



**Sistema Aquífero Içá-Solimões em Cruzeiro do Sul, Acre:  
Caracterização Hidrodinâmica, Hidrogeoquímica e Isotópica**  
Içá-Solimões Aquifer System in Cruzeiro do Sul - Acre:  
Hydrodynamic, Hydrogeochemical and Isotopic Characterization

Talita Azevedo da Silva<sup>1</sup>; Gabriel Ramiro Mesquita<sup>1</sup>;  
Fátima Ferreira do Rosário<sup>2</sup> & Gerson Cardoso da Silva Júnior<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, Laboratório de Hidrogeologia, Avenida Athos da Silveira Ramos, 274, Bloco J, Sala J0-005, 21.941-916, Cidade Universitária / Ilha do Fundão – RJ, Brasil

<sup>2</sup> Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello - CENPES, Av. Jequitibá, 950, 21941-970, Cidade Universitária / Ilha do Fundão Rio de Janeiro, RJ, Brasil.  
e-mails: talita@geologia.ufrj.br; gabrielramirom@gmail.com; fatimariosario@petrobras.com.br; gerson@acd.ufrj.br

Recebido em: 26/03/2019 Aprovado em: 18/06/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_3\\_410\\_419](http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_410_419)

## Resumo

O município de Cruzeiro do Sul, o segundo mais populoso do estado do Acre, é abastecido majoritariamente por águas subterrâneas. O aquífero mais utilizado na região é o Içá-Solimões, do qual pouco se conhece apesar de ser muito explorado há décadas. No presente trabalho objetiva-se, portanto, estudar e caracterizar o Sistema Aquífero Içá-Solimões na região de Cruzeiro do Sul, visando minorar essa lacuna de conhecimento. O estudo baseou-se no levantamento de dados de poços tubulares cadastrados no portal SIAGAS da CPRM e no inventário de poços fornecido pelo departamento de abastecimento do Acre, bem como na obtenção de dados *in situ* durante campanha de campo realizada na região, incluindo o nivelamento de dados piezométricos, tomada de amostras e análises químicas e isotópicas realizadas em laboratório sobre essas amostras e sua posterior interpretação. Buscou-se compreender melhor as características de funcionamento hidrogeológico desse sistema. A partir dos resultados alcançados foi possível identificar ao menos três camadas com características hidrogeológicas individualizáveis no sistema, abrigadas em arenitos que se intercalam com argilitos. O mapa de nível piezométrico do sistema aquífero mostrou uma tendência local de fluxo das áreas mais elevadas da cidade, em relevo de tabuleiros, em direção aos rios. A interpretação das análises químicas permitiu a identificação de águas predominantemente bicarbonatadas-sódicas e, secundariamente, bicarbonatadas-cálcicas, oriundas da dissolução de minerais silicáticos, segundo a interpretação realizada. As camadas mais profundas apresentam química distinta das camadas mais rasas, apontando para processos diferenciados de interação água-rocha, tanto espacial como temporalmente. Os resultados isotópicos mostraram a ocorrência de águas antigas, nas camadas aquíferas mais profundas, com cerca de 18 ka. Desse modo, as áreas de recarga em potencial do aquífero profundo situa-se a oeste, muito provavelmente em território peruano.

**Palavras-chave:** hidrogeologia; hidroquímica; Içá-Solimões

## Abstract

Cruzeiro do Sul, the second most populous city in the State of Acre, is supplied mainly by groundwater. The most exploited aquifer in the region is the Içá-Solimões, of which little is known, despite being heavily exploited for decades. The present work aims, therefore, to study and characterize the Içá-Solimões Aquifer System (ISAS) in the region of Cruzeiro do Sul, in order to reduce this knowledge gap. The study was based on deep wells data from the Brazilian Geological Survey's groundwater database (SIAGAS - CPRM portal) and the well inventory of Acre Water Authority. *In situ* data collected during a field campaign conducted in the region also played a major role in the study, which included piezometric data, water sampling, chemical and isotopic analyzes and their subsequent interpretation. The purpose was to get a better understanding of ISAS hydrogeological functioning and general characteristics. Results allowed identification of at least three geological layers with distinct hydrogeological characteristics in the system, within sandstones interbedded with argillites. The piezometric level map of the aquifer system showed a local flow trend from the higher areas of the city, with a tabular relief, toward the river valleys. Interpretation of chemical analyzes showed predominantly bicarbonate-sodium and, secondarily, bicarbonate-calcium water types, resulting from the dissolution of silica minerals, according to the author's interpretation. Deeper layers present a distinct hydrochemistry from the shallow ones, pointing to differentiated processes of water-rock interaction, both spatially and temporally. The isotopic results showed the presence of ancient waters in the deepest aquifer layers, with about 18 ka of age. Thus, potential recharge areas of the deep aquifer lie to the west, most likely in Peruvian territory.

**Keywords:** hydrogeology; hydrochemistry; Içá-Solimões



## 1 Introdução

O conhecimento das características hidrogeoquímicas e isotópicas de águas que compõem sistemas aquíferos relevantes para o abastecimento de populações urbanas ou rurais é fundamental para a compreensão do funcionamento hidrológico daqueles corpos hídricos e avaliação de suas potencialidades, presentes ou futuras. Esses dados permitem o entendimento dos mecanismos de interação da água-rocha, estimativas de recarga e fluxo subterrâneo, quando associados a dados de profundidade, geometria e propriedades físicas das rochas aquíferas.

No município de Cruzeiro do Sul, segundo mais populoso do estado do Acre, o abastecimento por água de origem subterrânea equivale a cerca de 73% do abastecimento total do município, o que é devido em parte às dificuldades em aduzir e tratar os abundantes recursos hídricos superficiais na região (ANA, 2010). Para atender à crescente demanda de água para abastecimento populacional no município de Cruzeiro do Sul, estima-se que até 2025 sejam investidos até 4 milhões de reais na perfuração de novos poços, aumentando ainda mais a relevância da extração de água do sistema aquífero da região (ANA, 2010).

No presente trabalho, objetivou-se a caracterização hidrogeológica do principal aquífero da região de Cruzeiro do Sul, o Aquífero Içá-Solimões, que abastece toda essa região, envolvendo a avaliação e interpretação de suas características hidrodinâmicas, hidrogeoquímicas e isotópicas, discutindo-se o modelo conceitual de funcionamento daquele corpo hídrico e buscando-se somar elementos para a correta gestão desses importantes recursos, em suas interações com os rios, clima e padrões de exploração.

## 2 Caracterização da Área de Estudo

O município de Cruzeiro do Sul localiza-se na região Norte do Brasil, na porção Oeste do estado do Acre, em área compreendida entre as coordenadas 71°56'44" a 73°37'56" Oeste e 7°26'16" a 8°28'31" Sul, limitado com o estado do Amazonas a Norte, os municípios de Tarauacá a Leste, Porto Walter a Sul e Rodrigues Alves e Mâncio Lima à Oeste. Possui

uma área de 7925 km<sup>2</sup>. Cruzeiro do Sul conecta-se à capital do estado Rio Branco, e ao restante do país, por via aérea ou transporte rodoviário.

