



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA AMBIENTAL, HIDROGEOLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS

TESE DE DOUTORADO

CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E
HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS
SAPUCARI E MARUIM, SUB-BACIA DE SERGIPE, BACIA
SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS

DANIELA DANTAS DE MENEZES RIBEIRO

SALVADOR

2018

**CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E
HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS
SAPUCARI E MARUIM, SUB-BACIA DE SERGIPE, BACIA
SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS**

Daniela Dantas de Menezes Ribeiro

Orientador: Prof. Dr. Sergio Augusto de Moraes Nascimento

Coorientador: Prof. Dr. Antonio Jorge Vasconcellos Garcia

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito à obtenção do Título de Doutor em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos.

SALVADOR

2018

Modelo de ficha catalográfica fornecido pelo Sistema Universitário de Bibliotecas da UFBA para ser confeccionada pelo autor

RIBEIRO, DANIELA DANTAS DE MENEZES
CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DOS
AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, SUB-BACIA DE SERGIPE,
BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS / DANIELA DANTAS DE
MENEZES RIBEIRO. -- Salvador, 2018.
153 f. : il

Orientador: Sergio Augusto de Moraes Nascimento.
Coorientador: Antonio Jorge Vasconcellos Garcia.
Tese (Doutorado - PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM
GEOLOGIA) -- Universidade Federal da Bahia, Instituto de
Geociências, 2018.

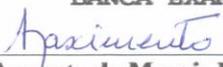
1. Vulnerabilidade. 2. Aquíferos cársticos. 3.
Transmissividade. 4. Hidrogeoquímica. 5. Isótopos estáveis. I.
Nascimento, Sergio Augusto de Moraes. II. Garcia, Antonio
Jorge Vasconcellos . III. Título.

DANIELA DANTAS DE MENEZES RIBEIRO

**“CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA E
HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS
SAPUCARI E MARUIM, SUB-BACIA DE SERGIPE, BACIA
SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS”**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Doutor em Geologia na área de concentração em Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos em 18 de janeiro de 2018.

**TESE NA MODALIDADE DE ATO PÚBLICO APROVADA PELA
BANCA EXAMINADORA:**



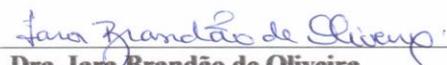
Dr. Sergio Augusto de Moraes Nascimento
Orientador – UFBA



Dr. Ricardo Galeno Fraga de Araújo Pereira
Examinador externo – UFBA



Dr. Luiz Rogério Bastos Leal
Examinador interno – UFBA



Dra. Iara Brandão de Oliveira
Examinadora externa – UFBA



Dr. Francisco Inácio Negrão
Examinador externo – CERB

Salvador – BA
2018

AGRADECIMENTOS

À minha família, pela compreensão e pelo incentivo.

Ao meu orientador, professor Sérgio Augusto de Moraes Nascimento, pela orientação, pelo incentivo, pela paciência e pela dedicação no compartilhamento de conhecimentos e na correção dos trabalhos em todas as fases.

Ao meu coorientador, professor Antonio Jorge Vasconcellos Garcia, pelo apoio na pesquisa através do Projeto Camures Carbonato (Petrobras/UFS), pelas orientações profissionais no campo e no escritório.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA, pelos conhecimentos compartilhados. A Capes pelo fornecimento da bolsa.

Aos colegas do Laboratório NEHMA, pelo apoio pessoal e profissional no desenvolvimento do trabalho, principalmente a Thiago, Lucas, Renilda e Clélia. Ao colega Sales, pelas instruções e trabalhos desenvolvidos no campo.

Ao laboratório LFNA-UFBA, pelas análises isotópicas realizadas, principalmente à professora Maria Zucchi e ao pesquisador Tércio Henrique, pelo apoio e pelas orientações.

Aos colegas parceiros do laboratório PROGEOLOGIA-UFS, Márcio, Karen, Samuel, Gustavo, e Luiz Mário, que colaboraram nas discussões geológicas e cartográficas da área.

Aos órgãos e empresas DESO, COHIDRO e SEMARH, pelo fornecimento dos dados, especialmente à DESO, pelo apoio no campo.

Ao geólogo José Walter de Aragão Meneses, da DESO, pelas discussões hidrogeológicas e apoio no campo para cadastro de poços.

Ao Gestor de Meio Ambiente da DESO, Cláudio Júlio Machado, pela colaboração no campo.

A todos aqueles que contribuíram para essa conquista, obrigada.

RESUMO

Os aquíferos cársticos Sapucari e Maruim são importantes reservas hídricas, uma vez que são responsáveis por parte do abastecimento público da Região Metropolitana de Aracaju, e dos municípios de Laranjeiras e Maruim. São compostos por rochas carbonáticas, localizadas na Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas. As zonas aquíferas estudadas encontram-se nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim. Os mapas de vulnerabilidade e risco funcionam como ferramentas de auxílio em ações de gestão de recursos hídricos, como a proteção das áreas de recarga e, conseqüentemente, a preservação da boa qualidade das águas. O método EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999) foi aplicado na pesquisa para determinar a vulnerabilidade dos aquíferos. As classes de vulnerabilidade apresentadas foram: muito alta, alta e moderada. As áreas com ocorrências de cavernas e feições cársticas, como “karrens” e dolinas, apresentaram os maiores valores de vulnerabilidade. As principais atividades potencialmente contaminantes identificadas na área são: cultivos agrícolas, exploração mineral do calcário, indústrias, aglomerados urbanos e postos de gasolina. A caracterização hidrogeológica se deu a partir da análise de parâmetros hidrodinâmicos, tais como: nível estático (NE), nível dinâmico (ND), vazão (Q), capacidade específica (Sc) e transmissividade (T), além de aspectos geológicos, geomorfológicos (feições cársticas) e estruturais. Todos os dados foram integrados em um modelo hidrogeológico conceitual. Para a determinação da transmissividade foi aplicado o método da recuperação de Theis (1935), usando a correlação T com capacidade específica (Sc). Os resultados de T são heterogêneos em ambos os aquíferos, destacando-se o Sapucari. Neste, a T média é de 725,42 m²/d, já no aquífero Maruim é de 113,42 m²/d. O volume anual de água extraída por meio de obras de captação existentes corresponde a 26,2% da reserva renovável do Sapucari e 11,6% do aquífero Maruim. A aplicação de ferramentas hidrogeoquímica e isotópicas permitiram classificar as águas subterrâneas do Sapucari e Maruim como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas (Ca-HCO₃⁻ e Ca-Mg-HCO₃⁻). A dominância dos íons HCO₃⁻ é atribuída à dissolução de carbonatos, um dos processos responsáveis pela salinização das águas subterrâneas na área. A alta correlação do STD com o sódio e os cloretos indicam a mistura de águas, devido à influência dos rios Sergipe e Cotinguiba, constituindo fator significativo no processo de salinização das águas subterrâneas. Os índices de saturação das amostras dos aquíferos Sapucari e Maruim indicam que ambos os aquíferos apresentam tendência à saturação e à supersaturação em calcita e dolomita. A análise de Componentes Principais contribui para a interpretação da influência dos rios nos aquíferos, principalmente no Sapucari, uma vez que a PC1 apresenta forte associação entre as seguintes variáveis: condutividade elétrica, sódio, potássio, magnésio, cloretos e sulfatos. Já no Maruim o cálcio e o bicarbonato apresentam boas contribuições na PC1, indicando uma predominância da dissolução de carbonatos na salinização das águas subterrâneas. Na investigação isotópica, o desvio em relação à Linha Meteorica Global é atribuído à evaporação e à mistura de águas de diferentes fontes. Os valores de δ¹³C (‰) indicam uma maior contribuição do intemperismo de carbonato por H₂CO₃⁻ e pela decomposição da matéria orgânica presente no solo.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Aquíferos cársticos. Transmissividade. Hidrogeoquímica. Isótopos estáveis.

ABSTRACT

The Sapucari and Maruim karst aquifers are important water reserves, since it responsible for a part of the public supply of the Aracaju Metropolitan Region, and the municipalities of Laranjeiras and Maruim. It is composed of carbonate rocks from the Sergipe-Alagoas Sedimentary Basin. The aquifers zones studied are located in the municipalities of Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras and Maruim. Vulnerability and risk maps function as tools to assist the water resource management actions as the recharge areas protection and, consequently, the preservation of the water quality. The EPIK method (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999) was applied in this research to determine the aquifers vulnerability. The vulnerability classes presented are: very high, high and moderate. The areas with occurrences of caves, sinkholes and karrens showed the highest vulnerability values. The main potentially contaminating activities identified in the area are: agriculture activities, limestone explotation, industries, urban development and gas stations. The hydrogeological characterization was based on the analysis of hydrodynamic parameters as: discharge; specific capacity; static and dynamic levels; transmissivity; besides geological and geomorphological features; and structural aspects, integrated in a conceptual hydrogeological model. To determine the Transmissivity (T) the Theis recovery method (1935) was used by the correlation of T with specific capacity (Sc). The results of T are heterogeneous in both aquifers, especially the Sapucari. In this aquifer, the mean of T is 725,42 m²/d, while in the Maruim aquifer is 113,42 m²/d. The annual volume of water exploited by existing catchments correspond to 26,2% of the Sapucari renewable reserve and 11,6% of the Maruim. The application of hydrogeochemical and isotopic tools allowed to classify the groundwater of the Sapucari and Maruim as Ca-HCO₃⁻ and Ca-Mg- HCO₃⁻ type. The dominance of HCO₃⁻ ions was assigned to carbonate dissolution and groundwater salinization. A high correlation of STD with sodium and chlorides indicates a mixture of waters due to the influence of the Sergipe and Cotinguiba rivers, constituting a significant factor in the groundwater salinization process. The saturation indices of the Sapucari and Maruim aquifers indicate that both aquifers show a tendency to saturation and supersaturation in calcite and dolomite. The analysis of Principal Components contributes to the interpretation of rivers influence in the groundwater composition, especially in Sapucari aquifer, since PC1 presents a strong association among the following variables: electrical conductivity, sodium, potassium, magnesium, chlorides and sulfates. In the Maruim aquifer, calcium and bicarbonate present good contributions to PC1, indicating a predominance of the carbonate dissolution in the groundwater salinization. In the isotopic investigation, the deviation from the Global Meteorological Line is assign to the evaporation and mixing of waters from different sources. The values of δ¹³C (‰) indicate a higher contribution of the carbonate weathering by H₂CO₃⁻ and the decomposition of the organic matter present in the soil.

Keywords: Vulnerability. Karst aquifers. Transmissivity. Hydrogeochemistry. Stable isotopes.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO GERAL.....	7
CAPÍTULO II - ARTIGO 1: VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE- ALAGOAS.....	16
CAPÍTULO III - ARTIGO 2: CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL.....	43
CAPÍTULO IV- ARTIGO 3: CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL.....	62
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	100
APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES.....	103
APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	104
APÊNDICE C- DETALHAMENTO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO DESENVOLVIDOS.....	131
ANEXO A- REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	148
ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES.....	150

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

O crescente desenvolvimento populacional tem ocasionado a elevação do consumo das águas subterrâneas no mundo. Uma vez que isto ocorre em diferentes domínios hidrogeológicos, o conhecimento sobre potencialidades, qualidade e riscos de contaminação das águas é fundamental para o desenvolvimento de estratégias visando a um melhor gerenciamento desse recurso natural.

As regiões cársticas apresentam interesses econômicos e hidrogeológicos por suas significativas reservas de água e singularidades de ocorrências. A exploração das águas subterrâneas em terrenos cársticos põe em risco a produtividade e, principalmente, a qualidade desses reservatórios quando se desenvolvem fatores potencialmente contaminantes, como: a agricultura, as indústrias e aglomerados urbanos.

Os aquíferos cársticos possuem grande importância uma vez que as rochas carbonáticas ocupam extensas áreas em todo o mundo, e abastecem aproximadamente 20-25% da população mundial (FORD; WILLIAMS, 2007). Apresentam características hidrológicas distintas e destacam-se por suas reservas hídricas e problemas ambientais associados à contaminação das águas, colapso de estruturas e formação de dolinas.

A pesquisa de Vulnerabilidade auxilia no gerenciamento e na proteção da qualidade das águas subterrâneas, visto que as limitações técnicas e financeiras, quase sempre existentes, dificultam a remediação de possíveis contaminações. Assim, os mapas de vulnerabilidade permitem a compreensão dos diferentes graus de fragilidade dos aquíferos, sendo utilizados como ferramenta de gestão para o desenvolvimento local e regional.

Tendo em vista a importância dos aquíferos Sapucari e Maruim para o abastecimento urbano, industrial e agrícola na região, tornam-se imprescindíveis ações de ampliação do conhecimento desses recursos hídricos.

Justificativa

A água subterrânea consiste em uma importante reserva hídrica para a área de estudo, uma vez que parte do abastecimento humano dos municípios de Aracaju e Nossa Senhora do Socorro provém desses aquíferos. Existe uma variedade de usos para as águas na área de pesquisa, destacando-se o abastecimento industrial, o uso doméstico e a irrigação. A carência de estudos hidrogeológicos no Estado de Sergipe não permite um melhor detalhamento do potencial e da qualidade dos seus reservatórios subterrâneos.

A pesquisa hidrogeológica e hidrogeoquímica proposta permite conhecer a potencialidade, a vulnerabilidade e a composição química das águas subterrâneas. A potencialidade hidrogeológica analisada a partir da variação litológica, dos sistemas de falhas e fraturas e parâmetros hidrodinâmicos calculados gera subsídios para a criação de um modelo hidrogeológico conceitual. As ferramentas hidrogeoquímicas e os mapas de vulnerabilidade são aplicados para determinar os fatores que interferem na composição química das águas e as atividades que colocam em risco sua qualidade.

Os aquíferos Sapucari e Maruim destacam-se por suas reservas potenciais e grandes vazões, no contexto do Estado de Sergipe. Por outro lado, sua elevada vulnerabilidade devido às ocorrências de cavernas e dolinas, por vezes associadas a fraturas e falhas geológicas, requerem cuidados especiais. Nessas áreas são desenvolvidas atividades potencialmente contaminantes, e devem constituir uma grande preocupação para os órgãos ambientais, pois tais atividades podem, eventualmente, comprometer a qualidade das águas desses aquíferos.

Objetivos

O objetivo principal da presente pesquisa foi realizar a caracterização hidrogeológica e hidrogeoquímica dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, porção sergipana da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas. Os objetivos específicos propostos foram: 1) Aplicar o método EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEM, 1999) na estimativa da vulnerabilidade das águas subterrâneas e na criação do mapa de vulnerabilidade; 2) Calcular a Transmissividade e as reservas hídricas; 3) Criar um modelo hidrogeológico conceitual com base nos parâmetros analisados; 4) Aplicar ferramentas estatísticas para auxiliar na caracterização hidrogeoquímica e isotópica; 5) Realizar a modelagem geoquímica com os valores do Índice de Saturação dos principais elementos analisados; 6) Realizar análises isotópicas de δD (deutério); $\delta^{18}O$ (oxigênio 18) e $\delta^{13}C_{CID}$ (Carbono Inorgânico Dissolvido); 7) Classificar as águas subterrâneas e 8) Estabelecer a qualidade das águas subterrâneas, a partir dos parâmetros analisados, segundo os padrões da Resolução n° 396/2008 do Conama (BRASIL, 2008) e Portaria n° 2.914 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

Localização da área de estudo e aspectos fisiográficos

A área de estudo, com aproximadamente 345km², compreende os municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, do estado de Sergipe (Figura 1). Encontra-se inserida na Bacia Hidrográfica do rio Sergipe, na região leste do estado de Sergipe. Está situada a 30 km de Aracaju, capital do estado. O acesso à área de estudo foi obtido pela BR-101, sentido Aracaju-Maceió, e pelas rodovias estaduais SE-090 e SE-245, respectivamente.

