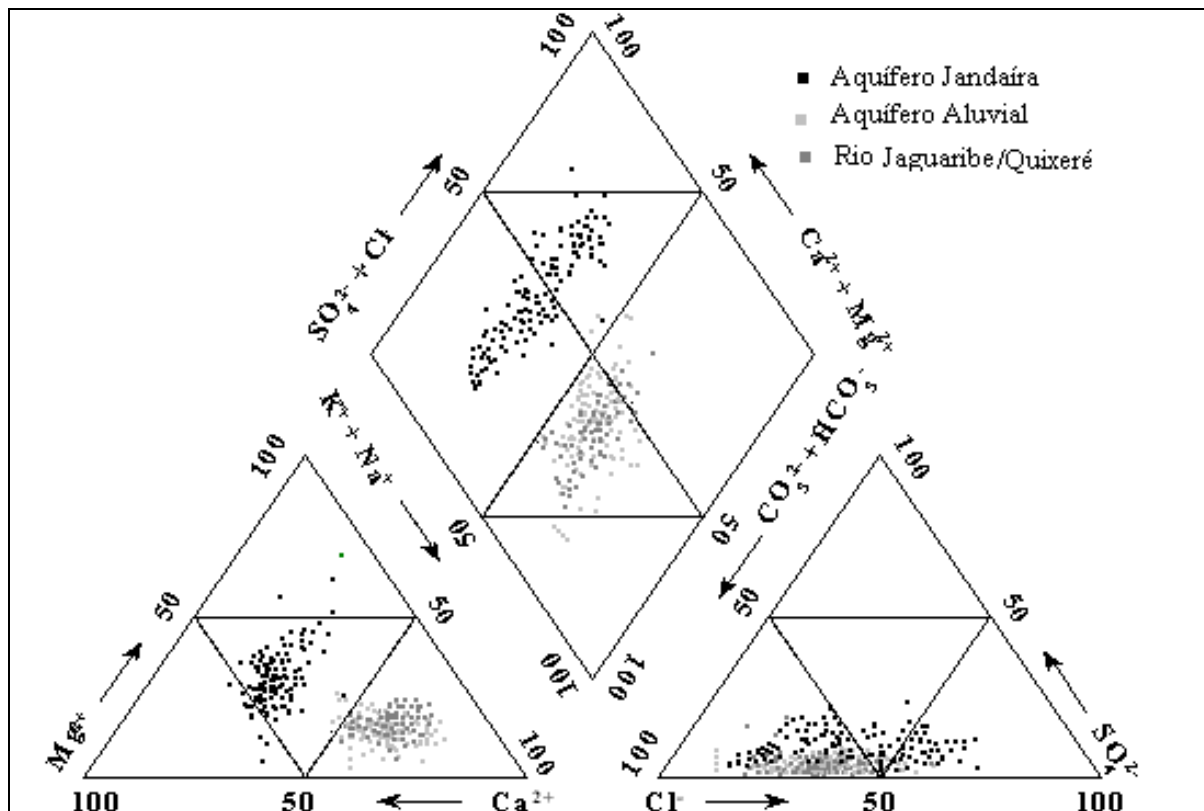


Figura 10 – Diagrama de Piper para águas do aquífero aluvial (poços P05, P06, C09, C12, C13, P14, C15, P16, P21, P39, P43, P44, P45 e P46), com comparação com as águas do rio Jaguaribe (R03, R05, R06 e R10) e do aquífero Jandaíra.

Tabela 2 - Tipos de água e valores $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (VSMOW) dos rios Banabuiu (R02) e Jaguaribe (R03, R05, R06, R07, R10 e R11)

Data da coleta	R02	R03	R05	R06	R07	R10	R11
21-abr-00	-0,63	-2,13	-2,12				
21-mai-00				+0,28			
22-jun-00	+1,15	+1,1	-1,1	+1,31			
30-jul-00							
08-set-00	+1,89	+2,9	+3,04	+3,13			
28-nov-00							
27-dez-00	+2,77	+3,22	+3,5	+3,75	+2,8		
7-fev-01							
22-mar-01							
24-abr-01	+0,33	+0,97	+0,97	+0,58	+0,18	+1,17	
21-jun-01							
31-jul-01	+2,88	+4,34	+4,13	+5,05	+3,85	+4,8	
14-nov-01		+5,16	+5,31	+5,88		+5,76	
01-fev-02	+0,63	-1,96	-2,02	-2,13	-1,33	-2,1	
24-abr-02	-0,3	+0,176	-0,39	-0,4	-0,46		+2,44
15-jul-02							

Água Bicarbonatada Sódica Água Cloretada Sódica Água Bicarbonatada + $\delta^{18}\text{O}$