### 2.1 Aspectos Fisiográficos e Geológicos

Cruzeiro do Sul encontra-se em uma região quente e úmida, classificada segundo Köppen (Peel *et al.*, 2007), como de clima Am (tropical com curto período seco). O acumulado pluviométrico anual é de 2283 mm em média, com período chuvoso de setembro até maio e um período mais seco de junho até agosto, mas ainda com um acumulado razoável (INMET, 2018).

Na região de Cruzeiro do Sul e suas proximidades ocorre a Planície Amazônica e a Superfície Tabular de Cruzeiro do Sul (Cavalcante, 2010). O município encontra-se na Bacia Sedimentar do Acre (BSA), que aflora por cerca de 150.000 km<sup>2</sup> e abrange o estado do Acre e parte do estado do Amazonas (Cunha, 2007). A BSA é uma bacia de antepaís, sendo a única região do país afetada pelo sistema tectônico compressivo andino. Sua formação teve início no Paleozoico (Hasui *et al.*, 2012), estendendo-se até o presente. A sequência sedimentar aquífera, objeto do atual estudo, compreende rochas da Formação Içá e da Formação Solimões, depositadas desde o Eoceno inicial até o Quaternário (Figura 1).

A Formação Solimões é representada por sedimentos finos, argilas intercaladas com arenitos depositados em um ambiente fluviolacustre. É comum encontrar carbonatos na Fm. Solimões, em concreções e em camadas contínuas. Foi afetada pela orogênia Andina quando as falhas Oeste de Batã e Batã foram reativadas, dando origem à serra do Divisor durante o Mio-Plioceno CPRM (2015).

A Formação Içá na região de Cruzeiro do Sul caracteriza-se por arenitos finos quartzosos, por vezes conglomeráticos, com algumas intercalações argilito e siltito, sobrepostos aos sedimentos finos da Fm. Solimões (CPRM, 2015). Entre as duas formações há uma possível superfície de discordância paralela. A Fm. Içá foi depositada em ambiente continental oxidante através de processos flúvio-lacustres e de leques aluviais. Na Formação Içá no estado

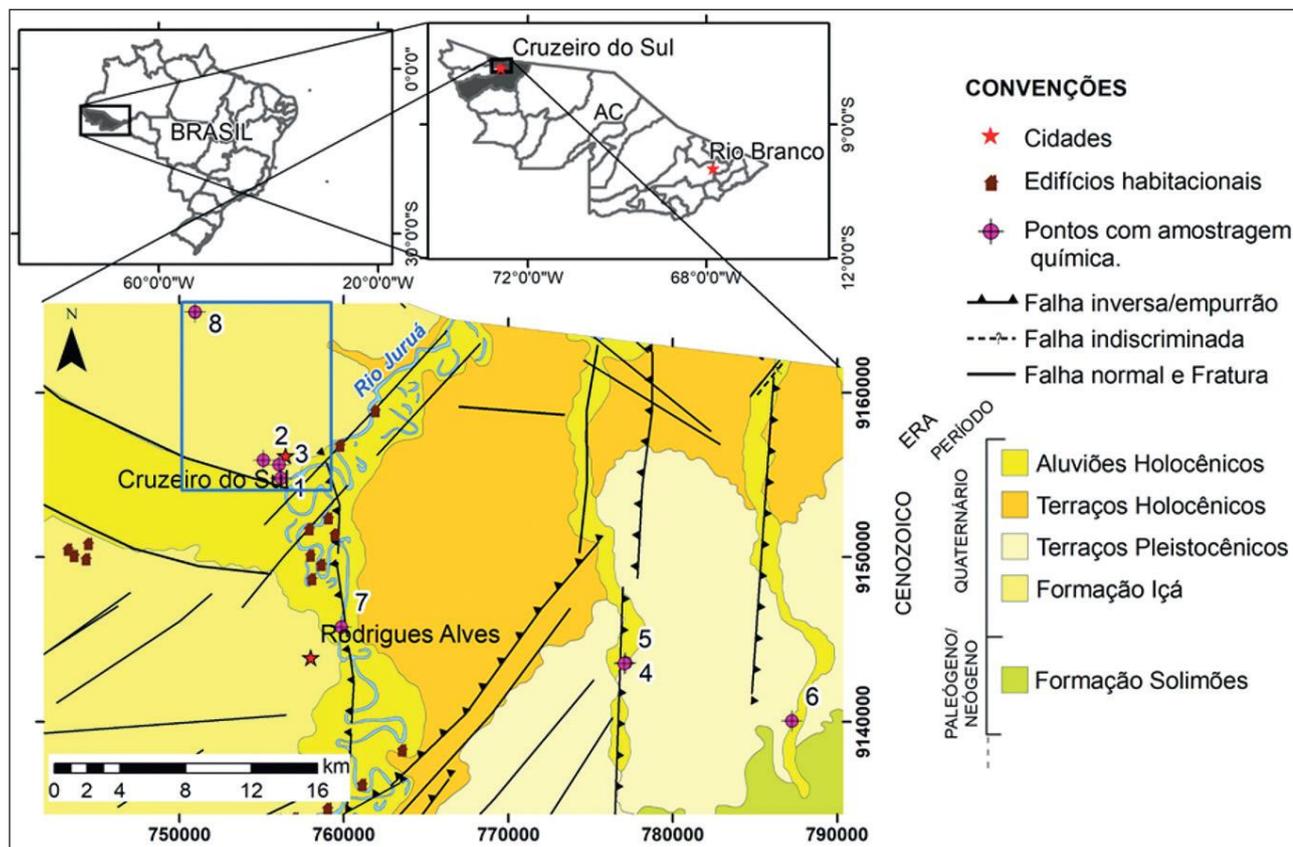


Figura 1 Localização e mapa geológico da área com a indicação dos pontos de amostragem de água. Coordenadas UTM na visada local (fuso 18S em metros). O retângulo azul no detalhe indica a área em que foram realizadas medidas de piezometria (Figura 2). Mapa geológico: IBGE, 2005.

do Amazonas, além de grãos de quartzo, um estudo apontou a presença de feldspatos, caracterizando arenitos subarcóseos em algumas áreas (Motta, 2008).

## 2.2 Hidrogeologia

O conhecimento hidrogeológico da região de Cruzeiro do Sul passou a ser mais detalhado apenas nos últimos anos, quando novos estudos foram produzidos pelo interesse de pesquisadores e de entidades governamentais. Segundo a base de dados simplificada dos sistemas hidrogeológicos do Acre, publicada pela CPRM (2015), os aquíferos presentes na área do estado são: Sistema Aquífero Solimões – SAS (87,2% da área), Sistema Aquíferos Aluvionares – SAA (10%), Sistema Aquífero Içá – SAI (2%) e Sistema Aquífero Divisor - SAD (1%). No atual estudo, optou-se por considerar o SAS e o SAI conjuntamente.