O clima na região é do tipo úmido a subúmido, com temperatura média anual de 25°C (CPRM, 2002). O balanço hídrico climatológico para o período de 1961-1990 indica os meses chuvosos entre março e agosto e meses secos entre setembro a fevereiro (INMET, 2016). De

acordo com os dados do INMET (2016), a precipitação média anual entre os anos de 2011 a 2015 foi de 1299 mm e a evapotranspiração potencial (ETP) de 1441,9 mm/ano.

A área de estudo encontra-se no domínio morfoestrutural da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, onde são identificadas três unidades geomorfológicas: relevos dissecados em colinas e interflúvios, terraço fluviomarinho e planície fluviomarinha.

As feições cársticas estão associadas às unidades geomorfológicas de relevos dissecados em colinas e interflúvios e planície fluviomarinha, em áreas onde os terrenos apresentam-se dissecados por ações erosivas dos rios e fluxo da água precipitada das zonas com maiores declividades para as áreas planas.

Os solos da área são caracterizados como: Argissolos; Chernossolo; Espodossolo; Gleissolo; Luvisolo e Vertissolo. O Argissolo Vermelho-Amarelo, predominante na área, abrange altitudes variáveis no relevo de colinas (relevo suave a ondulado). As rochas calcárias da Sub-Bacia Sedimentar de Sergipe favorecem a ocorrência de solos mais férteis e com maior potencial de utilização, para a cultura da cana-de-açúcar, culturas de subsistência, fruticultura e pecuária (SEMARH/PROJETEC/ TECHNE, 2010).

Os principais usos da terra na área de estudo correspondem a pastagens e cultivos agrícolas, como o de cana-de-açúcar e de subsistência. As coberturas vegetais são predominantemente de floresta estacional, mata ciliar e mangues. A primeira encontra-se em estágio avançado de degradação. Nas áreas de mangues e matas ciliares desenvolve-se a pesca artesanal de crustáceos.

As atividades de mineração, como a exploração de calcário, utilizado na indústria de cimento, construção, dentre outras, concentram-se nos municípios de Laranjeiras, Maruim e Nossa Senhora do Socorro. A exploração em escala industrial é feita por empresas como a Votorantim Cimentos (Fábrica CIMESA), situada no município de Laranjeiras, NASSAU

(Itaguassu Agro Industrial), no município de Nossa Senhora do Socorro, e INORCAL, no município de Maruim.

A exploração artesanal dos calcários dos Membros Sapucari e Maruim também é observada nesses municípios. Outras atividades industriais se destacam, como a Fábrica de Fertilizantes de Nitrogenados (FAFEN-SE) e a White Martins Gases do Nordeste.

A área de estudo encontra-se no contexto geológico da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas e dos depósitos continentais da Formação Barreiras, sobrepostos ao embasamento (setor oeste da área de estudo). Este é constituído por filitos, metaconglomerado e metarenito da Formação Itabaiana, Grupo Miaba, Domínio Vaza-Barris, que constitui o domínio geotectônico da faixa de dobramentos Sergipana.

As zonas aquíferas compreendem os terrenos carbonáticos do Grupo Sergipe, representados respectivamente pelos membros Sapucari e Maruim, das formações Cotinguiba e Riachuelo. De acordo com Feijó (1994), os membros da Formação Riachuelo são descritos como: Membro Angico (arenito branco fino a conglomerático); Membro Taquari (calcilutitos e folhelhos cinzentos); Membro Maruim (calcários dolomitizados, calcarenito e calcirrudito oncolítico oolítico creme) (Figura 1).

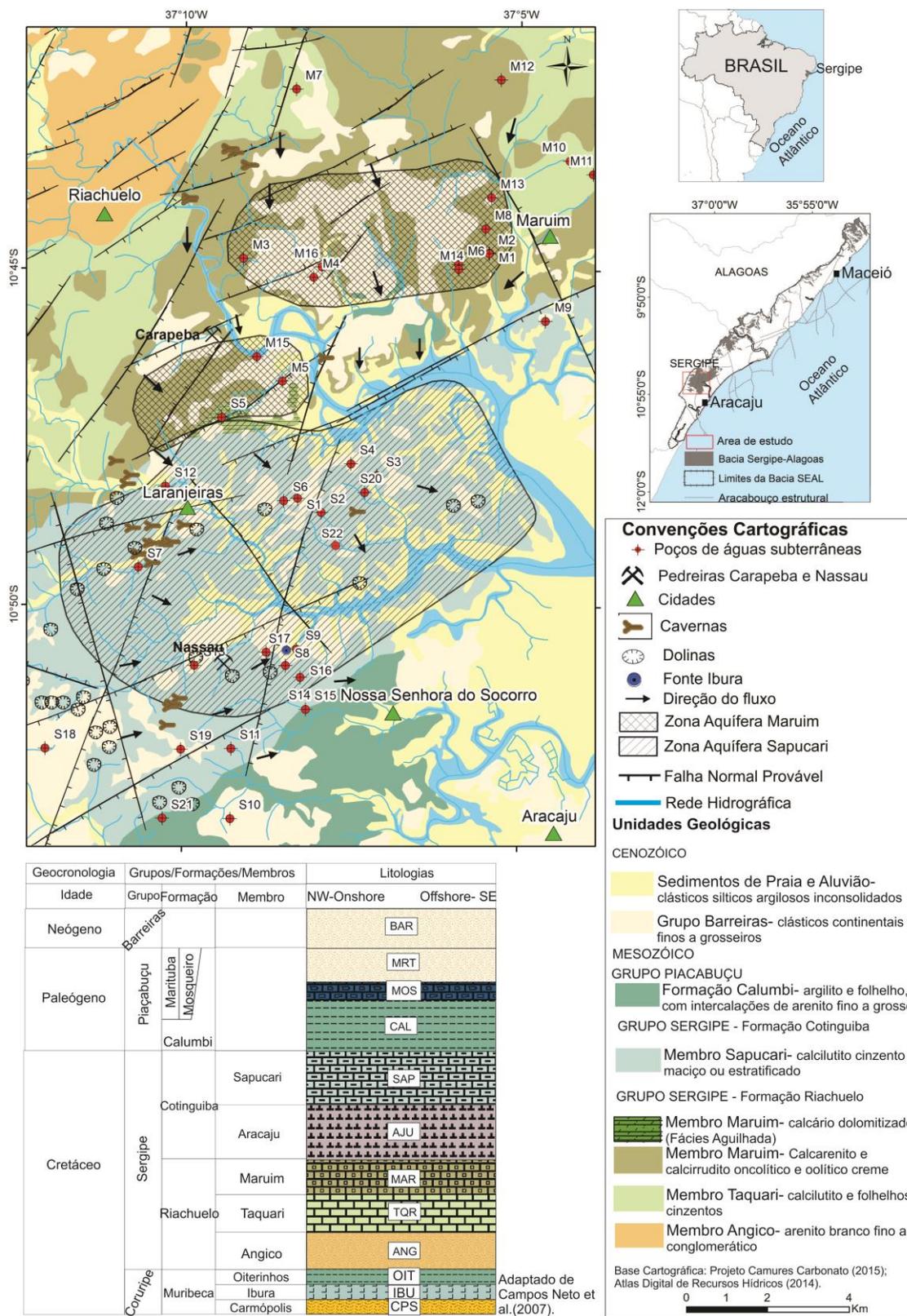


Figura 1. Localização da área de estudo (modificado de RIBEIRO; NASCIMENTO; GARCIA, 2017).

A litologia da Formação Cotinguiba permite individualizá-la em dois membros, o Aracaju e o Sapucari. O Membro Aracaju é constituído por calcilitos, folhelhos e margas, enquanto o Membro Sapucari é caracterizado por calcilitos maciços e brechóides (CAMPOS NETO et al., 2007). Sobrepostos às unidades analisadas, encontra-se a Formação Barreiras, composta por sedimentos clásticos continentais finos a grosseiros (FEIJÓ, 1994).

O aquífero Sapucari apresenta comportamento de aquífero cárstico, com desenvolvimento de condutos, e produtividade de maior destaque nos povoados Mussuca, Estiva e Machado, nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e Laranjeiras. A vazão média dos poços nesse aquífero é de 99 m³/h.

O aquífero Maruim também apresenta comportamento de aquífero cárstico, com maior produtividade nos municípios de Laranjeiras e Maruim. A ocorrência de condutos nesse Membro é menor, apresentando uma evolução de sistema com pequenas cavernas (CARVALHO JUNIOR, 2005). A vazão média dos poços nesse aquífero é de 20,6 m³/h.

O fluxo subterrâneo no aquífero Maruim exhibe feições típicas de circulação cárstica, desenvolvida ao longo de zonas fraturadas com geração de canais de magnitude não desprezível, evoluindo mesmo, em alguns casos, para cavernas (FEITOSA et al, 1998).

Formato da Tese

Conforme as recomendações do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, a tese está dividida em cinco capítulos. O primeiro capítulo refere-se à introdução; os capítulos 2, 3 e 4 incluem os artigos intitulados: “Vulnerabilidade dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas”, “Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil” e “Caracterização Hidrogeoquímica e

Isotópica dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil”. O último capítulo apresenta as conclusões da pesquisa.

Os artigos desta tese apresentam a caracterização das zonas aquíferas Sapucari e Maruim, presentes nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, com abordagens sobre a vulnerabilidade à contaminação, o potencial hidrogeológico, e as características hidrogeoquímicas e isotópicas das águas subterrâneas.

O primeiro e o segundo artigos foram publicados na revista *Águas Subterrâneas*, periódico de circulação nacional, de alta importância entre profissionais e pesquisadores da linha temática águas subterrâneas. Essa revista possui conceito CAPES B2, que atende aos requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia (PPGEO). O terceiro artigo foi submetido à revista *Environmental Earth Sciences*.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Resolução 396, de 03 de abril de 2008. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências. Disponível em: <http://conama.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2014.

CAMPOS NETO, O. P. A.; LIMA W. S.; CRUZ F. E. G. Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n. 2, p. 405-415, 2007.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS (CPRM)/ SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (SEPLANTEC). **Projeto Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste- Sergipe**. Aracaju: CPRM, 2002.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balço hídrico e dados climatológicos**. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em 10 jan. 2016.

CARVALHO JÚNIOR, A. L. P. **Hidrogeologia e Processos Cársticos nas Formações Muribeca, Riachuelo e Cotinguiba na Bacia SE/AL em Sergipe**. São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005. 146 f. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection area using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology: International Journal of Geosciences**, v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.

FEIJÓ, F. J. Bacia de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro. v. 8, n.1, p. 149-161. 1994.

FEITOSA, E. C. (Coord.) et al. **Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela**. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE.PETROBRAS, 175 p.,1998.

FORD, D., WILLIAMS, P. **Karst Hidrogeology and Geomorfology**. Ed.Wiley, 2007. 576 p.

RIBEIRO, D. D. de M.; NASCIMENTO, S. A. de M.; GARCIA, A. J. V. **Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil**. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 3, p.207-221, 28 maio 2017.

SEMARH/PROJETEC/ TECHNE. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Sergipe- SEMARH/ Projetos Técnicos Ltda- PROJETEC/ Engenheiros Consultores Ltda- TECHNE. **ELABORAÇÃO DOS PLANOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS JAPARATUBA, PIAUÍ E SERGIPE- Diagnóstico Integrado da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba**. Aracaju-SE, 2010.

CAPÍTULO II

ARTIGO 1 – VULNERABILIDADE DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS

RESUMO

Os aquíferos cársticos Sapucari e Maruim são importantes reservas hídricas, responsáveis pelo abastecimento dos municípios de sua abrangência e da grande Aracaju/SE. Os aquíferos cársticos possuem interesse notável, uma vez que as rochas carbonáticas ocupam extensas áreas, com características hidrológicas distintas de grande importância por suas reservas, vazões e qualidade da água. O trabalho teve como objetivo gerar o mapa de vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos com aplicação do método EPIK e identificar áreas suscetíveis à contaminação das suas águas. Este método considera 4 parâmetros: Desenvolvimento de **Epicarste (E)**; Importância da Cobertura de **Proteção (P)**; Condições de **Infiltração (I)**; e Desenvolvimento de rede **Cárstica (C)**. As classes de vulnerabilidade apresentadas com a aplicação do método EPIK foram: muito alta, alta e moderada. As áreas com ocorrências de cavernas e feições cársticas como karrens e dolinas apresentaram os maiores valores de vulnerabilidade. As principais atividades potencialmente contaminantes identificadas na área foram: cultivos agrícolas, exploração mineral do calcário, indústria petroquímica, aglomerados urbanos, postos de gasolina e presença dos campos petrolíferos. Dados qualitativos de águas subterrâneas indicaram a presença de contaminação por óleos e graxas em dois poços nos municípios de Laranjeiras e Nossa Senhora do Socorro oriunda de postos de combustíveis, entre outros.

Palavras-chave: Epik; Vulnerabilidade; Aquíferos Cársticos; Bacia Sergipe-Alagoas.

ABSTRACT

The karst aquifers Sapucari and Maruim are important water resources, responsible for human supply in the cities studied and metropolitan region of Aracaju/SE. The karst aquifers have great interest since the carbonate rocks occupy extensive areas, with distinct hydrological characteristics of great importance for their water reserve, pumping rate and water quality. The study aimed to generate the vulnerability map to contamination of karst aquifers with EPIK method application and identify areas susceptible to water contamination. This method takes into account four parameters: Development Epikarst (E); Protective Cover (P); Infiltration conditions (I); Karst network (K). The vulnerability classes presented with the EPIK method application were: very high, high and moderate. The areas with occurrences of caves, sinkholes and karrens showed the highest vulnerability values. The main potentially contaminating activities identified in the area were: agriculture activities, limestone exploitation, petrochemical industry, urban development, gas stations and the presence of oil fields. Groundwater qualitative data indicated the presence of contamination by oil and grease from two wells in the cities of Laranjeiras and Nossa Senhora do Socorro originating from gas stations.

Keywords: EPIK; Vulnerability; Karst Aquifers; Sergipe-Alagoas Basin.

INTRODUÇÃO

As regiões cársticas possuem interesse econômico e hidrogeológico por suas significativas reservas de água subterrânea e ocorrências minerais. Tendo em vista a importância dos aquíferos cársticos para o abastecimento de água das populações, irrigação e indústria, tornam-se imprescindíveis ações de melhorias na gestão desses recursos hídricos, uma vez que cerca de 22% do abastecimento da Grande Aracaju (MENESES, 2012) provêm desses aquíferos cársticos.

Os mapas de vulnerabilidade e de risco auxiliam em atividades que objetivem a proteção das áreas de recarga e, conseqüentemente, preservem a boa qualidade das águas, frente às limitações técnicas e financeiras decorrentes dos trabalhos de remediação de possíveis contaminações. Além disso, permitem a compreensão dos diferentes graus de fragilidade dos aquíferos, sendo utilizado como ferramenta de gestão para o desenvolvimento local e regional.

No estudo e mapeamento da vulnerabilidade de aquíferos fraturados associados ao sistema Aquífero Serra Geral (REGINATO e AHLERT, 2013) foram empregados os métodos DRASTIC (ALLER et al., 1987) e GOD (FOSTER e HIRATA, 1988). O primeiro método utiliza sete parâmetros para análise da vulnerabilidade: D (profundidade do nível de água); R (recarga do aquífero); A (litologia do meio aquífero); S (tipo de solo); T (declividade); I (natureza da zona não saturada); e C (condutividade hidráulica). Para aplicação do método DRASTIC são atribuídos pesos de 1 a 10 a cada parâmetro. Estes são multiplicados por fatores que variam de 1 a 5, definidos no método com base na relevância de cada parâmetro, para a avaliação da vulnerabilidade.