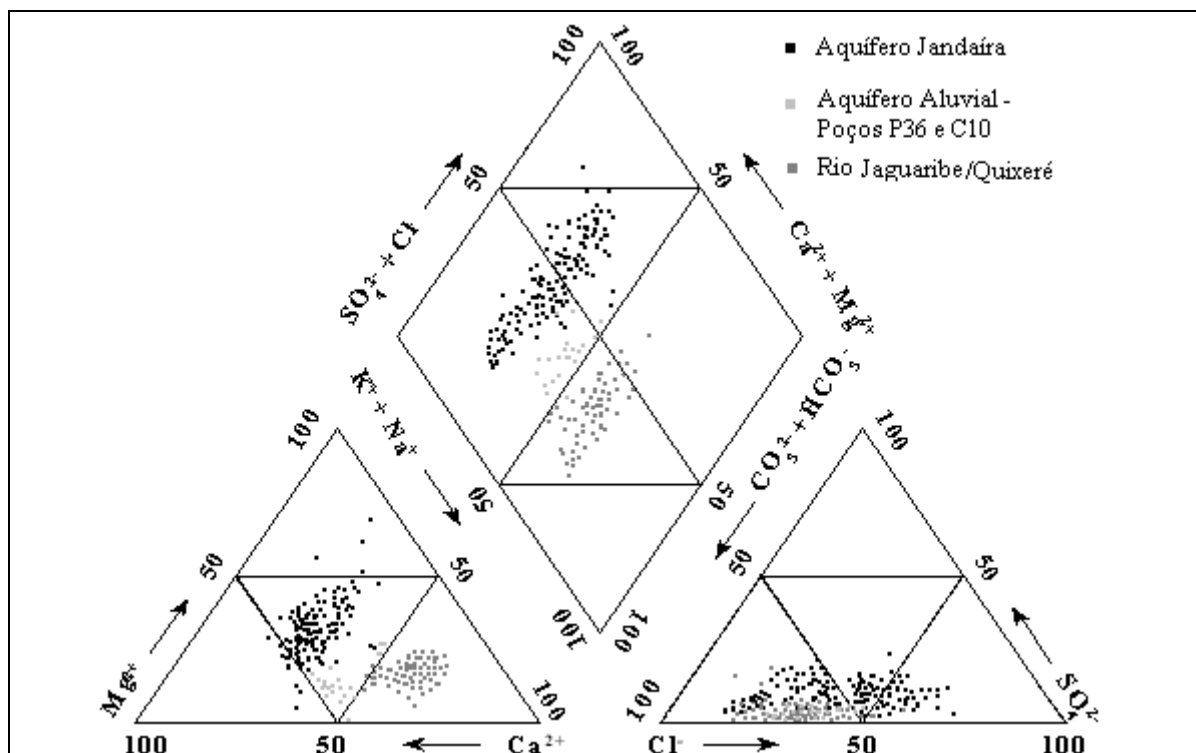


Figura 11 - Diagrama de Piper para águas do aquífero aluvial (poços P36 e C10) com comparação com as águas dos rio Jaguaribe (R03, R05, R06 e R10) e do aquífero Jandaira.