## -Sistema Aquífero Içá-Solimões (SAIS)

A existência do SAIS foi proposta primeiramente por Galvão *et al.* (2012) e posteriormente corroborada por Souza *et al.* (2013), em estudos realizados no Amazonas, pela dificuldade em separar as formações Içá e Solimões litologicamente. Ambas são compostas, predominantemente, por pelitos com intercalações locais de arenitos e calcarenitos. A presença de camadas argilosas intercaladas e superpostas às camadas arenosas dá ao aquífero um caráter semiconfinado, podendo ser livre em algumas porções específicas. A partir da correlação de perfis geológicos de alguns poços da área foi possível identificar dois horizontes com predominância de camadas arenosas no sistema: o primeiro nos primeiros 50 m de profundidade, e o segundo entre 100 e 140 m de profundidade. Entre elas existem pacotes de argilitos carbonáticos (CPRM, 2015).

Rosário (2011) e Rosário *et al.* (2016) caracterizaram o Aquífero Solimões em toda sua área de ocorrência (Acre, Amazonas e Rondônia) e obtiveram valores de capacidade específica variando entre 0,4 e 800 m<sup>3</sup>/dia/m e vazões médias de 232 m<sup>3</sup>/dia.

O Aquífero Içá tem poucos trabalhos que o estudem de modo individualizado, podendo-se citar, na área de trabalho, o de Franzolin *et al.* (2017), com uma abordagem hidrogeoquímica, e o de Pereira *et al.* (2016), com a apresentação da rede de monitoramento de água subterrânea da CPRM na BSA. Pereira *et al.* (2016) relataram que o Aquífero Içá apresenta níveis estáticos e dinâmicos variando entre 6 e 32 m e 12 e 80 m de profundidade, respectivamente. Segundo os autores a capacidade específica levantada varia entre 0,84 e 72 m<sup>3</sup>/dia/m. Franzolin *et al.* (2017) encontraram na região águas sulfetadas ou cloretadas cálcicas ou magnesianas, águas bicarbonatadas cálcicas ou magnesianas e águas bicarbonatadas sódicas.

### 3 Materiais e Métodos

Para a realização deste trabalho foram inventariados os poços existentes na região junto aos principais órgãos competentes, como por exemplo: Banco de Dados SIAGAS, disponibilizado pela Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), dados do Departamento Estadual de Pavimento e Saneamento (DEPASA) e dados da prefeitura da cidade de Cruzeiro do Sul. No total, foram levantados 77 poços na cidade e, a partir das informações disponíveis (litologia, nível de água, profundidade do poço, perfil construtivo e vazão), foi elaborada a seção geológica e o mapa piezométrico. É importante ressaltar que nem todos os poços apresentavam as informações citadas, o que dificultou a interpretação dos dados. As cotas topográficas utilizadas neste estudo foram extraídas do *software* Google Earth e foram comparadas as obtidas pelos autores com levantamento por DGPS

O mapa piezométrico foi gerado a partir da interpolação das cargas hidráulicas no *software* Surfer, onde são gerados as linhas equipotenciais e os vetores de fluxo. O aquífero estudado apresenta algumas camadas com comportamento livre (CPRM,

2015). Dessa forma, foram adicionados pontos extras de carga hidráulica posicionados no rio Juruá a fim de melhor representar o fluxo subterrâneo do aquífero local.

A avaliação hidrogeoquímica das águas do Sistema Aquífero Içá-Solimões na área estudada baseou-se na coleta de amostras de água durante a campanha de campo realizada entre 05 e 10 de outubro de 2016. Foram coletadas seis amostras água em poços de Cruzeiro do Sul e uma amostra do rio Juruá. Além disso, dados de análise química de outro poço (1100002616) realizada pela CPRM em 2013, através da Rede Integrada de Monitoramento Água Subterrânea (RIMAS), foram integrados ao estudo.

A seleção de poços a serem amostrados tiveram como requisito profundidade superior a 70 m para que fossem coletadas amostras também representativas de camadas mais profundas, com exceção de um poço de 6 m de profundidade para amostragem de água nas camadas superficiais quaternárias, e uma amostra do rio Juruá. Antes da coleta, foram realizadas as medições dos parâmetros físico-químicos *in situ* (pH, condutividade elétrica, temperatura e alcalinidade em carbonato). Amostras foram coletadas para a análise em laboratório, tendo sido medida a concentração dos íons maiores por cromatografia de íons utilizando a metodologia ASTM D6919-09 para cátions e ASTM 4327-11 para análise de ânions. Quanto as análises isotópicas, a medida de  $\delta^{2}\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  foi realizada por espectrometria a laser, e reportadas em ‰ em relação à água média do mar do padrão de Viena (VSMOW). A análise de  $\delta^{13}\text{C}$  foi realizada por meio de espectrômetro de massa de razão isotópica, em relação ao padrão V-PDB, com desvio padrão de  $\pm 0,3\%$ . A concentração de  $^{14}\text{C}$  foi obtida com o espectrômetro de aceleração de massa. Já a análise de trítio foi realizada por espectrometria de cintilação líquida após enriquecimento eletrolítico da amostra.

## 4 Resultados e Discussão

### 4.1 Piezometria

Há uma variação de até 25,1 m na superfície piezométrica medida nos poços tabela 1. O nível piezométrico (NP) dos poços na região central da cidade é mais elevado, diminuindo em direção ao rio Juruá.

A oeste, afastando-se do rio, diminui o NP de NW para SW, onde há um afluente do rio Juruá. De maneira geral, o NP aumenta do leito dos rios para áreas mais afastadas (Figura 2), mostrando que a água subterrânea está hidráulicamente conectada aos rios. Há, portanto, uma forte contribuição do aquífero livre superior aos níveis estáticos nos poços e ao nível e base dos rios locais (efluentes).

| Id | N° SIAGAS    | UTM Leste (m) | UTM Sul (m) | Prof. (m) | NP (m) | Cota - DGPS (m) | Cota - Google Earth (m) | Cota NP (m) |
|----|--------------|---------------|-------------|-----------|--------|-----------------|-------------------------|-------------|
| 1  | 1100001648   | 756052        | 9155626     | 120       | 16     | 211,65          | 207                     | 191         |
| 8  | 1100002616   | 755605        | 9159021     | 150       | 27,2   | -               | 213                     | 185,8       |
| 9  | 1100001651   | 755958        | 9156222     | 150       | 15     | -               | 211                     | 196         |
| 10 | 1100001652   | 757437        | 9157413     | 148       | 10,4   | -               | 201                     | 190,6       |
| 11 | 1100001659   | 758042        | 9156088     | 120       | 17     | -               | 192                     | 175         |
| 12 | 1100001662   | 756576        | 9157264     | 130       | 16     | -               | 215                     | 199         |
| 13 | 1100002545   | 756257        | 9154868     | 150       | 23,5   | -               | 192                     | 168,5       |
| 14 | 1100002614   | 753787        | 9157371     | 140       | 31,82  | -               | 211                     | 179,18      |
| 15 | 1100002760   | 752367        | 9161374     | 71        | 25,52  | -               | 216                     | 190,48      |
| 16 | Rio Juruá    | 757587        | 9154944     | -         | -      | -               | 165                     | 165         |
| 17 | Rio Juruá    | 756974        | 9154684     | -         | -      | -               | 165                     | 165         |
| 18 | Rio Juruá    | 758383        | 9155531     | -         | -      | -               | 165                     | 165         |
| 19 | Rio Juruá    | 756479        | 9154269     | -         | -      | -               | 165                     | 165         |
| 20 | Rio afluente | 752615        | 9154863     | -         | -      | -               | 177                     | 177         |
| 21 | 1100001655   | 757374        | 9157229     | 134       | -      | -               | -                       | -           |
| 22 | 1100002297   | 758261        | 9156701     | 150       | -      | -               | -                       | -           |