O método GOD, também aplicado no estudo para determinação das áreas do aquífero Bauru, no município de Rio Verde, estado de Goiás (PEREIRA JÚNIOR et al., 2015), emprega os parâmetros Grau de confinamento do aquífero (G), Substrato litológico (O) e Distância da água (D), na avaliação da vulnerabilidade. Atribui-se pesos de 0 a 1 para cada um dos parâmetros, o produto entre essas variáveis determina o índice de vulnerabilidade.

Os principais métodos aplicados na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos são: DRASTIC, GOD, TPE, COP, PI, dentre outros (HIRATA e REBOUÇAS, 2001). Outros métodos para estimativa da vulnerabilidade de aquíferos também se destacam, como, por exemplo, o EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

O método EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN,1999) foi desenvolvido para estimar a vulnerabilidade de aquíferos cársticos e é baseado nas características associadas ao fluxo e transporte no aquífero: Epicarste (E), Importância da Cobertura de Proteção (P), Condições de Infiltração (I) e Desenvolvimento de rede cárstica (K). Estudos realizados por Barrocu et al. (2007) e Gogu e Dassargues (2000) avaliaram o método EPIK na determinação da vulnerabilidade de aquíferos cársticos na região cárstica de “Supramonte” (Sardenha, Itália) e sul da Bélgica.

Os principais riscos para as águas subterrâneas na região estão relacionados a exploração mineral, agricultura, pastagens, indústria petroquímica, postos de combustíveis, campos de petróleo e, principalmente, os aglomerados urbanos.

Assim, o presente artigo tem como objetivo determinar a vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim com aplicação do método EPIK. Propõe-se identificar áreas susceptíveis a contaminação, relacionando a vulnerabilidade com a presença de atividades potencialmente contaminantes, estabelecendo-se, conseqüentemente, os riscos para os citados aquíferos.

LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

A área de estudo possui 345 km², e situa-se a 30 km de Aracaju/SE. Engloba total ou parcialmente os municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim (Figura 1). O acesso a área de estudo se dá pela BR-101 sentido Aracaju-Maceió, entroncamentos com as rodovias estaduais SE-090 e SE-245.

A área de estudo encontra-se representada pelo intervalo estratigráfico das formações Cotinguiba e Riachuelo, de idade cretácica, da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas. A Formação Cotinguiba é dividida em dois membros, o Aracaju e o Sapucari. O Membro Aracaju é constituído por calcilitos, folhelhos e margas, enquanto que o Membro Sapucari,

predominante na área de estudo, é caracterizado por calcilutitos maciços e brechóides (CAMPOS NETO et al., 2007).

A Formação Riachuelo é constituída por uma sequência sedimentar com predominância de clásticos na base e carbonatos no topo. A litologia permite individualizar na sub-bacia de Sergipe, os Membros Taquari, Maruim e Angico. O Membro Taquari é constituído por calcilutitos e folhelhos, o Membro Maruim é formado por calcarenito e calcirrudito oncolítico. Já o Membro Angico é constituído por arenito branco fino a conglomerático (CAMPOS NETO et al., 2007).

Sobrepondo-se a estes litotipos, encontra-se a Formação Barreiras, constituída por clásticos continentais finos a grosseiros, de coloração variada e grau de compactação insignificante (FEITOSA et al., 1998).

As feições estruturais regionais da Sub-Bacia Sedimentar de Sergipe (Bacia SEAL) limitam-se por falhas normais. Estas possuem direções que acompanham o *trend* geral da bacia, N45°E, e são típicas de um “*riff*” gerado por distensão NO-SE (LANA, 1990). *Trends* secundários ocorrem em direções NW-SE, N-S e N-W.

O carste possui características hidrogeológicas e geomorfológicas distintas e grandes heterogeneidades espacial e temporal. O desenvolvimento da dissolução nesses terrenos depende de aspectos hidrodinâmicos e físico-químicos, como: armazenamento e circulação das águas subterrâneas condicionados à dissolução, fraturamentos e outras discontinuidades das rochas carbonáticas.

Uma ampla variedade de formas cársticas é produzida nesses ambientes. Os epicarstes são feições cársticas de superfície, formas de dissolução do topo rochoso, dos tipos “*karren*” e dolinas (LOUCKS, 1999). As feições cársticas de superfície são descontínuas, ao longo das unidades carbonáticas analisadas, concentrando-se as maiores ocorrências nas áreas dos calcários Sapucari.

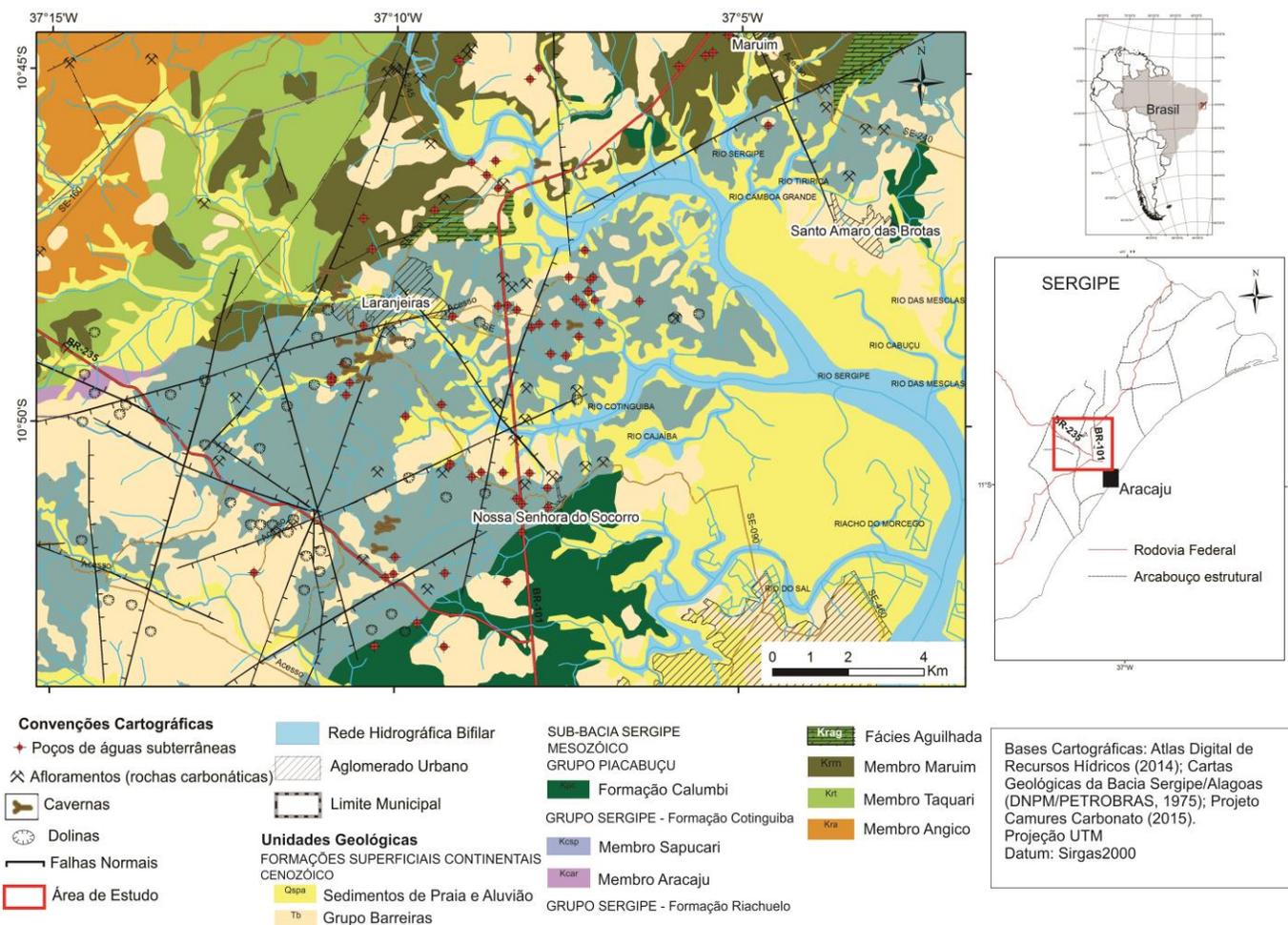


Figura 1. Mapa de localização com áreas de ocorrências de feições cársticas, de rochas carbonáticas e distribuição de poços.

Figure 1. Location map with areas of karst features occurrences, carbonate rocks, and wells distribution.

Zonas com feições cársticas de subsuperfície são encontradas em descrição de poços tanto no Membro Sapucari como no Maruim, associadas a sistemas de fraturas regionais com formação de condutos e cavernas com variação em dimensão vertical de 3 a 10 metros e ocorrências na profundidade estratigráfica entre 10 e 140 metros.

Segundo Carvalho Junior (2005), nos terrenos das rochas carbonáticas representativas das formações Riachuelo e Cotinguiba, observam-se a presença frequente de feições de dissolução de topo rochoso de calcários, na forma de *karrens* arredondados, dolinas isoladas e fendas de dissolução nas cavas das pedreiras no município de Laranjeiras e em cortes de vertentes ao longo da BR-101.

Os condutos cársticos são descritos em fichas de poços de captação de águas subterrâneas em diferentes profundidades do perfil estratigráfico. Encontram-se associados aos sistemas de fraturas, direção NE, nas áreas da floresta do Ibura (Povoado da Estiva), município de Nossa Senhora do Socorro, povoados Mussuca e Cedro, no município de Laranjeiras e nas proximidades das pedreiras Brejo e Carapeba neste mesmo município.

Feições do tipo *karren* com caneluras (Figura 2) são observadas em afloramentos do município de Laranjeiras. Tubos de dissolução são observados no paredão da rocha, indicando o processo de formação de condutos (Figura 2). As dolinas, depressões fechadas (Figura 3), ocorrem nas áreas próximas às drenagens do rio Cotinguiba, por vezes associadas às falhas geológicas com direção principal NE e ocorrências de cavernas.

Com base em levantamento realizado pelo Grupo Espeleológico Centro da Terra (CENTRO DA TERRA, 2014), a área de estudo possui ocorrências de feições cársticas, qualificadas como: cavernas, grutas e tocas. Sendo que destas, 17 encontram-se no município de Laranjeiras (Figuras 4 e 5), 7 no município de Nossa Senhora do Socorro e 5 no município de Maruim.



Figura 2. Feições do tipo *karren* com caneluras observadas em pedra do Membro Sapucari, Fm. Cotinguiba, no município de Laranjeiras, Estado de Sergipe.

Figure 2. Features of karren type with fluting observed in Sapucari Member quarry, Cotinguiba Fm., city of Laranjeiras, State of Sergipe.



Figura 3. Dolinas identificadas (setas em preto) na fotointerpretação geológica e georreferenciadas na fazenda Sergipe, município de Laranjeiras, representativa do Membro Sapucari da Fm, Cotinguiba.

Figure 3. Sinkholes identified (black arrows) in the geological photointerpretation at the Sergipe farm, city of Laranjeiras, representing the Sapucari Member, Cotinguiba Fm..



Figura 4. Gruta Matriana representativa dos calcários do Membro Maruim, Fm. Riachuelo, no município de Laranjeiras, Sergipe.

Figure 4. Matriana cave representative of the Maruim Member limestone, Riachuelo Fm., city of Laranjeiras, State of Sergipe.

O aquífero Sapucari apresenta comportamento de aquífero cárstico, de alto gradiente hidráulico, e produtividade de maior destaque nos povoados Mussuca, Estiva e Machado nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e Laranjeiras. A vazão média dos poços neste aquífero é de $54 \text{ m}^3/\text{h}$.

Os testes de produção obtidos das fichas de poços apresentam valor médio de transmissividade de $10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. Este valor médio, bastante elevado, associado às ocorrências de fendas, referidas nas descrições litológicas, deixam pressentir também aqui a natureza cárstica do meio (FEITOSA et al., 1998).

O aquífero Maruim também apresenta comportamento de aquífero cárstico, com maior produtividade no povoado Pedra Branca, no município de Laranjeiras. A ocorrência de condutos nesse Membro é menor, apresentando uma evolução de sistema com pequenas cavernas (CARVALHO JUNIOR, 2005). A vazão média dos poços neste aquífero é de $25 \text{ m}^3/\text{h}$.

O fluxo subterrâneo no aquífero Maruim exhibe feições típicas de circulação cárstica, desenvolvida ao longo de zonas fraturadas com geração de canais de magnitude não desprezível, evoluindo mesmo, em alguns casos, para cavernas (FEITOSA et al., 1998).



Figura 5. Gruta da Pedra Furada representativa dos calcários do Membro Sapucari, Fm. Cotinguiba, município de Laranjeiras, Sergipe.

Figure 5. Pedra Furada cave representative of the Sapucari Member limestone, Fm. Cotinguiba, city of Laranjeiras, State of Sergipe.

MATERIAIS E MÉTODO

O EPIK é um método utilizado na determinação da vulnerabilidade em aquíferos cársticos, desenvolvido por Doerfliger, Jeannin e Zwahlen (1999), que considera as características geológicas, geomorfológicas e hidrogeológicas, com destaque para o fluxo subterrâneo da área estudada.

O EPIK consiste na classificação e atribuição de pesos em multiparâmetros, com sobreposição de dados geoespaciais e geração de um índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas. São utilizados quatro parâmetros/atributos: Epicarste (E); Cobertura de Proteção (P); Condição de Infiltração (I);

Desenvolvimento de rede cárstica (K). Um multiplicador é atribuído a cada parâmetro, refletindo a relativa importância ponderada.

As classes presentes em cada parâmetro recebem valores e são multiplicados pelo respectivo peso, em seguida os produtos (mapas) são somados e um valor final é gerado. Quanto maior a pontuação, maior é o grau de proteção da área, ou seja, menos vulnerável. No fim, o intervalo de pontuação numérica final é atribuído a classes de diferentes graus de vulnerabilidade. Os parâmetros EPIK são descritos da seguinte forma:

Epicarste (E): corresponde à zona de epicarste sob o solo consolidado. Baseia-se em estudos das formas cársticas presentes na área. Este parâmetro (Quadro 1) apresenta um alto nível de dificuldade para determinação das zonas de epicarste e conexão com rede cárstica (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Com base nas ortofotocartas dos municípios litorâneos, escala 1:10.000 (SEPLAN-SE, 2003), foram aplicados procedimentos de fotointerpretação geológica para identificação de fotolineamentos e análise morfológica. Esta última com o objetivo de identificar as feições cársticas dolinas e relações com ocorrências de cavernas, exploração mineral e fluxo subterrâneo.

Quadro 1. Classes para o atributo **Epicarste** (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart 1. Classes for **Epikarst** attribute (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Epicarste		Morfologia cárstica- características
Alto desenvolvimento	E ₁	Indica a situação de maior vulnerabilidade, associada à ocorrência de depressões com acúmulo de água, dolinas, <i>karrens</i> , afloramentos com alta densidade de fraturas, por vezes relacionados às falhas geológicas e arcabouço estrutural.
Moderado desenvolvimento	E ₂	Correspondem as zonas intermediárias, em alinhamentos de dolinas e vales secos.
Pequeno ou ausente	E ₃	Sem fenômeno de morfologia cárstica e baixa densidade de fraturas. Interseções de lineamentos identificados nas fotografias aéreas ou de imagens de satélite consistem em zonas altamente fraturadas. Estas quando associadas às características típicas geomorfológicas, podem ser mapeadas como E2.