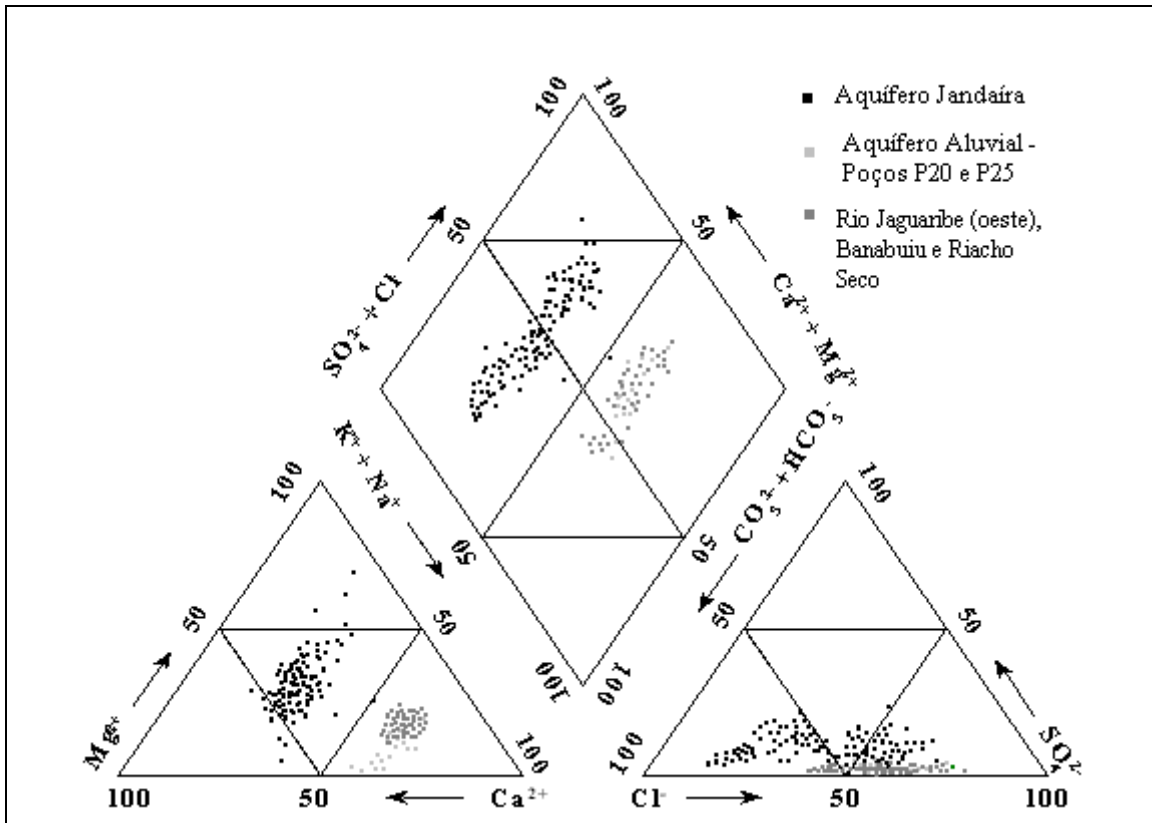


Figura 12 - Diagrama de Piper para águas do aquífero aluvial (poços P20 e P25) com comparação com as águas dos rios Jaguaribe (R07), Banabuiu e Riacho Seco, e do aquífero Jandaíra.

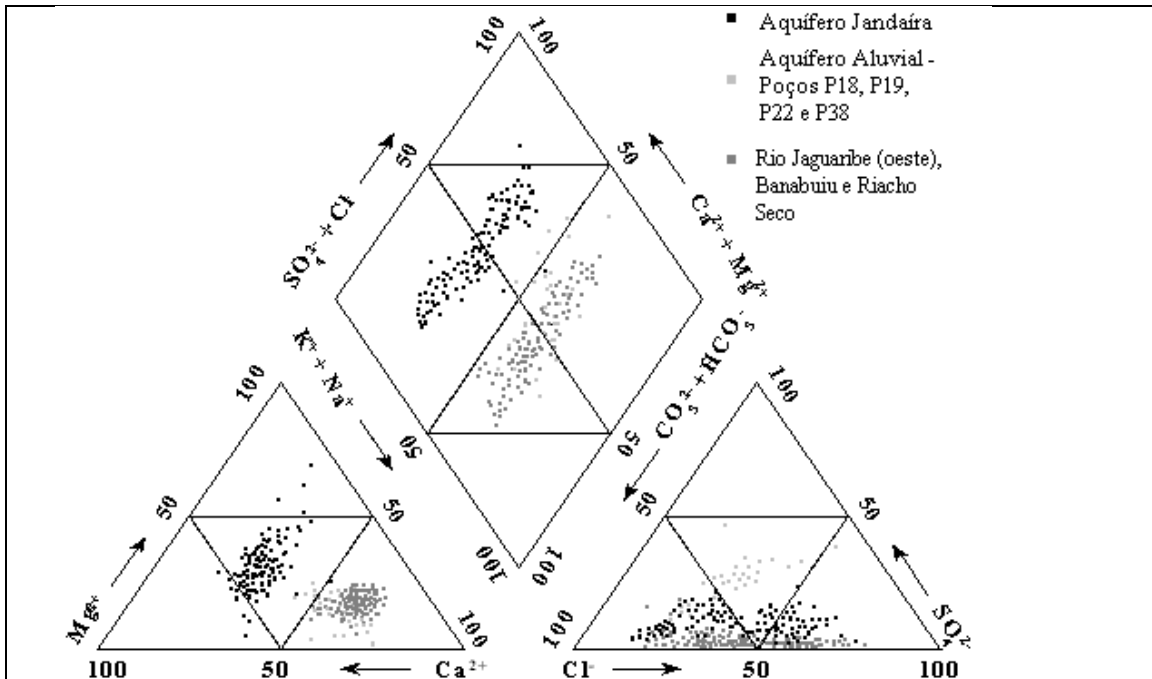


Figura 13 - Diagrama de Piper para águas do aquífero aluvial (poços P18, P19, P22 e P38) com comparação com as águas do rio Jaguaribe (R07), Banabuiu e Riacho Seco, e do aquífero Jandaíra.

CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos do estudo da hidroquímica e oxigênio-18 das águas superficiais e subterrâneas na região de Limoeiro do Norte, pode-se concluir:

1. O contínuo aumento na concentração de oxigênio-18, ao longo da direção do fluxo do rio Jaguaribe, num trecho de 50 Km, na área da Ilha de Limoeiro, verificado nos meses secos, e a larga variação temporal na concentração de oxigênio-18 (de $\delta = +5,16$ na estação seca, a $\delta = -2,31$ na estação chuvosa), resultante respectivamente da evaporação e aporte de precipitação local, sugerem que o rio não é alimentado, em nenhuma época do ano, pelas águas subterrâneas.
2. O δ^{18} O das águas do aquífero aluvial apresenta ampla variação espacial, entre $-3,3$, na porção central da Ilha de Limoeiro, e $+4,2\%$, na margem leste do rio Jaguaribe (Quixeré), indicando maior influência das chuvas da região nas zonas mais distantes do rio e com depressão da superfície hidrostática, e maior influência do rio, induzida

pelo bombeamento, nos poços com menor distância para o rio Quixeré.

3. A hidroquímica das águas do aquífero aluvial evidencia que estas são iguais às do rio Quixeré. Esse resultado, associado ao δ^{18} O das águas do aluvião, que mostra mistura de águas de origem pluvial com águas evaporadas, e à superfície piezométrica, que evidencia linhas de fluxo em direção ao centro da Ilha de Limoeiro, mostram que o aquífero aluvial é alimentado pelas águas do rio Jaguaribe, em toda época do ano.

4. Quanto aos íons maiores, o aquífero Jandaíra apresenta dois tipos de água: bicarbonatada mista e cloretada mista, os quais não foram encontrados, em nenhuma época do ano, no rio Jaguaribe (R03, R05, R06, e R10), sugerindo que o rio não é alimentado pelo aquífero Jandaíra. As razões iônicas dos rios e aquífero são diferentes, principalmente a razão rNa/rCl , que no rio é aproximadamente 2 e no aquífero é aproximadamente 0,8.

REFERÊNCIAS

- APHA/AWWA/WEF. **Standard methods for the Examination of water and wastewater**. 20 ed. Washington.1998.
- CPRM. **Atlas de geologia e recursos minerais do Ceará**: sistema de informações geográficas-SIGE. Mapas na escala 1:500.000. CPRM Serviço Geológico do Brasil, 1CD-Rom. 2003.
- FERNANDES, M.A.B. **Estudo da qualidade da água subterrânea na Fazenda Frutacor – Chapada do Apodi**. Dissertação de mestrado. Centro de Ciências. Universidade Federal do Ceará.84p; 2003.
- FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M.F.; SEREJO, A.N. Isotope Study of well in cristalline rock of the semiarid northeast of Brazil. In: International Atomic Energy Agency. **Isotope Hidrology Investigations in Latin America**, Viena, p. 73-90, 1989.
- GASPARY, J.; ANJOS, F.R.A; REBOUÇAS, A.C.; MANUEL FILHO, J.; LEAL, O.; GARAU, J.P. ; GUILLOT, P. **Estudo geral das águas subterrâneas do Baixo Jaguaribe**. In: Estudo Geral de Base do vale do Jaguaribe. Hidrogeologia. SUDENE/ASMIC. Recife.. p170-202; 1967.
- GOMES, D.F. **Estudo Hidroquímico, isotópico e da dinâmica do nível estático das águas subterrâneas e superficiais da região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe/Ceará**. Tese de doutorado. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Ceará. 218p.; 2005.
- IAEA International Atomic Energy Agency – **Stable isotope hydrology: Deuterium and Oxygen – 18 in the water cycle** Série 210. Viena, 339p.; 1981.
- MINISTERIO DOS TRANSPORTES. **Informações sobre Barragens** (atualizado em 07/10/2003). Disponível em:
<http://www.transporte.gov.br/bit/barragens/banabuiu.htm>;
<http://www.transporte.gov.br/bit/barragens/oros.htm>
Acesso em 23 dez. 2004.
- SANTIAGO, M.M.F. **Mecanismo de salinização em regiões semi-áridas. Estudo dos Açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no Ceará**. Tese de Doutorado. IG-USP–São Paulo. 176 p.; 1984.
- VIEIRA, S. **Estatística Experimental**. 2ª ed. Editora Atlas. 1999.
- IPLANCE. Fundação Instituto de Planejamento do Ceará. **Atlas do Ceara**. Fortaleza. 65p. 1997.

AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa, ao LGMA do Depto. de Geologia-UFC pelo apoio logístico e análises químicas e ao geólogo Sérgio Ricardo pelos trabalhos em campo.