Tabela 1 Pontos utilizados para a piezometria e medidas do nível estático (NP) dos poços e empregados na seção hidrogeológica.

## 4.2 Modelo Geológico

A seção geológica traçada na região central da cidade de Cruzeiro do Sul, de direção NW-SE, permitiu a identificação de três pacotes areníticos separados por camadas espessas de argilito (Figura 3). A camada arenítica superior apresenta espessura média de 40 m, aflorando na parte central da seção, dando um caráter livre ao aquífero. A camada aquífera intermediária, com 15 a 20 m de espessura, está separada da superior por uma camada de argila que varia de 5 a 30 m de espessura do centro às bordas do perfil. Essa camada de argila confere ao corpo aquífero intermediário um caráter semiconfinado. A camada aquífera mais profunda, com cerca de 15 m de espessura, é sobreposta por um pacote de argilito com cerca de 60 m de espessura. Na re-

gião SE da seção há outras duas camadas de arenito, mas não se sabe se elas representam a camadas persistentes ou apenas lentes. O espesso pacote de argila que capeia o aquífero inferior lhe confere um caráter confinado. É importante salientar que tanto as camadas de argilito quanto a de arenito possuem partes em que são calcíferas, chegando até mesmo a ser consideradas como calcários em algumas descrições dos perfis litológicos dos poços.

Os poços existentes possuem filtros nas três camadas aquíferas, o que comprova a potencialidade de exploração de água subterrânea nesses intervalos. Deve-se ter em mente que os valores de nível piezométrico (NP) identificados nos poços são na verdade uma composição dos NPs das diferentes camadas aquíferas captadas pelos filtros dos poços.

## 4.3 Caracterização Geoquímica

As águas subterrâneas da área estudada apresentaram pH alcalino, em torno de 8, com exceção do poço raso (6 m de profundidade – amostra 5) e do poço profundo 1100002616 da rede RIMAS/CPRM (amostra 8), que apresentam pH ácido, em ambos casos similar ao da água da chuva (Tabela 2). O rio Juruá também apresentou pH alcalino. Essa predominância de caráter ligeiramente alcalino reforça a condição de “rio de água branca”, com relativamente alto teor de sais dissolvidos da dissolução de rochas nas áreas andinas e pré-andinas. Nas medidas de condutividade elétrica (CE), os poços profundos apresentaram valores elevados, entre 306 e 689  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , enquanto o poço raso (amostra 5) e o poço profundo 1100002616 (amostra 8) apresentaram valores bem mais baixos, entre 27 e 46  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , evidenciando a similaridade dessas águas. O rio possui CE de 164  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Águas com maior tempo de residência tendem a apresentar CE mais elevados, em relação a águas recém infiltradas, por apresentarem maior quantidade de íons dissolvidos. A alcalinidade varia entre 165 e 297 mg/L nos poços profundos e, novamente, foram observados no poço raso e no poço da rede RIMAS/SIAGAS valores mais baixos, entre 6,25 e 13,55 mg/L. O poço 1100002616 (amostra 8), apesar de profundo, possui características físico-químicas diferentes dos demais poços, com valores de CE, TSD, alcalinidade e pH menores, valores próximos