Cobertura de Proteção (P): determinado a partir de mapas de uso da terra, de solos e fichas de descrição de poços de captação de águas subterrâneas (descrição de perfis litológicos). Este parâmetro inclui tanto o solo (profundidade) como outras configurações geológicas, tais como: depósitos do quaternário (silte, sedimentos inconsolidados e detritos), e outras camadas não cársticas, por exemplo, argila e areia (Quadro 2).

Foram utilizados dados de fichas de poços de captação de águas subterrâneas. Informações como profundidade e características do solo (argiloso, arenoso) foram extraídas das fichas de poços, sobrepostos ao mapa de solos da área de estudo. Foram consultadas 50 fichas para determinação da profundidade do solo.

Quadro 2. Classes para o atributo **Cobertura de Proteção** (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart 2. Classes for **Protective Cover** attribute (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Cobertura de Proteção		Características	
Ausente		A. Solo cobrindo diretamente rochas calcárias ou rochas com alta permeabilidade (camadas de detritos grosseiros, ex. fragmentos detritos).	B. Solo cobrindo camadas geológicas de baixa permeabilidade, ex. silte, argilas e folhelhos.
	P ₁	0-20 cm de solo	0-20 cm de solo em camadas com espessura menor que 1 metro.
	P ₂	20-100 cm de solo	20-100 cm de solo com camadas de espessura menor que 1 metro.
	P ₃	100-200 cm de solo	Solo >100 cm cobrindo camadas com baixa permeabilidade.
	P ₄	>200 cm	Solo > que 100 cm cobrindo depósitos de permeabilidade muito baixa ou aquícludes > 8 metros de espessura.
Presente			

Condições de Infiltração: baseado na identificação de zonas de concentração da infiltração. Trata do tipo de recarga do aquífero cárstico, não sendo considerada em termos de quantidade e localização. A recarga é classificada em difusa ou concentrada (descritas no Quadro 3).

Os dados necessários para a determinação das condições de infiltração no método EPIK consistem em mapas de uso da terra e mapas topográficos (geração de modelo de terreno para a determinação da declividade). O mapa de Uso e Ocupação do Solo (SRH, 2014), escala 1:25.000, foi utilizado na determinação das condições de infiltração, a partir da análise e classificação dos principais usos da terra com base na metodologia EPIK.

O mapa de uso da terra foi sobreposto ao mapa de declividade, elaborado a partir dos dados de curvas de nível, presentes nas ortofotocartas (SEPLAN-SE, 2003) e do modelo digital de elevação, gerado através da imagem ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*), com resolução espacial de 30 m.

Quadro 3. Classes para o atributo **Condições de Infiltração** (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart. 3. Classes for **Infiltration Conditions** attribute (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Condições de Infiltração	de	Características
Concentrada	I ₁	Riachos perenes ou temporários- alimentando dolinas e sumidouros - áreas de captação de água dos rios mencionados, incluindo sistemas de drenagens naturais e artificiais.
	I ₂	Áreas de captação de água em riachos I ₁ (sem sistema de drenagem artificial) com declividade superior a 10% para áreas cultivadas e 25% para pastagens.
	I ₃	Áreas de infiltração concentrada (sem sistema de drenagem artificial) declividade <10% em campos cultivados e <25% em campos de pastagens.
	I ₄	Terras remanescentes
Difusa		

Desenvolvimento de rede cárstica (K):

O desenvolvimento da rede cárstica e seu grau de organização possuem grande influência na velocidade do fluxo da água (Quadro 4). Como o mapeamento detalhado de redes cársticas não é

possível na maioria dos casos, um único valor por captação é comumente usado (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Quadro 4. Classes para o atributo **Rede Cárstica** (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart 4. Classes for **Karst Network** attribute (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Rede cárstica		Caracterização
Rede bem desenvolvida	K ₁	Presença de rede cárstica moderada a bem desenvolvida com condutos em decímetro a metro com pouca obstrução e interconectados.
Rede cárstica pouco desenvolvida	K ₂	Rede pouco desenvolvida; drenagem pouco desenvolvida e condutos em decímetros ou menores.
Aquífero fissural ou misto	K ₃	Surgências emergindo do meio poroso do terreno. Aquíferos fissurais, não cársticos.

Para a determinação deste parâmetro foram utilizados dados de poços de águas subterrâneas com identificação e profundidade de condutos e cavernas no perfil estratigráfico do poço. Cerca de 7 poços apresentaram indicações de condutos e cavernas. Estes dados foram sobrepostos espacialmente, as ocorrências de cavernas já mapeadas em superfície, e zonas de falhas geológicas, com o objetivo de identificar o desenvolvimento da rede cárstica.

Os quatro parâmetros são ponderados e, posteriormente, classificados. No ambiente SIG (Sistema de Informações Geográficas), são gerados os mapas representativos de cada parâmetro com seus pesos respectivos. A Figura 6 apresenta os procedimentos de classificação e sobreposição de mapas, realizados no ArcGis 10.2, para a geração do mapa de vulnerabilidade de aquíferos cársticos. O Quadro 5 apresenta os pesos atribuídos a cada parâmetro EPIK, onde o menor valor indica maior sensibilidade do aquífero. O Quadro 6 mostra as classes e seus respectivos pesos para cada parâmetro EPIK, sendo o menor valor indicativo de maior susceptibilidade.

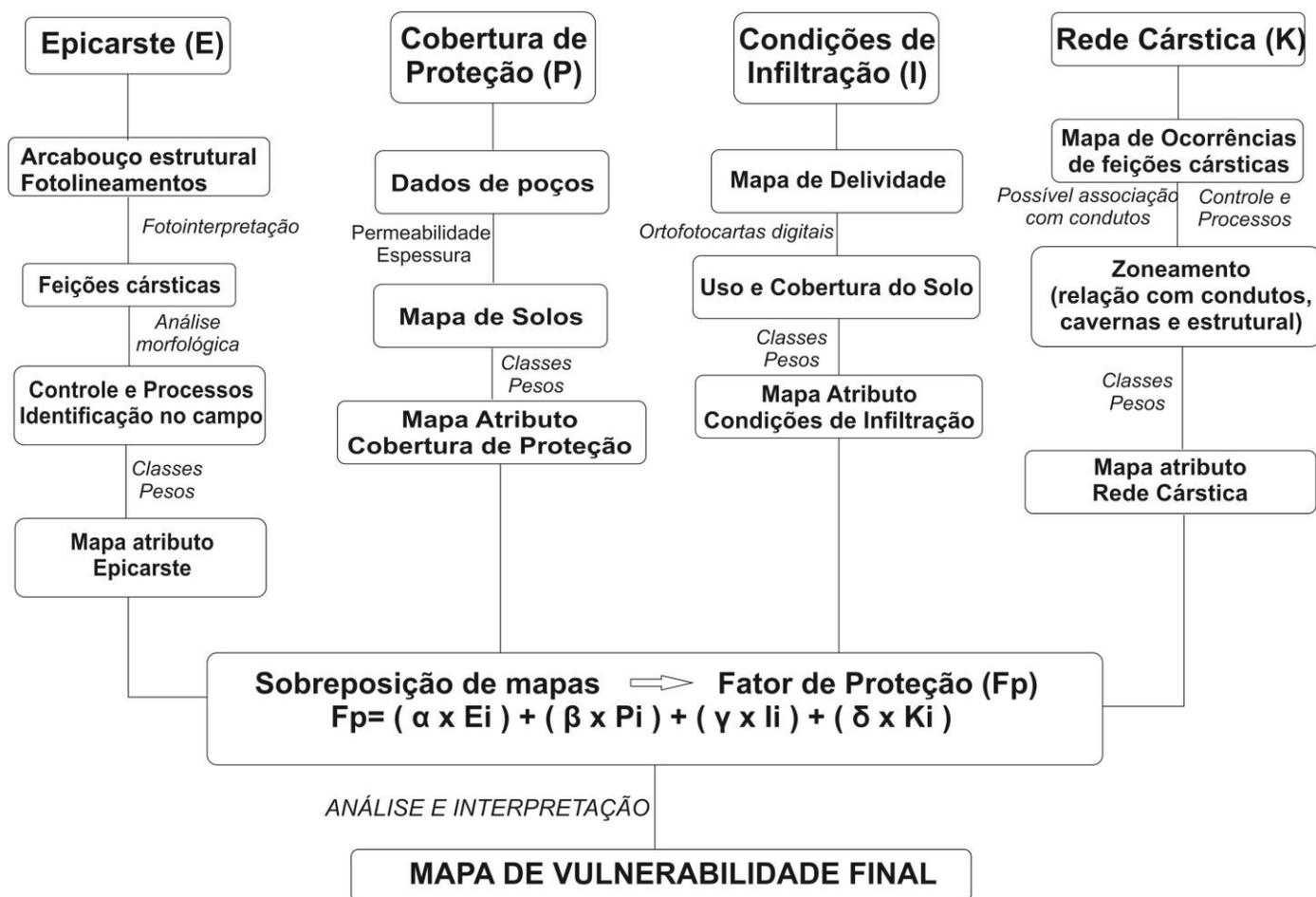


Figura 6. Fluxograma metodológico de procedimentos realizados em Ambiente SIG para criação do mapa de vulnerabilidade (método EPIK) dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, Sub-bacia de Sergipe, Bacia SEAL.

Figure 6. Flowchart of procedures performed in GIS environment to create the vulnerability map (EPIK method) of the Sapucari and Maruim karst aquifers, Sub-basin of Sergipe, Basin of SEAL.

Quadro 5. Pesos relativos atribuídos aos parâmetros analisados pelo método EPIK. Quanto mais baixo o valor numérico, maior é a susceptibilidade a contaminação (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart 5. Relative weights assigned to parameters analyzed by the EPIK method. The lower the numerical value, the greater the susceptibility to contamination (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Epicarste (E)	Cobertura de Proteção (P)	Condições de Infiltração (I)	Rede cárstica (K)
α	β	γ	δ
3	1	3	2

Quadro 6. Pesos das classes para os parâmetros E, P, I e K. Quanto menor o valor, maior a susceptibilidade a contaminação (Adaptado de DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Chart 6. Classes weights of the parameters E, P, I and K. As smaller is the value greater the susceptibility to contamination (Adapted from DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Epicarste			Cobertura de Proteção				Condições de Infiltração				Rede Cárstica		
E ₁	E ₂	E ₃	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	I ₁	I ₂	I ₃	I ₄	K ₁	K ₂	K ₃
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3

O fator de proteção F_p é calculado com a equação (1), e tem como objetivo representar um modelo hidrogeológico simplificado. O índice final de vulnerabilidade apresenta as seguintes classes: muito alta (9-19); alta (20-25); moderada (>25); baixa (> 25 com a presença das categorias P4 +I3, I4). As Zonas de Proteção (S) são definidas em: S1 (vulnerabilidade muito alta); S2 (alta vulnerabilidade); S3 (moderada vulnerabilidade).

Equação 1 (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999):

$$F_p = (\alpha \times E_i) + (\beta \times P_i) + (\gamma \times I_i) + (\delta \times K_i)$$

Onde:

F_p - índice de proteção

α ; β ; γ ; δ - Pesos de cada parâmetro

E_i; P_j; I_k; K_l - classes dos parâmetros.

RESULTADOS OBTIDOS

Parâmetros de vulnerabilidade EPIK

Epicarste (E): foram identificadas ocorrências de dolinas e *karrens* com caneluras e pequenos condutos em formação nos afloramentos de pedreiras no município de Laranjeiras, como também fraturas identificadas nos afloramentos (com direcionamento preferencial NE-SW) e associações com falhas geológicas (Figura 7), que acompanham o trend geral da bacia, N45°E.

As áreas com maiores ocorrências das morfologias mencionadas foram classificadas como E₁ (peso 1). Áreas com ocorrências moderadas foram classificadas como E₂ (peso 3). Já as áreas com poucas ocorrências ou ausentes receberam a classe E₃ (peso 4).

Cobertura de Proteção (P): neste parâmetro, a profundidade da cobertura de proteção (solo) foi determinada com base nos perfis estratigráficos de poços de captação de águas subterrâneas. Os poços apresentam variação de profundidade máxima de cobertura do solo entre 1 a 20 metros na área de estudo. Com base na descrição de perfis de poços, o solo é de textura argilosa de cores amarelo e vermelho, por vezes, de textura arenosa com grão finos e bem arredondados. Sobreposto ao mapa de solos, o tipo correspondente predominante é o Argissolo Vermelho Amarelo, seguido do Gleissolo, Chernossolo e Espodossolo (SRH, 2014).

Na Figura 8, as zonas de peso 2 correspondem as ocorrências com menor cobertura de proteção (em torno de 1 metro). Já as zonas de peso 3 e 4 possuem profundidade superior a 1 metro recobrando solo com baixa permeabilidade.

Condições de Infiltração (I): os principais usos da terra identificados na área de estudo são formados por: pastagens, cultivos agrícolas, solo exposto, área degradada, área industrial, floresta estacional, terras remanescentes e drenagens.

As áreas de drenagens associadas a ocorrências de dolinas e cavernas foram mapeadas como classe I₁. As zonas com cultivos agrícolas, solo exposto, áreas degradadas e pastagens, próximas a riachos e nascentes, com declividade superior a 10% e 25%, receberam classe I₂. Áreas com cultivos agrícolas e declividade <10%, e <25% em áreas de pastagens foram classificadas como I₃. Já as terras remanescentes e floresta estacional foram classificadas como I₄ (Figura 9).

Rede cárstica (K): o processo de carstificação (dissolução) permite a geração de uma rede de condutos, desenvolvidos por conta da variação espacial da permeabilidade da rocha e potencial de infiltração, para os quais são direcionados os fluxos subterrâneos. Aberturas com diâmetro entre 5-10 mm ou mais são consideradas verdadeiros condutos-cavernas (FORD, 1988). A rede de condutos pode ser mais ou menos bem desenvolvida e conectada, dependendo dos sistemas cársticos analisados.

As áreas de rede cárstica foram mapeadas a partir de dados de poços de captação de águas subterrâneas. Foram encontrados condutos em profundidades de 11-12; 16-20; 30-40; 44-50; 54-57; 134-136 metros. Os condutos estão associados às grandes falhas da bacia com direcionamento preferencial NE-SW, distribuídos espacialmente em diferentes pontos da área de estudo.

Ocorrências de cavernas também foram identificadas em profundidades com variação entre de 19-23 e 100 metros em três poços na região dos povoados Mussuca (C) e Estiva (A) (Figura 10). Como a distribuição dessas feições cársticas se deu em diferentes pontos da área estudada, optou-se pela atribuição da classe K₁ (rede bem desenvolvida), de peso 1, presença de rede cárstica moderada a bem desenvolvida, com condutos em decímetro a metro com pouca obstrução e interconectados a drenagens e falhas geológicas.

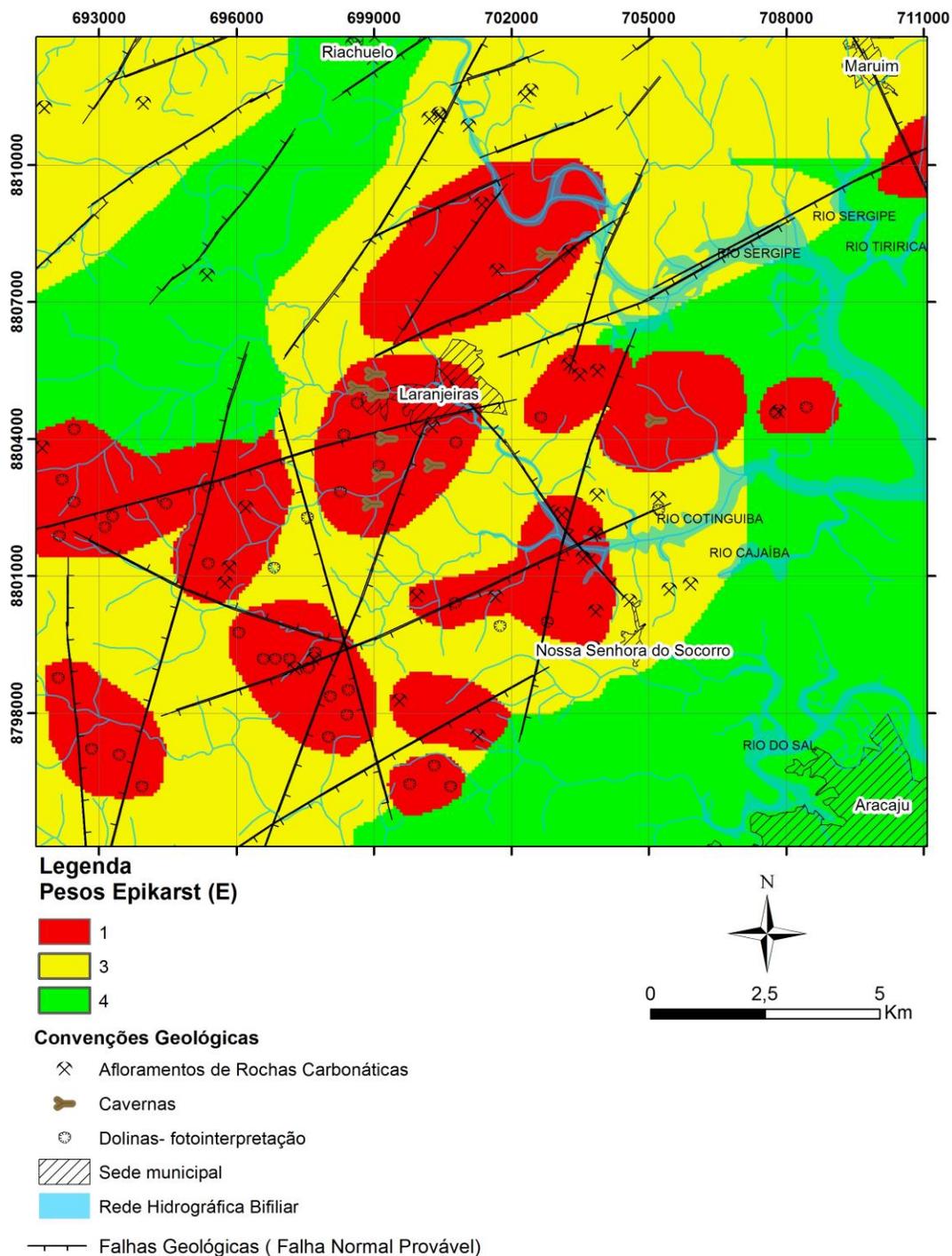


Figura 7. Mapa representativo do parâmetro Epikarste com distribuição de cavernas, dolinas e falhas geológicas associadas.

Figure 7. Representative map of Epikarst parameter with distribution of caves, sinkholes and associated faults.

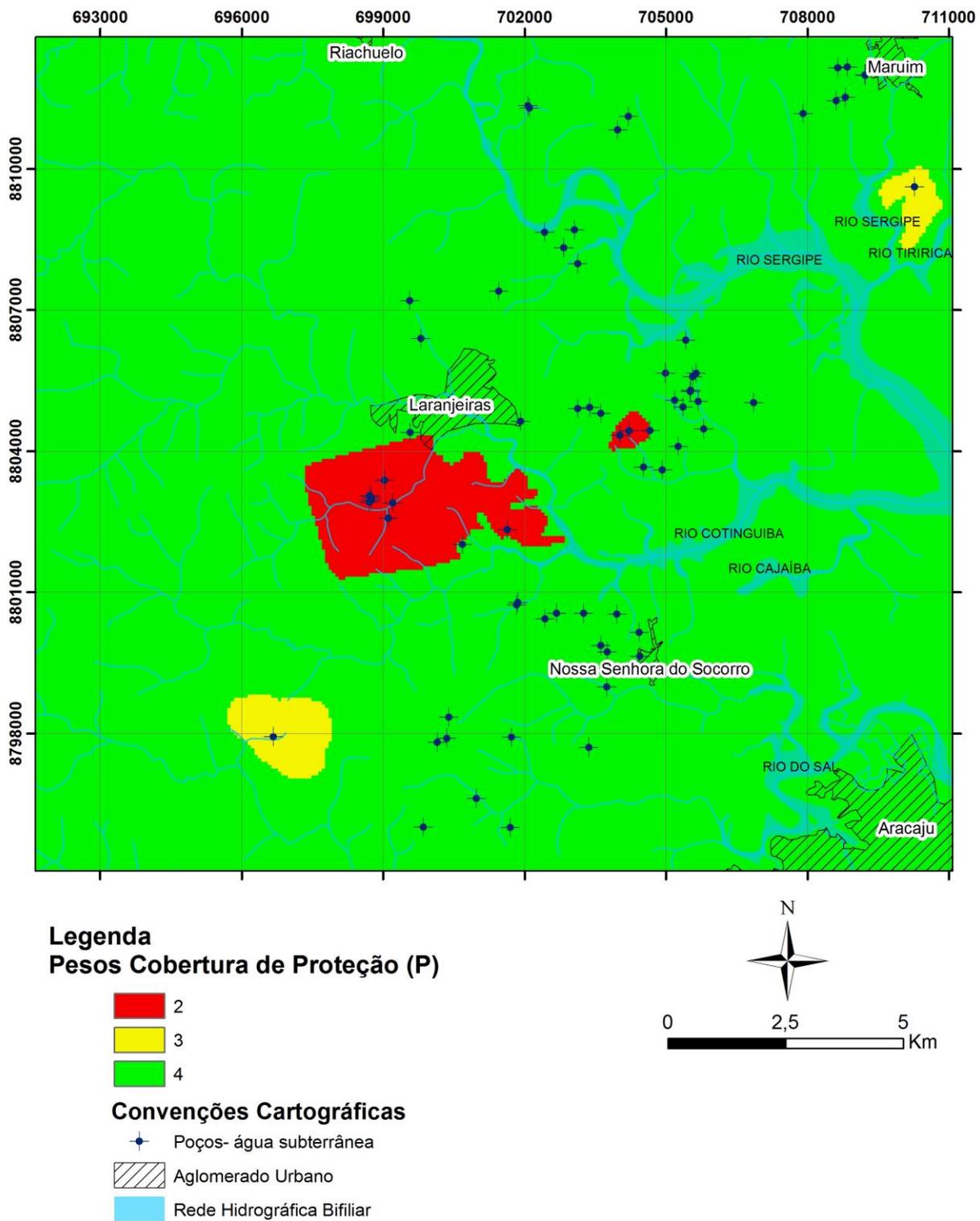


Figura 8. Mapa representativo do parâmetro Cobertura de Proteção.

Figure 8. Representative map of Protection Cover parameter.

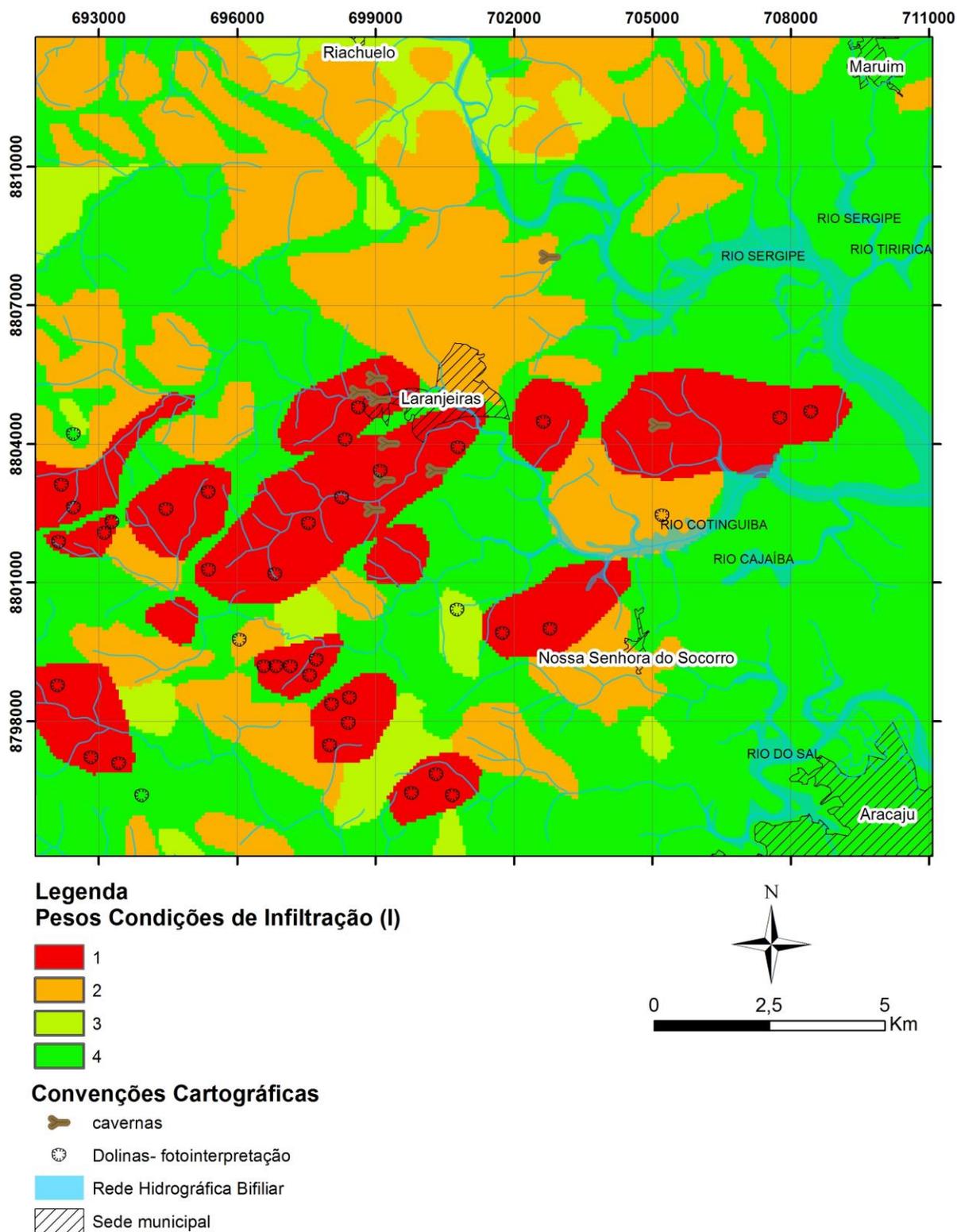


Figura 9. Mapa representativo do parâmetro Condições de Infiltração.

Figure 9. Representative map of Infiltration Conditions parameter.

Mapa de vulnerabilidade final da região

O mapa de vulnerabilidade EPIK foi gerado no SIG Arcgis 10.2®, com o auxílio da ferramenta “*Spatial Analyst-Raster Calculator*”. Esta ferramenta é aplicada no processo de sobreposição e álgebra de mapas, com uso de operadores como multiplicação e soma, com base na Equação 1, descrita no item Materiais e Método.

O fator de proteção apresentou variação de 10 a 30, sendo que os valores mais baixos correspondem às áreas de maior vulnerabilidade. As classes de vulnerabilidade (Figura 10) apresentadas com a aplicação do método EPIK foram: muito alta (71,80 km²), alta (107,01 km²) e moderada (174,42 km²). As áreas de proteção, definidas com base no EPIK, estão associadas às áreas de maior vulnerabilidade, sendo assim classificadas: vulnerabilidade muito alta- área de proteção S1; alta- S2; e moderada- S3.

As zonas com ocorrências de cavernas e feições cársticas como *karrens* e dolinas, apresentaram os maiores valores de vulnerabilidade, classificada como área de proteção S1. As áreas de exploração de calcário apresentaram variação de vulnerabilidade muito alta a alta, sendo definidas como zonas de proteção S1 e S2.

As principais atividades potencialmente contaminantes consistem em: cultivos agrícolas, como a cana-de-açúcar, exploração mineral do calcário, indústrias, aglomerados urbanos, postos de gasolina e presença dos campos petrolíferos de Riachuelo e Carmópolis ao norte da área de estudo.

O mapa de vulnerabilidade sobreposto às áreas das atividades potencialmente contaminantes (Figura 11) indica riscos potenciais de contaminação nos povoados Machado (B), Estiva (A) e área da Floresta Ibura e adjacências (A).

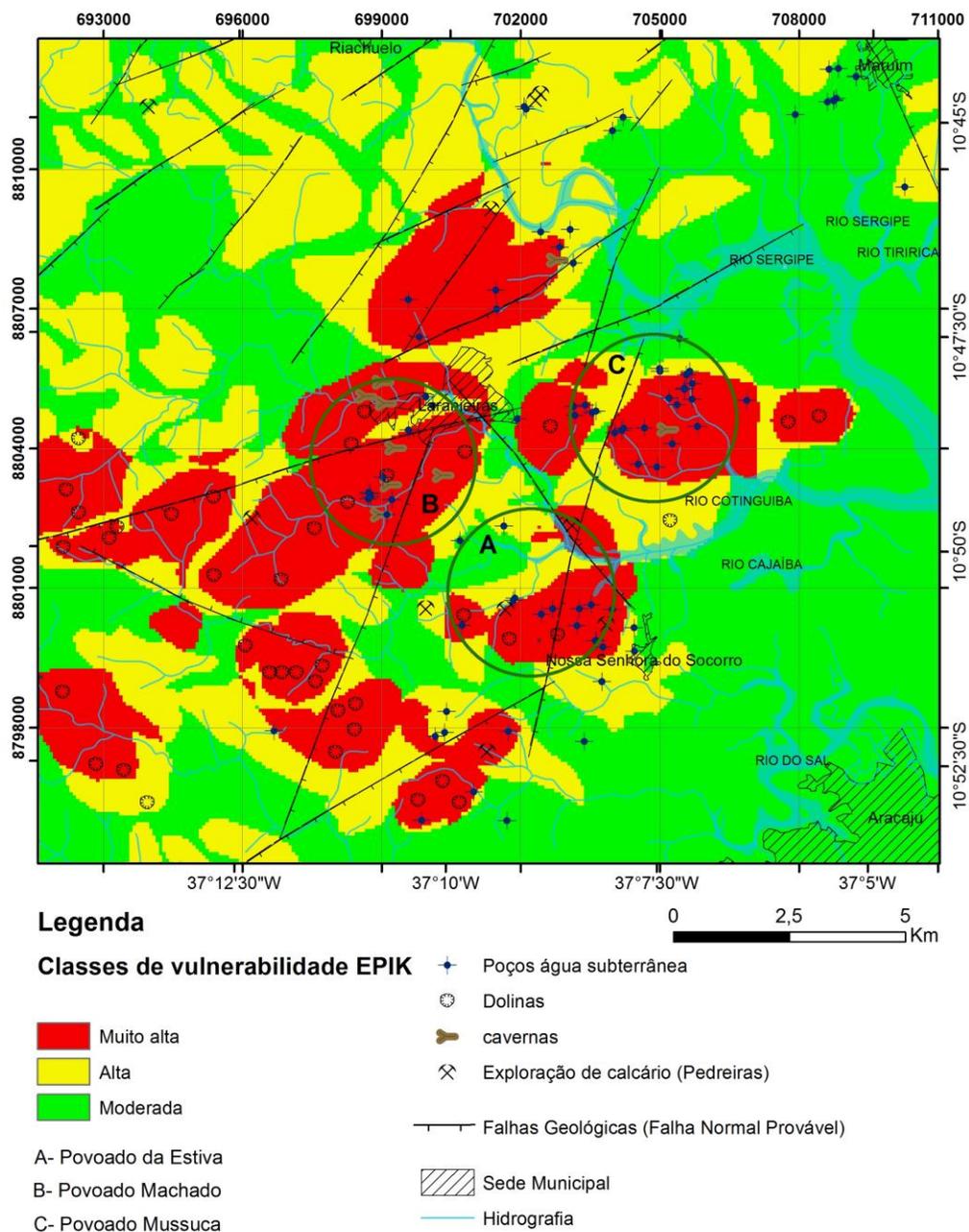


Figura 10. Mapa de vulnerabilidade dos aquíferos cársticos Maruim e Sapucaí com destaque para os povoados da Estiva (A), Machado (B) e Mussuca (C) de maior ocorrência de feições cársticas e exploração do calcário.