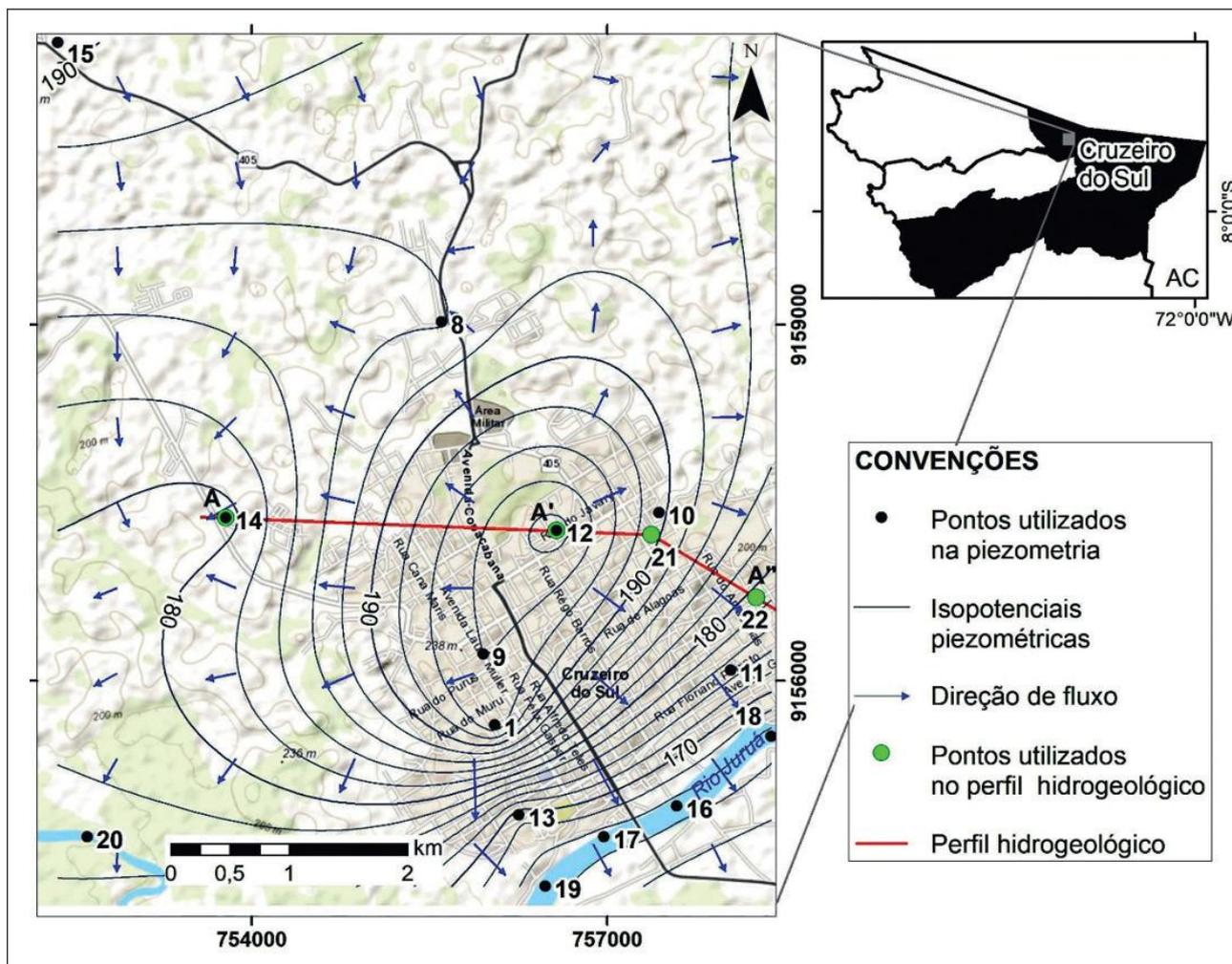


Figura 2 Rede de fluxo elaborada a partir da interpolação das cargas hidráulicas obtidas no cadastro do SIAGAS, e localização do perfil hidrogeológico da Figura 3 (A-A'-A''). Coordenadas UTM na visada local (fuso 18S em metros).

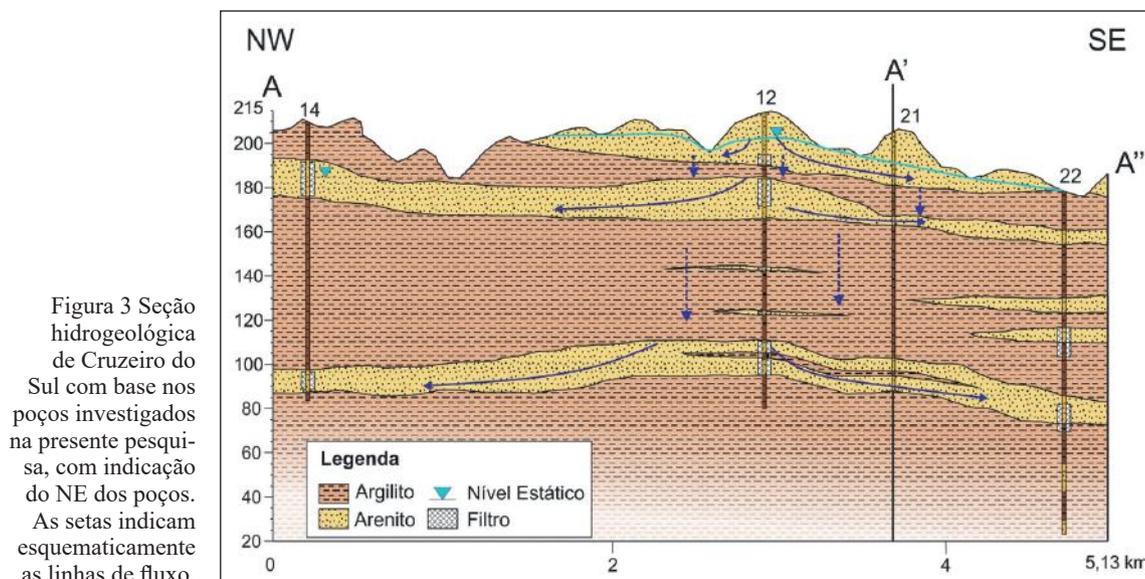


Figura 3 Seção hidrogeológica de Cruzeiro do Sul com base nos poços investigados na presente pesquisa, com indicação do NE dos poços. As setas indicam esquematicamente as linhas de fluxo.

ao do poço raso (amostra 5), o que deve representar uma maior influência do aquífero livre nesse poço em relação aos aquíferos confinados, simplesmente pelo posicionamento dos filtros. A água do Rio Juruá apresentou valores intermediários entre os encontrados nas rochas do quaternário do aquífero livre e das rochas mais antigas dos aquíferos confinados.

O diagrama de Piper permitiu agrupar as águas em dois grupos distintos: águas bicarbonatadas-cálcicas e águas bicarbonatadas-sódicas (Figura 4). A amostra 6 de poço profundo e a amostra do rio são bicarbonatadas-cálcicas. Todas as demais amostras de águas dos poços profundos e do raso são bicarbonatada-sódica. Vale ressaltar que as amostras do poço raso (amostra 5) e do poço 1100002616 (amostra 8) se diferenciam das demais amostras desse grupo pela maior concentração de cloreto e de nitrato respectivamente, sendo 2,43 mg/L e 8,89 mg/L para o poço raso (amostra 5) e 3,86 mg/L e 7,86 mg/L para o poço 1100002616 (amostra 8) (Tabela 2). Isso representa a influência de processos superficiais de mineralização, possivelmente antrópicos.

Para identificar os possíveis processos envolvidos na formação das águas encontradas no Sistema Aquífero Içá-Solimões em Cruzeiro do Sul, foram elaborados alguns diagramas binários. No gráfico  $(Ca^{+2}+Mg^{+2})$  vs.  $(HCO_3^- + SO_4^{-2})$  é possível observar que a alta concentração de bicarbonato nos poços não provém do intemperismo de carbonatos, mas sim do intemperismo de silicatos (Figura 5a). O predomínio de  $(HCO_3^- + SO_4^{-2})$  sobre  $(Ca^{+2}+Mg^{+2})$  sugere que os íons de bicarbonato e sulfato poderiam estar ligados a outros cátions antes de sofrerem dissolução, tais como,  $Na^+$  e  $K^+$ , principalmente o bicarbonato, pois apresenta teores muito mais elevados (Fisher & Mullican, 1997; Ramesh & Gowri, 2012; Singh *et al.*, 2013). Deve-se também considerar a possibilidade da contribuição parcial das camadas de argilite calcífero e camadas carbonáticas descritas na bibliografia e perfis dos poços, que poderiam ter uma influência restrita nas áreas de contato entre essas camadas e as camadas aquíferas.

A razão  $Na^+/Cl^-$  mostra as possíveis fontes desses íons no sistema. A fonte de  $Na^+$  na dissolução de halita ( $NaCl$ ), leva a razões de  $Na/Cl$  próximas

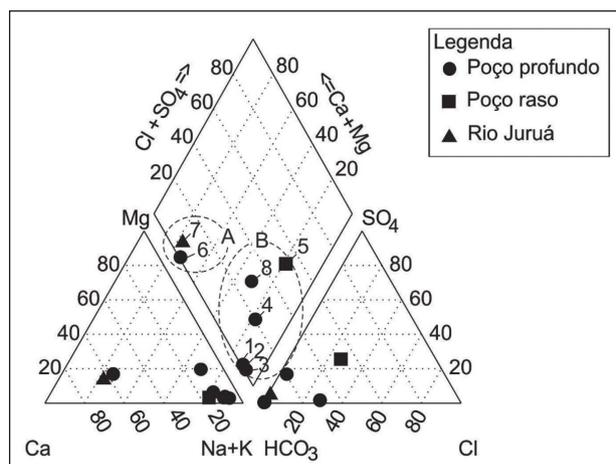
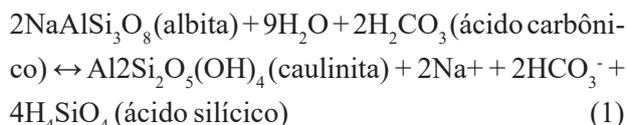


Figura 4 Diagrama de Piper das amostras: A) Águas do tipo bicarbonatada cálcica, B) Águas do tipo bicarbonatada sódica.

de 1. Na figura 5b é possível observar que praticamente todas as amostras estão acima da linha 1:1, indicando que o  $Na^+$  não provém da dissolução de halita, mas do intemperismo de silicatos como o plagioclásio sódico (albita) (Singh *et al.*, 2013). A concentração da amostra do poço 1100002616 (amostra 8) encontra-se praticamente sobre a reta 1:1, o que nesse caso parece ser resultado de contaminação antropogênica ou processos evaporativos (Srinivasamoorthy *et al.*, 2008).

Águas que derivam primordialmente da dissolução de silicatos têm  $HCO_3^-$  como o ânion mais abundante (Fisher e Mullican, 1997). O processo de intemperismo do silicato que libera sódio e bicarbonato no sistema é dado pela seguinte reação (Singh *et al.*, 2013):



O excesso de carbonato que ocorre nas amostras coletadas na região pode ser explicado pelo fenômeno descrito no parágrafo anterior, de intemperismo de silicatos.

#### 4.4 Caracterização Isotópica

O oxigênio-18 e o deutério foram analisados em quatro pontos (três poços profundos e Rio Juruá).

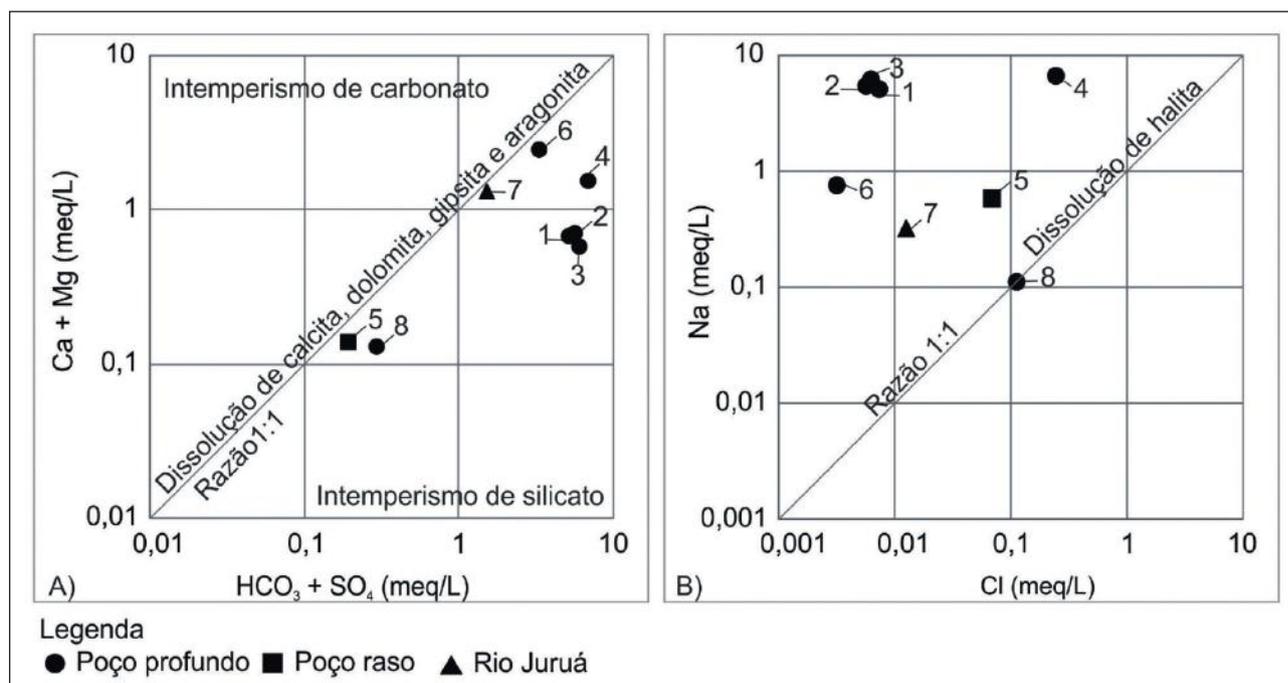


Figura 5 Diagramas binários de razões iônicas: A) Ca+Mg/HCO<sub>3</sub>+SO<sub>4</sub> (meq/L), B) Na/Cl (meq/L).

Adicionalmente, foram utilizados os dados isotópicos pluviométricos de Cruzeiro do Sul de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  da Agência Internacional de Energia Atômica (GNI-P-IAEA) para os anos de 1989 e 1990. Os valores dos dados históricos de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  na região foram ponderados em relação aos volumes de precipitação. A média obtida para os isótopos foi de  $-27,9\text{‰}$  para  $\delta^2\text{H}$  e de  $-5,35\text{‰}$  para  $\delta^{18}\text{O}$ . Todas as informações históricas e reais foram representadas em um gráfico  $\delta^{18}\text{O}$  vs.  $\delta^2\text{H}$  e comparadas com a reta meteórica mundial (RMM:  $\delta^2\text{H} = 8,2 \delta^{18}\text{O} + 11,27$ ) e a reta meteórica local (RML:  $\delta^2\text{H} = 8,08 \delta^{18}\text{O} + 14,62$ ), obtidas a partir da série histórica (Figura 6).

Em relação à água subterrânea, os valores isotópicos estão alinhados com a RMM (Figura 6), sem efeito evaporativo observado. Isso pode indicar que a água subterrânea é uma mistura de diferentes fontes de recarga, como já observado em estudos anteriores da Amazônia (Souza *et al.*, 2015; Pita *et al.* 2018). É importante observar a clara diferença entre as águas superficiais (amostra do rio e média ponderada da precipitação histórica) e subterrâneas, que indica que a recarga local real não é significativa.

Na amostra 1 de água subterrânea (poço profundo) mediu-se o conteúdo de trítio e realizou-se a

datação por radiocarbono. O conteúdo de trítio da amostra estava abaixo do limite de detecção do laboratório, de 0,6 U.T. Isso indica a pequena contribuição de água recente ao sistema, evidenciando que o poço amostrado capta água das camadas mais profundas e confinadas pelos espessos pacotes de argila. Quando se utilizam poços de captação para realizar as interpretações geoquímicas idealmente devem-se utilizar poços piezômetros, que capturem uma única camada aquífera, o que é difícil de obter mesmo em poços da rede oficial de monitoramento.