Figure 10. Vulnerability map of the Maruim and Sapucaí karst aquifers with distinction to the Estiva (A), Machado (B) and Mussuca (C) villages of higher karst features occurrences and limestone prospecting.

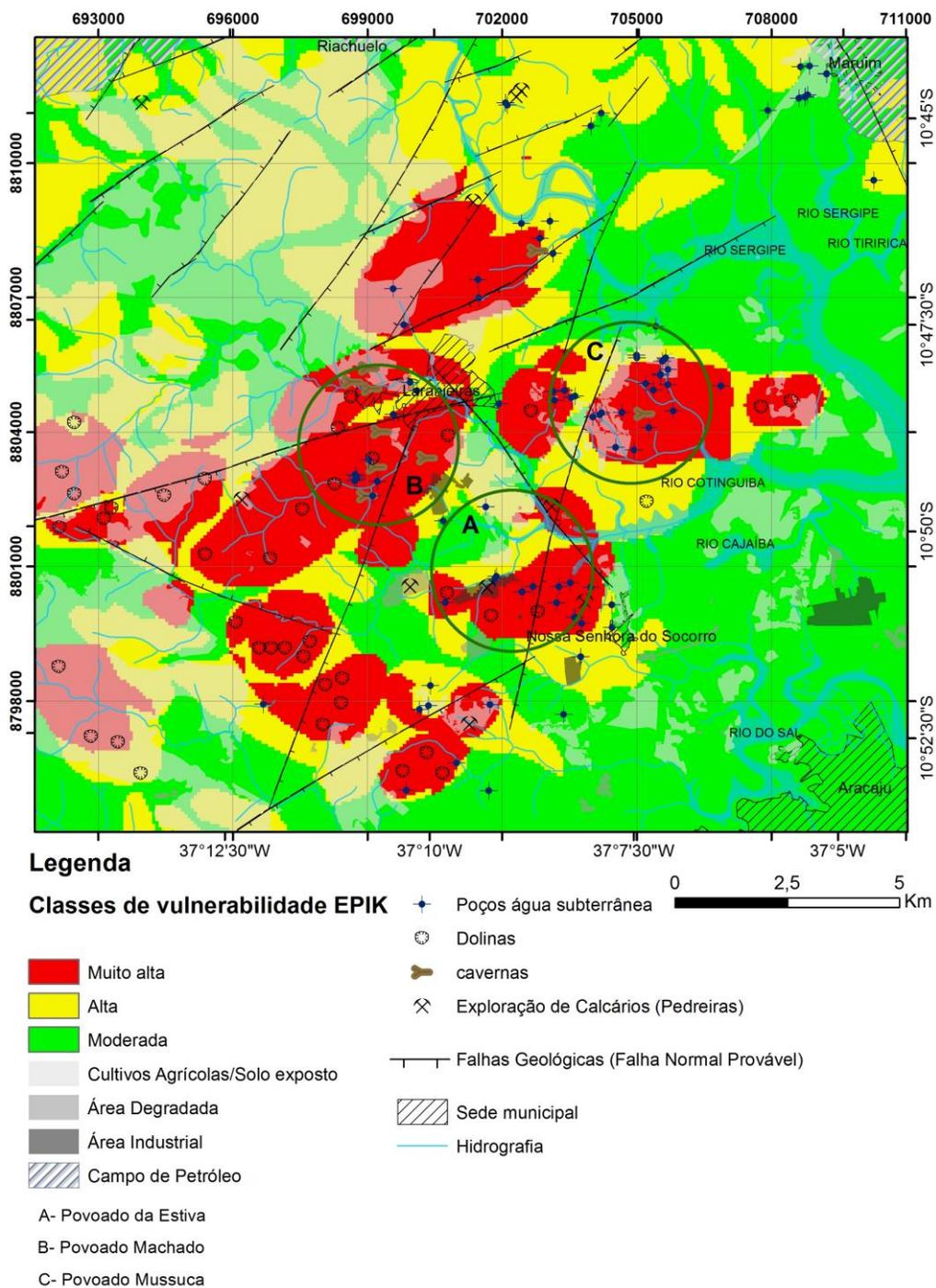


Figura 11. Mapa de vulnerabilidade a contaminação de aquíferos com sobreposição das atividades potencialmente contaminantes presentes na área de estudo.

Figure 11. Vulnerability map with overlay of potentially contaminating activities present in the study area.

CONCLUSÕES

A aplicação do método EPIK permitiu a geração do mapa de vulnerabilidade dos aquíferos cársticos Maruim e Sapucari e a identificação de áreas potencialmente sujeitas à contaminação.

Os setores (A, B e C) apresentam maior vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, uma vez que há maiores ocorrências de feições cársticas e formação de pequenos condutos e fraturas em afloramentos analisados. Nesses, são observadas a presença de atividades de postos de combustíveis; exploração de calcário; indústrias de cimento e petroquímicas; cultivos agrícolas, principalmente da cana-de-açúcar; e adensamento urbano.

Análises químicas de águas subterrâneas indicaram a presença de contaminação por óleos e graxas em dois poços nos municípios de Laranjeiras e Nossa Senhora do Socorro (concentrações de 5,2 e 5,8 mg/l, respectivamente). As amostras coletadas permitiram identificar que a contaminação presente por óleos e graxas é oriunda de postos de combustíveis presentes nestas unidades.

Com base nesse mapa, foi possível visualizar a distribuição espacial da vulnerabilidade e suas diferentes classes, como também relacionar as diferentes zonas de proteção propostas pelo EPIK. O mapa de vulnerabilidade do sistema cárstico local permite um melhor entendimento para a definição de áreas de proteção ambiental desse aquífero de grande importância, responsável pelo abastecimento de água da região metropolitana de Aracaju.

REFERÊNCIAS

ALLER, L., LEHR, Jay H., PETTY, R. DRASTIC: A Standardized system of evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings. United States: EPA, 1987.

BARROCU, G.; MUZZU, M.; URAS, G. Hydrogeology and vulnerability map (Epik method) of the “Supramonte” karstic system, north-central Sardinia. Environment Geology, v.51, p.701-709, 2007.

CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA W.S.; CRUZ F.E.G. Bacia Sergipe-Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras, v.15, n. 2, p. 405–415, 2007.

CARVALHO JÚNIOR, A. L. P. **Hidrogeologia e Processos Cársticos nas Formações Muribeca, Riachuelo e Cotinguiba na Bacia SE/AL em Sergipe. São Paulo, São Paulo, Brasil, 2005.** 146 p. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo.

CENTRO DA TERRA. Projeto Expedição Centro da Terra: Conhecendo as Cavernas no Meio Ambiente. Aracaju, 2014.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection area using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology: International Journal of Geosciences**, v. 39, n. 2, p.165-176, 1999.

FEITOSA, E. C. (Coord.); FILHO, J. M., DEMÉTRIO, J. G. A., SANTOS, R.Q., SANTOS, M. A. V., AGUIAR, N. F., DEMÉTRIO, J. A. Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE.PETROBRAS, 175 p., 1998.

FORD, D. C. Characteristics of dissolutional cave systems in carbonate rocks. Springer-Verlag, p. 25–57, 1988.

GOGU, R. C.; DASSARGUES, A. Sensitivity analysis for the EPIK method of vulnerability assessment in a small karstic aquifer, Southern Belgium. *Hidrogeology Journal*, v.8, p. 337-345, 2000.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 74 p, 1988.

HIRATA, R. REBOUÇAS, A. C. La protección de los recursos hídricos subterráneos: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. 2001. Disponível

em: <http://www.medioambienteonline.com/site/root/resources/technology/857.html>. Acesso: 21 jun. 2010.

LANA, M. C. Bacia de Sergipe-Alagoas. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares, p.311-332, 1990.

LOUCKS, R. G. Paleocave Carbonate Reservoirs: Origins, Burial-Depth Modifications, Spatial Complexity, and Reservoir Implications. AAPG Bulletin, v. 83, 1795-1834 p, 1999.

MENESES, J.W de A. Recursos Hídricos no Estado de Sergipe. In: Semana de Geologia da UFS, 3., 2012. Palestra... São Cristóvão: UFS/DESO, 2012.

PEREIRA JUNIOR, L.C.; SOARES, L.T.; CASTRO, S. S. Vulnerabilidade Natural e Risco de Contaminação do Aquífero Bauru no Município de Rio Verde – GO. Águas Subterrâneas, v. 29, n.2, p. 129-145, 2015.

REGINATO, P. A. R.; AHLERT, S. Vulnerabilidade do Sistema Aquífero Serra Geral na Região Nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. Águas Subterrâneas. V. 27, n.2, p. 32-46, 2013.

SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE (SRH). Atlas Digital de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe. Aracaju, 2014. CD-Room.

Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão de Sergipe- SEPLAN. Base Cartográfica dos Municípios Litorâneos, 2003.

CAPÍTULO III

ARTIGO 2- CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

Este artigo caracterizou os aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, nos municípios de Laranjeiras, Nossa Senhora do Socorro e Maruim, a partir da análise de parâmetros hidrodinâmicos e reservas hídricas. Os parâmetros analisados foram: a vazão (Q); a capacidade específica (Sc); os níveis estáticos (NE) e dinâmico (ND); a transmissividade (T); os aspectos geológicos, geomorfológicos (feições cársticas) e estruturais, integrados num modelo hidrogeológico conceitual. Na área de estudo a investigação hidrogeológica se tornou necessária devido à importância dos recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento humano e industrial. Para a determinação da transmissividade foi aplicado o método da recuperação de Theis (1935), usando a correlação T com capacidade específica (Sc). Os resultados de T são heterogêneos em ambos os aquíferos, destacando-se o Sapucari. Neste, a T média é de 725,42 m²/d, já no aquífero Maruim é de 113,42 m²/d. O volume anual de água extraída por meio de obras de captação existentes corresponde a 26,2% da reserva renovável do Sapucari e 11,6% do aquífero Maruim.

Palavras-chave: aquíferos cársticos; Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas; transmissividade; reservas hídricas; modelo hidrogeológico.

ABSTRACT

This article characterized the Sapucari and Maruim karst aquifers, Sergipe-Alagoas sedimentary basin, in the cities of Laranjeiras, Nossa Senhora do Socorro and Maruim through analysis of hydrodynamic parameters and water reserves. The hydrodynamic parameters analyzed were: discharge;

specific capacity; static and dynamic levels; transmissivity; geological and geomorphological features; and structural aspects, integrated in a conceptual hydrogeological model. In the study area the hydrogeological investigation became necessary due the high importance of the groundwater resources for human and industrial supply. To determine the Transmissivity (T) the Theis recovery method (1935) was applied using the correlation of T with specific capacity (Sc). The results of T are heterogeneous in both aquifers, especially the Sapucari. In this aquifer, the mean of T is 725,42 m²/d, while in the Maruim aquifer is 113,42 m²/d. The annual volume of water exploited by existing catchments correspond to 26,2% of the Sapucari renewable reserve and 11,6% of the Maruim.

Keywords: karst aquifers; Sedimentary Basin of Sergipe-Alagoas; transmissivity; water reserves; hydrogeological model.

INTRODUÇÃO

Os terrenos cársticos são áreas com características hidrogeológicas específicas, com ocorrências de dolinas, condutos e cavernas, e podem constituir importantes áreas de desenvolvimento urbano, agrícola e industrial, quando os mesmos permitem o armazenamento de significativas reservas de água. Apesar do risco geotécnico inerente a estes terrenos, como a subsidência do solo, que são potencializados com a exploração das águas subterrâneas.

Segundo Ford e Williams (2007), o carste é um tipo especial de paisagem contendo cavernas e extensos sistemas de águas subterrâneas, e nesses terrenos aproximadamente 20-25% da população mundial depende inteira ou parcialmente de seus reservatórios.

Na área de estudo a investigação hidrogeológica se tornou necessária devido à importância dos recursos hídricos subterrâneos para o abastecimento humano, uma vez que é responsável por parte do abastecimento público (demanda de aproximadamente 6.149.500 m³/ano) do abastecimento público da Região Metropolitana de Aracaju (ANA, 2015).

O objetivo deste artigo é a caracterização dos aquíferos cársticos a partir da análise de parâmetros hidrodinâmicos, tais como: nível estático (NE), nível dinâmico (ND), vazão (Q), capacidade específica (Sc) e transmissividade (T), de aspectos geológicos, geomorfológicos (feições cársticas) e estruturais. Todos os dados integrados num modelo hidrogeológico conceitual. Outros objetivos consistem em determinar as reservas hídricas dos aquíferos, e se há relação entre a carstificação e aspectos estruturais da Bacia Sergipe-Alagoas com os parâmetros hidrodinâmicos analisados.

Os aquíferos estudados são o Sapucari e o Maruim, compostos por rochas carbonáticas de idade cretácea, localizados na Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas. As zonas aquíferas encontram-se nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, no Estado de Sergipe (Figura 1).

GEOLOGIA LOCAL

Compreendem os terrenos carbonáticos do Grupo Sergipe, da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas, representados respectivamente pelas formações Riachuelo e Cotinguiba. De acordo com Feijó (1994), os membros da Fm. Riachuelo são descritos como: Membro Angico (arenito branco fino a conglomerático); Membro Taquari (calcilitos e folhelhos cinzentos); Membro Maruim (calcários dolomitizados, calcarenito e calcirrudito oncolítico oolítico creme).

A litologia da Formação Cotinguiba permite individualizá-la em dois membros, o Aracaju e o Sapucari. O Membro Aracaju é constituído por calcilitos, folhelhos e margas, enquanto o Membro Sapucari, é caracterizado por calcilitos maciços e brechóides (CAMPOS NETO et al., 2007). Sobrepostos às unidades analisadas, encontra-se a Fm. Barreiras, composta por sedimentos clásticos continentais finos a grosseiros (FEIJÓ, 1994).

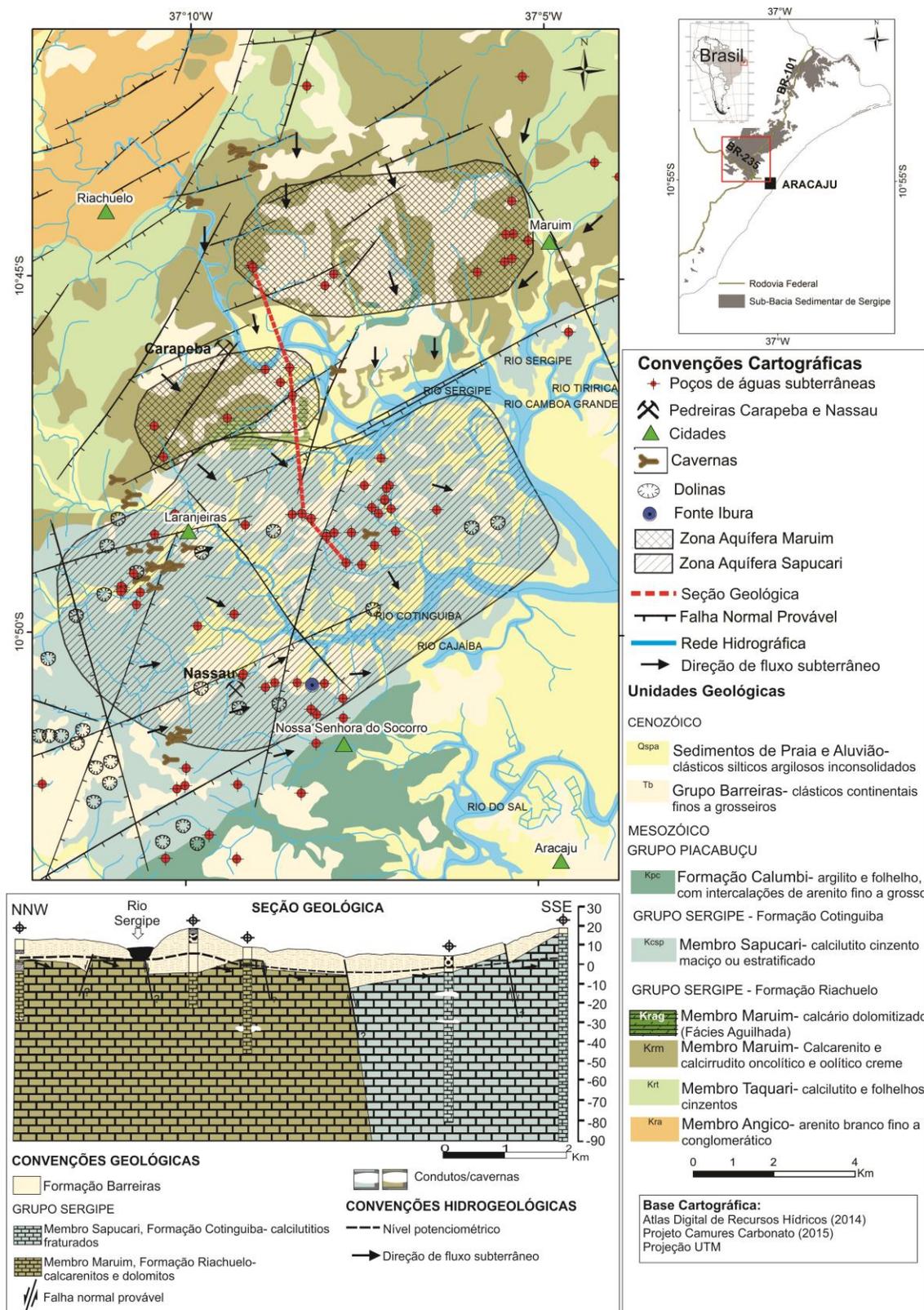


Figura 1. Mapa geológico da área de estudo com as zonas aquíferas Maruim e Sapucari.

Figure 1. Geologic map of the study area with Maruim and Sapucari aquifers zones.

Os aquíferos encontram-se sob influência de um regime hidrogeológico meteórico, em que as águas precipitadas recarregam os aquíferos em áreas com cotas topográficas superiores a 40 metros, junto à borda oeste da bacia de Sergipe, onde as zonas fraturadas estão ligadas aos altos topográficos (FEITOSA et al., 2008). Assim, percolam em subsuperfície, formando condutos e cavernas, até as zonas de descargas nos rios Cotinguiba e Sergipe e na Fonte do Ibura.

MATERIAIS E MÉTODOS

Cadastro de poços de águas subterrâneas e fotointerpretação em SIG

O cadastro de poços de águas subterrâneas elaborado utilizou dados de 85 poços, obtidos em relatórios de perfurações das empresas DESO e COHIDRO, e documentos de outorgas subterrâneas concedidas pela Superintendência de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH). Em seguida, foram criadas planilhas com as coordenadas (X, Y; Z), município, localidade, informações sobre o aquífero, profundidade do poço, nível estático, nível dinâmico, vazão (m^3/h) e capacidade específica ($m^3/h/m$).

Os procedimentos de fotointerpretação geológica, realizados a partir das ortofotocartas dos municípios litorâneos, escala 1:10.000 (SEPLAN-SE, 2003), resultaram na identificação de aspectos estruturais e dolinas. Os resultados desses processamentos foram sobrepostos ao modelo digital de elevação e relevo sombreado, gerados com base em imagens SRTM e ASTER. Esse procedimento visou à identificação de fotolineamentos e principais configurações geológicas e geomorfológicas.

Estratigrafia e porosidade eficaz

Os trabalhos de campo e pós-campo resultaram na elaboração de duas colunas estratigráficas representativas do Membro Maruim, Formação Riachuelo (pedreira inativa Carapeba) e do Membro Sapucari, Formação Cotinguiba (pedreira ativa Nassau) e uma seção geológica NNW-SSE.

A análise de 42 laminas petrográficas e dados petrofísicos selecionados do banco de dados do Projeto Camures Carbonato (GARCIA et al., 2015), permitiu a identificação dos principais constituintes litológicos e características do sistema poroso dos litotipos estudados.

Os ensaios de porosidade (%) e permeabilidade (mili-Darcy) em amostras (*plugs* com 1,5 polegada de diâmetro e altura de 5 cm) das pedreiras Carapeba (30 amostras) e Nassau (9 amostras) foram realizados no equipamento permoporosímetro a gás, do laboratório de Petrofísica da Universidade Federal de Campina Grande. Nos dados gerados foi aplicada uma correlação logarítmica entre porosidade e permeabilidade, visando à determinação da porosidade eficaz das amostras analisadas.

Estimativa da transmissividade (T) e correlação com capacidade específica (Sc)

A Transmissividade pode ser obtida a partir da interpretação de dados do teste de bombeamento, e corresponde a uma propriedade importante do aquífero para determinação do seu potencial, o que implica nas possibilidades de extração das águas subterrâneas.

Segundo El-Naqa (1994), a Transmissividade também pode ser determinada a partir de uma análise de correlação, onde T é teoricamente linear a Capacidade Específica. O método aplicado para a determinação da Transmissividade foi o da Recuperação (THEIS, 1935). Para o cálculo utilizou-se a Equação 1.

$$s' = \frac{2.3Q}{4\pi T} \log \left(\frac{t}{t'} \right) \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: **Q**- Vazão do poço; **s'** - é o rebaixamento residual (m), ou seja, diferença entre o nível da água durante o teste de recuperação e o nível estático natural; **T**- Transmissividade do aquífero (m²/d); **t** e **t'** é a taxa de tempo (tempo total pelo tempo de recuperação).

A distribuição da frequência dos parâmetros Sc e T é teoricamente linear à vazão constante. Grandes alterações de valores de Sc causam grandes variações de T. Os valores de Sc e T devem ser

estatisticamente homogêneos e de natureza aleatória, o que viabiliza a aplicação da análise de regressão e correlação (Razack & Huntley, 1991).

O Coeficiente de correlação foi determinado para os dados brutos, e transformados em log base 10 com o objetivo de obter uma melhor normalização da distribuição da frequência (simetria dos dados). Foram utilizadas informações de 47 poços tabulares para determinação do T empírico.

Estimativa de reservas hídricas

Para a determinação das reservas hídricas foi aplicada a metodologia desenvolvida por Costa (1998), que permite o cálculo de reservas (permanente e renovável), potencialidades e disponibilidades para diferentes tipos de aquíferos.

A reserva permanente é dada pela Equação 2, e corresponde ao volume hídrico acumulado no aquífero decorrente da porosidade eficaz e do coeficiente de armazenamento não variável em função da flutuação sazonal da superfície potenciométrica (COSTA, 1998).

$$R_p = A * b * \mu \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: R_p - reserva permanente no aquífero (m^3); A - área de ocorrência do aquífero (m^2); b - espessura saturada do aquífero livre ou confinado (m); μ - porosidade eficaz do aquífero.

A reserva renovável corresponde ao volume hídrico acumulado no aquífero, em função da porosidade eficaz ou do coeficiente de armazenamento e variável anualmente em decorrência dos aportes sazonais de água superficial, do escoamento subterrâneo e dos exutórios (COSTA, 1998). É calculada através da Equação 3:

$$R_r = k * b * l * i \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: R_r - reserva reguladora do aquífero (m^3/ano); k - condutividade hidráulica do aquífero (m/ano); b - espessura saturada do aquífero (m); l - largura da frente de escoamento (m); i - gradiente hidráulico medido entre as curvas potenciométricas (adimensional).

A potencialidade é dada pela reserva reguladora, multiplicada por um fator de 1,15 na Equação 4.

$$Po = Rr * 1,15 \quad (\text{Equação 4})$$

A Disponibilidade Efetiva Instalada (DEI) corresponde ao volume anual passível de exploração por meio de obras de captação existentes, com base na vazão máxima de exploração (8/24h) para aquíferos de rochas sedimentares, dada pela Equação 5.

O valor 2920 corresponde a multiplicação da vazão (m^3/h) por dia de funcionamento dos poços (neste caso foi considerada 8h por dia) pela quantidade de dias durante do ano (365 dias).

$$DEI = N * Qm * 2920 \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: n- número de poços existentes no aquífero; Qm- vazão média horária (m^3/h)

RESULTADOS

Estratigrafia, porosidade e permeabilidade, e fotolineamentos

As melhores exposições litológicas dos aquíferos são encontradas em pedreiras ativas e inativas, com destaque para a Carapeba (Membro Maruim, Formação Riachuelo) e a Nassau (Membro Sapucari, Formação Cotinguiba).

A Figura 2 apresenta as colunas das pedreiras Carapeba e Nassau. A primeira é uma pedreira inativa composta por calcarenitos finos a médios, de geometria lenticular na sua base. Possui constituintes bioclastos e ooides. A coluna da Nassau, pedreira ativa, é composta por camadas de calcilitos laminados fraturados e margas com níveisossilíferos.

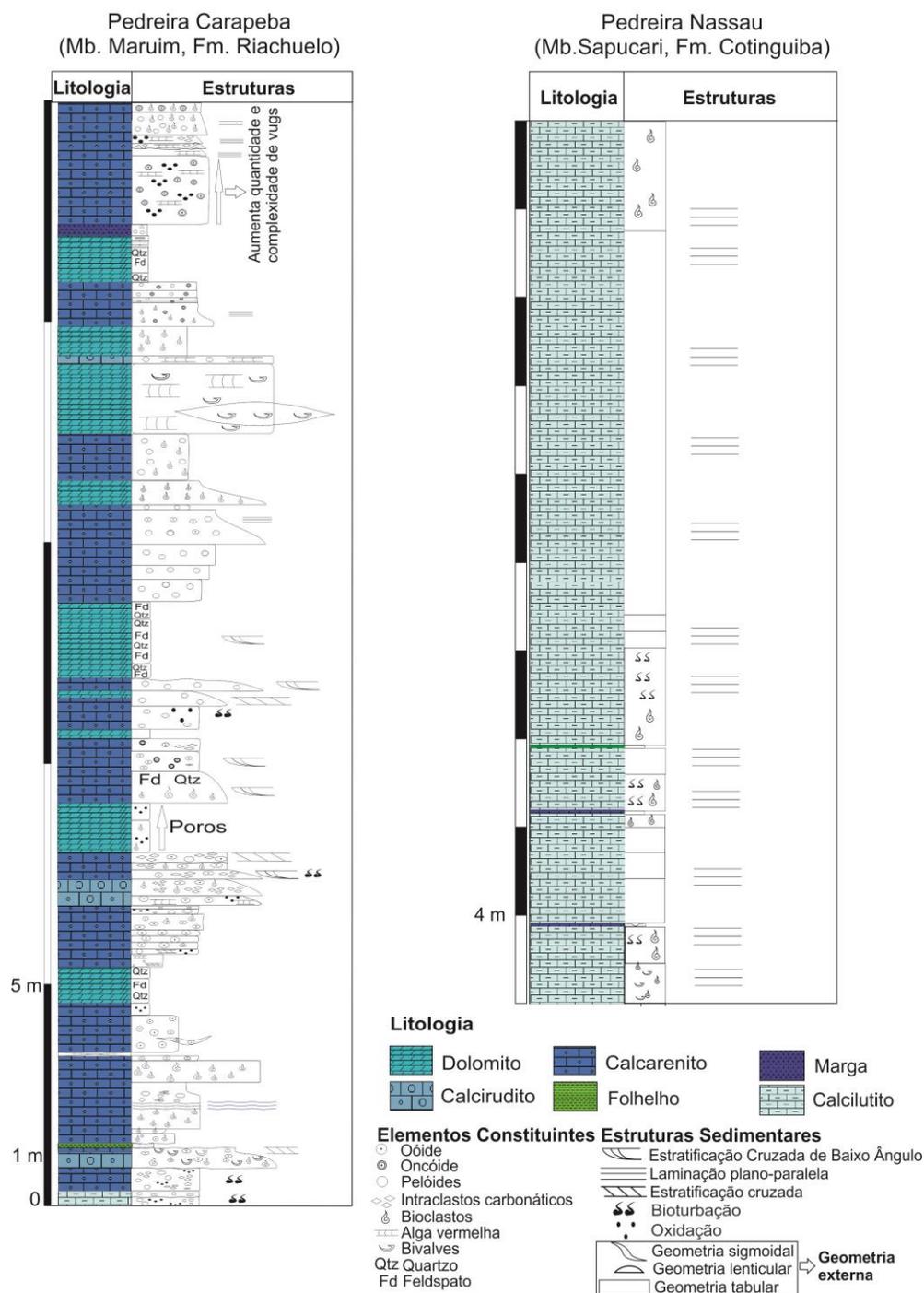


Figura 2. Colunas litoestratigráficas da pedreira Carapeba (Membro Maruim, Fm. Riachuelo), e da pedreira Nassau (Membro Sapucari, Fm. Cotinguiba). Descrição de campo: Autores & Garcia et al. (2015).

Figure 2. Lithostratigraphic logs of the Carapeba quarry (Member Maruim, Fm. Riachuelo), and Nassau quarry, Member Sapucari, Fm. Cotinguiba. Field description: Authors and Garcia et al. (2015).

Os valores de porosidade e permeabilidade (Figura 3) apresentam uma distribuição log-normal, com coeficiente de correlação de 79%. A porosidade eficaz calculada foi de 12% para pedra de Carapeba e de 15,4% para a Nassau. Em lâminas petrográficas os principais tipos de porosidade identificadas são (Figura 4): Vugular- fácies dolomitizadas, gerada pela dissolução do cimento; Fratura- geradas por deformações e dissolução.