Os resultados de carbono-13 e carbono-14 apontaram para a ocorrência de águas com tempos de residência da ordem de 18 ka. Isso é mais uma evidência de que os poços utilizados na região captam águas de camadas confinadas e com águas antigas, em geral mescladas a águas de horizontes mais rasos e recentes. Estas podem ser rapidamente recarregadas pela precipitação atual.

## 5 Conclusões

A construção da seção geológica permitiu observar a existência de pelo menos três possíveis aquíferos, um superior livre, um semiconfinado

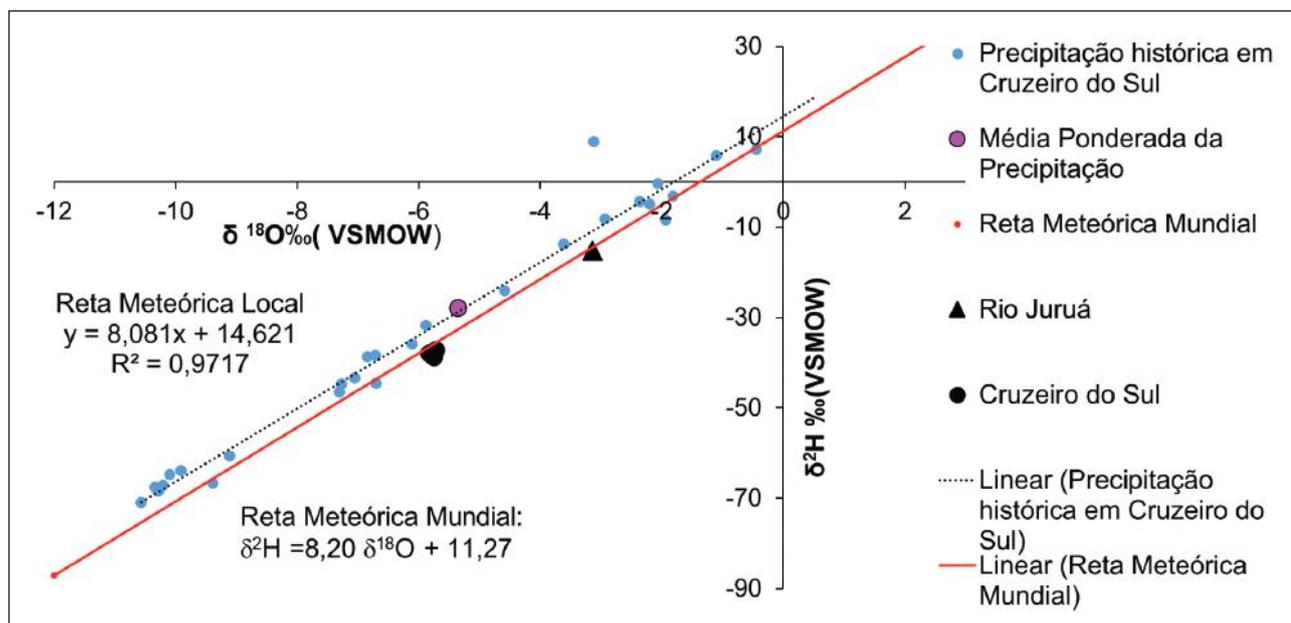


Figura 6 Gráfico da distribuição de  $\delta^2\text{H}$  e  $\delta^{18}\text{O}$  das amostras coletadas, juntamente com amostras de chuva e as retas meteóricas mundial e local da região de Cruzeiro do Sul.

| Id | Tipo        | Prof. (m) | pH   | T. ag. (°C) | T. ar (°C) | CE ( $\mu\text{S. cm}^{-1}$ ) | POR (mV) | Alc. ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | TSD ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{Na}^+$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{K}^+$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{Cl}^-$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{NO}_3^-$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) | $\text{SiO}_2$ ( $\text{mg.L}^{-1}$ ) |
|----|-------------|-----------|------|-------------|------------|-------------------------------|----------|-----------------------------|----------------------------|---|---|--------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---|---|--|---------------------------------------|
| 1  | Subterrânea | 120       | 8,14 | 27,9        | 27,6       | 495                           | 97       | 255                         | 299                        | 10                                      | 2,15                                    | 116                                  | 4,3                                 | 0,26                                 | 1,43                                      | 311                                     | 0,011                                  | 14,8                                  |
| 2  | Subterrânea | 200       | 8,28 | 31,4        | 38,9       | 656                           | 137      | 278                         | 321                        | 9,6                                     | 2,71                                    | 124                                  | 4,45                                | 0,2                                  | 1,45                                      | 339                                     | 0,067                                  | 17,3                                  |
| 3  | Subterrânea | 150       | 8,76 | 27          | 29,6       | 598                           | 145      | 297                         | 340                        | 7,91                                    | 2,17                                    | 138                                  | 4,87                                | 0,22                                 | 1,52                                      | 363                                     | 0,026                                  | 13,8                                  |
| 4  | Subterrânea | 176       | 8,4  | 26,8        | 25,5       | 689                           | 244      | 286                         | 432                        | 20,6                                    | 6,16                                    | 153                                  | 4,35                                | 8,66                                 | 57,1                                      | 349                                     | 0,15                                   | 17,3                                  |
| 5  | Subterrânea | 6,00      | 5,35 | 27,6        | 25,8       | 27                            | 286      | 6,25                        | 37,9                       | 2,29                                    | 0,28                                    | 13,2                                 | 0,57                                | 2,43                                 | 3,16                                      | 8                                       | 8,89                                   | 6,41                                  |
| 6  | Subterrânea | 150       | 8,03 | 25,5        | 25,1       | 306                           | 273      | 165                         | 199                        | 37,7                                    | 6,67                                    | 17,6                                 | 2,99                                | 0,11                                 | 0,38                                      | 201                                     | 0,063                                  | 47,6                                  |
| 7  | Rio Juruá   | -         | 7,9  | 28          | 27,6       | 164                           | 183      | 71,3                        | 109                        | 21,5                                    | 3,05                                    | 7,44                                 | 2,15                                | 0,45                                 | 4,37                                      | 87                                      | 1,37                                   | 12,3                                  |
| 8* | Subterrânea | 150       | 5,14 | -           | -          | 46,4                          | -        | 13,55                       | 62                         | 0,919                                   | 0,915                                   | 2,6                                  | 5,92                                | 3,857                                | 0,284                                     | 17                                      | 7,857                                  | 15,2                                  |

Tabela 2 Composição química da água. \* Análise realizada pela CPRM no poço monitor 1100002616 (Rede Rimas).

| Id | Tipo        | $^2\text{H}$ (‰) | $^{18}\text{O}$ (‰) | $^3\text{H}$ (UT) | $^{13}\text{C}$ (‰) | $^{14}\text{C}$ (pmc) | $^{14}\text{C}$ (BP anos) |
|----|-------------|------------------|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|
| 1  | Subterrânea | -38,1            | -5,82               | < 0,6             | -15                 | 10,2                  | 18.120 ± 75               |
| 3  | Subterrânea | -37,3            | -5,71               |                   | -                   | -                     | -                         |
| 4  | Subterrânea | -38,9            | -5,74               |                   | -                   | -                     | -                         |
| 7  | Rio Juruá   | -15,2            | -3,14               |                   | -                   | -                     | -                         |

Tabela 3 Composição isotópica da água.

intermediário, e um confinado inferior de maior profundidade. O confinado inferior provavelmente possui águas mais antigas, logo mais ricas em sais dissolvidos.

O mapa de nível piezométrico mostra que há uma forte correlação entre a cota dos poços e a cota

do nível piezométrico, o que sugere uma forte influência do aquífero superior livre na medição do nível estático dos poços selecionados, que ao final pode ser uma mescla do NE dos diferentes aquíferos que os poços atravessam. Além disso, observa-se um fluxo da parte central da cidade, área topograficamente mais elevada, em direção aos rios.

As análises químicas mostraram que os processos dominantes que ocorrem no Sistema Aquífero Içá-Solimões liberam majoritariamente os íons  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{Na}^+$  através da dissolução de feldspatos sódicos, e que a concentração desses íons é superior na camada aquífera mais profunda em comparação à camada que abriga o aquífero livre devido ao tempo de residência da água. Além disso, nota-se uma possível contaminação antropogênica do aquífero livre por cloreto e nitrato registrado nos poços que captam água de horizontes mais rasos. Vale ressaltar que apesar das análises gráficas não indicarem a dissolução de carbonatos é necessário considerar a possibilidade da influência das camadas de argilitos calcíferos e também a de carbonatos conforme relata a bibliografia. Tal influência pode ocorrer principalmente na interface entre essas camadas e as camadas aquíferas.

Os dados isotópicos indicam a existência de águas antigas (com ~18 ka) nas camadas mais profundas, principal alvo de exploração para o abastecimento da população.

## 6 Agradecimentos

À PETROBRAS pelo fornecimento de dados e financiamento das pesquisas por meio do fundo de participação especial ANP, o que viabilizou a realização das campanhas de campo e das análises laboratoriais. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsas e recursos para a pesquisa na região.

## 7 Referências

ANA - Agência Nacional de Águas. 2010. *Atlas – Abastecimento Urbano de Águas*. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/atlas/forms/analise/Geral.aspx?est=25#>. Acesso em: 06 dez. 2017.

Cavalcante, M.L. 2010. Geomorfologia do Estado do Acre. In: ACRE. SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE (SEMA). *Recursos Naturais: Geologia, Geomorfologia e Solos do Acre*. ZEE/AC, fase II – Escala 1:250.000. Rio Branco, p. 36-43.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2008. *Hidrogeologia – Conceitos e Aplicações*. 3 ed. Fortaleza: LABHID-UFPE. 811p.

CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2015. *Geodiversidade do Estado do Acre*. Porto Velho. 321 p.

Cunha, P.R.C. 2007. Bacia do Acre. *Boletim de Geociências Petrobras*. Rio de Janeiro, 15: 207-215.

Fisher, R.S. & Mullican, W.F. 1997. Hydrochemical evolution of so-

dium-sulfate and sodium-chloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 5: 4-16.

Franzolin, T.A.; Rempel, K. & Almeida, A.A.S. 2017. Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas do Sistema Aquífero Içá em Cruzeiro do Sul (AC). In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MEIO AMBIENTE SUBTERRÂNEO, 5. *Anais*, São Paulo.

Galvão, P.H.F.; Demétrio, J.G.A.; Souza, E.L.; Pinheiro, C.S.S. & Baessa, M.P.M. 2012. Hidrogeologia e geometria dos aquíferos das formações cretáceas Içá e Solimões, Bacia Paleozóica do Solimões, na região de Urucu, Amazonas. *Brazilian Journal of Geology*, 42(Suppl 1): 142-153.

Hasui, Y.; Carneiro, C.D.R.; Almeida, F.F.M. & Bartorelli, A. 2012. *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca. 900p.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2005. Estado do Acre – Geologia. Escala 1:1.000.000.

INMET. 2018. Normas climatológicas do Brasil, 1961-1990. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em: 09 jan. 2018.

Motta, M.B. 2008. *Proveniência da Formação Içá e de sedimentos do rio Solimões, entre os municípios de Tefé e Manacapuru – Amazonas*. Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade Federal do Amazonas. Dissertação de Mestrado, 112p.

Peel, M.C.; Finlayson, B.L. & McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions, European Geosciences Union*, 4(2): 439-473.

Pereira, L.A.C.; Franzolin, T.A.; Rempel, K. & Barbosa, F.A. 2016. Groundwater monitoring network in Acre sedimentary basin. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 18, E ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 19.

Pita, R.C.S.; Silva Jr., G.C.; Rosário, F.F. & Silva, M.L. 2018. Sistema aquífero Alter do Chão a oeste da cidade de Manaus (AM): processos hidrogeoquímicos, origem da salinidade e relações com aquíferos adjacentes. *Revista do Instituto de Geociências – USP Geol. USP, Sér. cient.*, São Paulo, 18(1): 27-296.

Ramesh, K. & Gowri, V.S. 2012. Silicate or calcite weathering in wet-dry climate in lower Varahanadi basin, Tamilnadu, India - A determinant in global warming. *International Journal of Environmental Sciences*, 2(4): 2155-2166.

Rosário, F.F. 2011. *O Sistema Aquífero Cretáceo Multicamada Tikuna: Subunidade de Sistema Aquífero Amazonas*. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 185 p.

Rosário, F.F.; Custodio, E. & Silva Jr., G.C. 2016. Hydrogeology of the Western Amazon Aquifer System (WAAS). *Journal of South American Earth Sciences*, 72: 375-386.

Singh, A. K.; Tiwari, A. K.; Raj, B. & Mahato, M. K. 2013. Evaluation of hydrogeochemical processes and groundwater quality in the Jhansi district of Bundelkhand region, India. *Environmental Earth Sciences*, 70(3): 1225-1247.

Srinivasamoorthy, K.; Chidambaram, S.; Prasanna, M. V.; Vasanthavihar, M.; Peter, J. & Anandhan, P. 2008. Identification of major sources controlling groundwater chemistry from a hard rock terrain – A case study from Mettur taluk, Salem district, Tamil Nadu, India. *Journal of Earth System Science*, 117(1): 49-58.

Souza, E.L.; Galvão, P.H.F.; Pinheiro, C. S. S.; Baessa, M.P.M.; Demétrio, J.G. & Brito, W.R.R. 2013. Síntese da hidrogeologia nas bacias sedimentares do Amazonas e do Solimões: Sistemas Aquíferos Içá-Solimões e Alter do Chão. *Revista do Instituto de Geociências-USP*, 13(1): 107-117.

Souza, E.L.; Galvão, P.; Almeida, R.; Pinheiro, C.; Baessa, M. & Cabral, M. 2015. Stable Isotopes Studies in the Urucu Oil Province, Amazon Region, Brazil. *Journal of Water Resource and Protection*, 7:131-142.