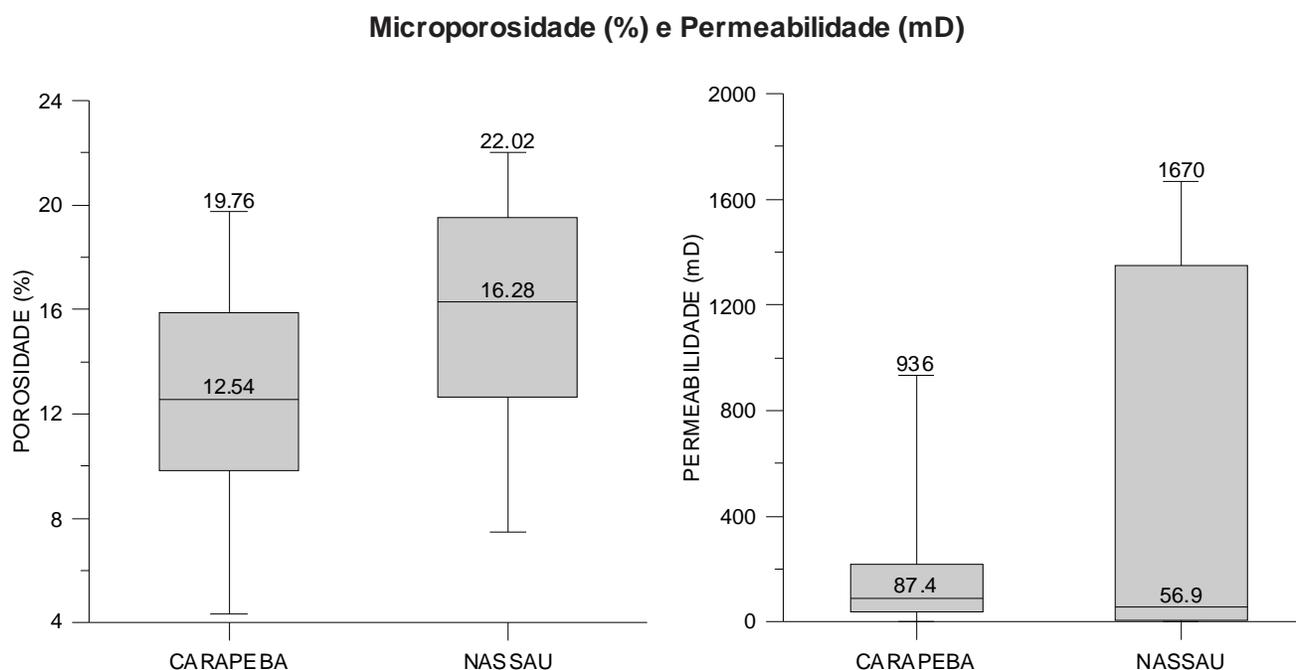


Figura 3. Valores mínimos, máximos e medianas de porosidade e permeabilidade.

Figure 3. Minimum, maximum and median values of porosity and permeability.

A Figura 5 apresenta o mapa de relevo sombreado da área com indicação de lineamentos e feições cársticas. Os lineamentos extraídos do relevo sombreado e fotointerpretação mostram que a área foi afetada por um conjunto de falhas com direções preferenciais NE-SW, e secundários NW-SE, N-S e E-W. As áreas com maiores ocorrências de cavernas estão situadas nos interflúvios do rio Cotinguiba.

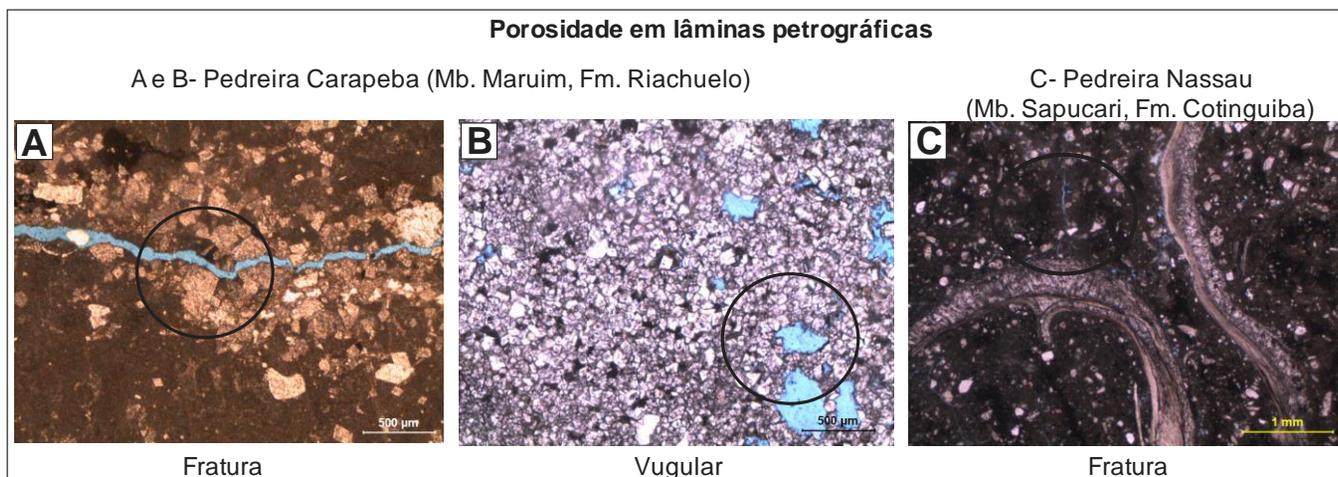


Figura 4. Tipos de porosidade identificadas em lâminas petrográficas.

Figure 4. Porosity type identified in petrographic thin sections.

Observa-se uma maior concentração de cavernas e dolinas no setor Oeste da área de estudo, em zona com estruturas predominantes de direção NE-SW. Neste setor, assim como no setor NE, é possível identificar mudanças na direção do rio, apesar do padrão geral dendrítico, o que indica um alinhamento estrutural nas áreas destacadas em vermelho.

Zonas com cavernas e condutos também são encontradas em descrição de poços perfurados nos aquíferos Maruim e Sapucari, associadas a sistemas de falhas regionais. Essas feições em subsuperfície ocorrem em profundidades estratigráficas entre 10 e 140 metros. As zonas mais carstificadas encontram-se entre 20 e 40 metros de profundidade, no povoado da Estiva, em Nossa Senhora do Socorro.

Os padrões estruturais NE aparecem como mais importantes e representam o comportamento estrutural da Bacia. Este fato foi verificado por Lana (1990) que afirma que o final do estágio rifte é marcado por falhas normais N45E, de grandes rejeitos.

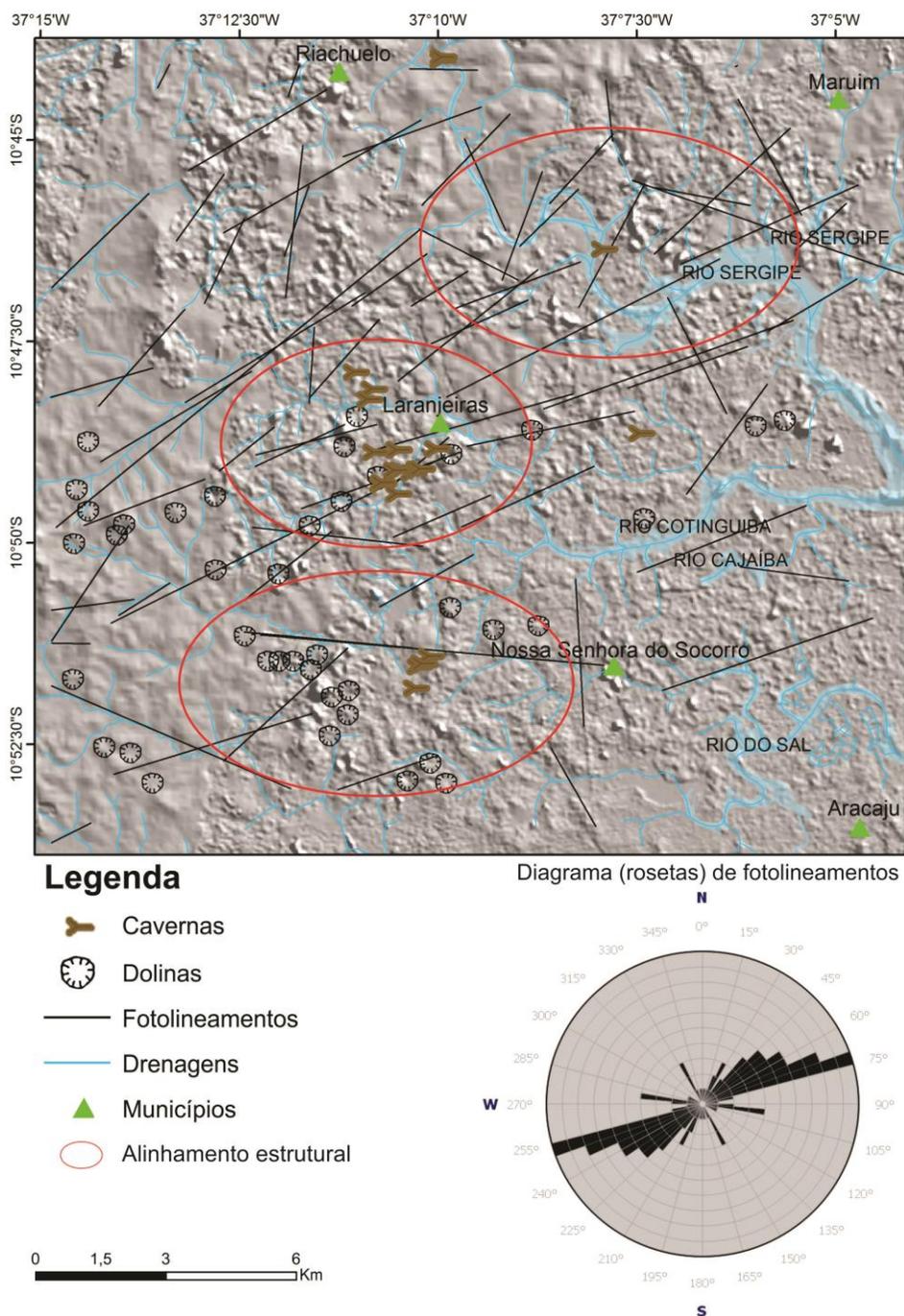


Figura 5. Mapa de relevo sombreado com lineamentos identificados e áreas destacadas em vermelho representando os setores onde há um controle estrutural relacionado a cavernas e dolinas ou mudança no alinhamento da drenagem.

Figure 5. Hillshade map with identified lineaments and highlighted red areas representing sectors where there is structural control related to sinkholes and caves or change in drainage alignment.

Parâmetros hidrodinâmicos

A Tabela 1 apresenta os parâmetros analisados e suas amplitudes de valores. Nos sistemas Sapucari e Maruim as entradas d'água ocorrem geralmente numa profundidade média de 21,5 metros e 21,6 metros respectivamente, o que configura uma estreita relação com a recarga da água meteórica.

A Transmissividade dos aquíferos foi determinada pelo método da Recuperação de Theis (1935), com posterior geração da equação empírica a partir da correlação $T \times Sc$. O coeficiente de correlação linear de dados brutos, obtidos pelo método da Recuperação foi de 70% para 28 poços com dados de teste de Recuperação.

Tabela 1. Parâmetros hidrodinâmicos analisados.

Table 1. Hydrodynamic parameters analyzed.

	AQUÍFERO SAPUCARI							
	Mínimo	1º Quartil	Média	Mediana	3º Quartil	Máximo	Desvio Padrão	Assimetria
Nível Estático (m)	0,9	2,6	10,6	7,41	16,5	37,7	9,8	1,2
Nível Dinâmico (m)	1,6	12,2	27,1	25,3	38,7	97,8	18,9	1,1
Vazão (m ³ /h)	4,4	13,7	99	94,5	178,4	254	87,3	0,2
Capacidade Específica (m ³ /h/m)	0,3	2	51,2	10,3	30	638,7	130,5	4,3
Transmissividade (m ² /d)	8,4	37,9	725,4	200,3	549,2	7859,0	1614,2	3,5
	AQUÍFERO MARUIM							
	Mínimo	1º Quartil	Média	Mediana	3º Quartil	Máximo	Desvio Padrão	Assimetria
Nível Estático (m)	0,7	3,9	8,2	7,74	12,4	20,2	5,4	0,5
Nível Dinâmico (m)	1,5	8,1	20,1	14,2	32,3	54,3	15,8	0,8
Vazão (m ³ /h)	0,3	5	20,6	10,8	22	158	38,9	2,5
Capacidade Específica (m ³ /h/m)	0,01	0,3	20,6	3,7	25,1	158	36,4	2,7
Transmissividade (m ² /d)	0,5	3,6	113,3	37,6	176,8	687,4	165,9	1,9

Concordando com os estudos de Razack & Huntley (1991); El-Naqa (1994); e Mace (2001), a correlação com valores logarítmicos apresentou-se melhor que a correlação linear, com um coeficiente de correlação (r) de 88% para os poços do Sapucari e 80% para os do Maruim (Figura 6). As equações teóricas de correlação obtidas para a Transmissividade são observadas nas Equações 6 e 7. Foram

utilizadas informações de 47 poços (24 poços do Sapucari e 23 do Maruim) para determinação do T empírico.

Os resultados de T são heterogêneos em ambos os aquíferos, destacando-se o Sapucari, com T máximo de 7859 m²/d. Neste, a média da T é 725,42 m²/d, já no aquífero Maruim é de 113,32 m²/d. Pela classificação de De Wiest (1965), o aquífero Maruim apresenta um potencial moderado (50<T>500 m²/d). Porém, o aquífero Sapucari apresenta alto potencial (> 500 m²/d).

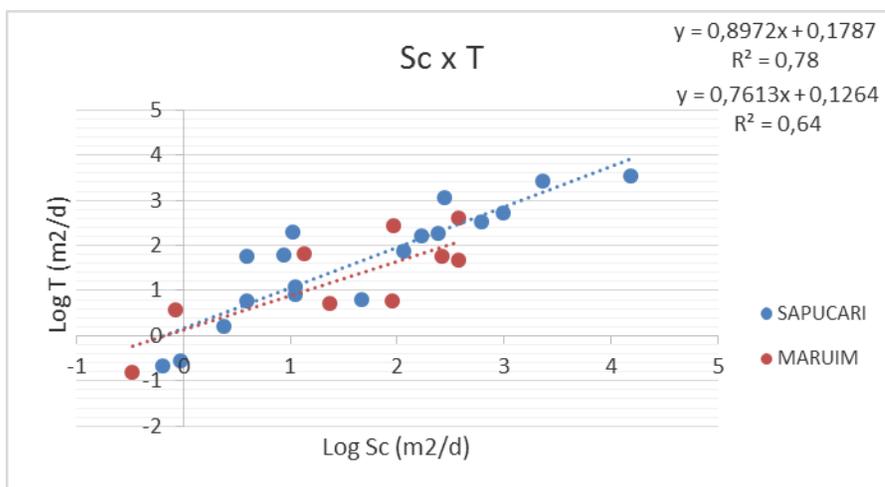


Figura 6. Correlação logarítmica entre a Capacidade Específica (Sc) e a Transmissividade (T) com aplicação do método da Recuperação (THEIS, 1935).

Figure 6. Logarithmic correlation between the Specific Capacity (Sc) and Transmissivity (T) with application of the Recovery method (THEIS, 1935).

Equação 6- Aquífero Maruim

$$\log T = 0,12 + 0,76 \log(Sc) \quad \text{ou} \quad T = 1,31(Sc)^{0,76}$$

Equação 7- Aquífero Sapucari

$$\log T = 0,17 + 0,89 \log(Sc) \quad \text{ou} \quad T = 1,48(Sc)^{0,89}$$

O maior potencial aquífero encontra-se em zonas com cavernas, dolinas e falhas geológicas nos setores I e II da Figura 7. Isto indica uma relação de padrão de fluxo concordante com o mergulho (SE) das camadas litológicas e direção de falhas geológicas, preferencialmente NE-SW. O setor III apresenta

poucos poços, porém com grande concentração de feições estruturais, dolinas e cavernas, indicando um potencial para futuras pesquisas exploratórias de águas subterrâneas.

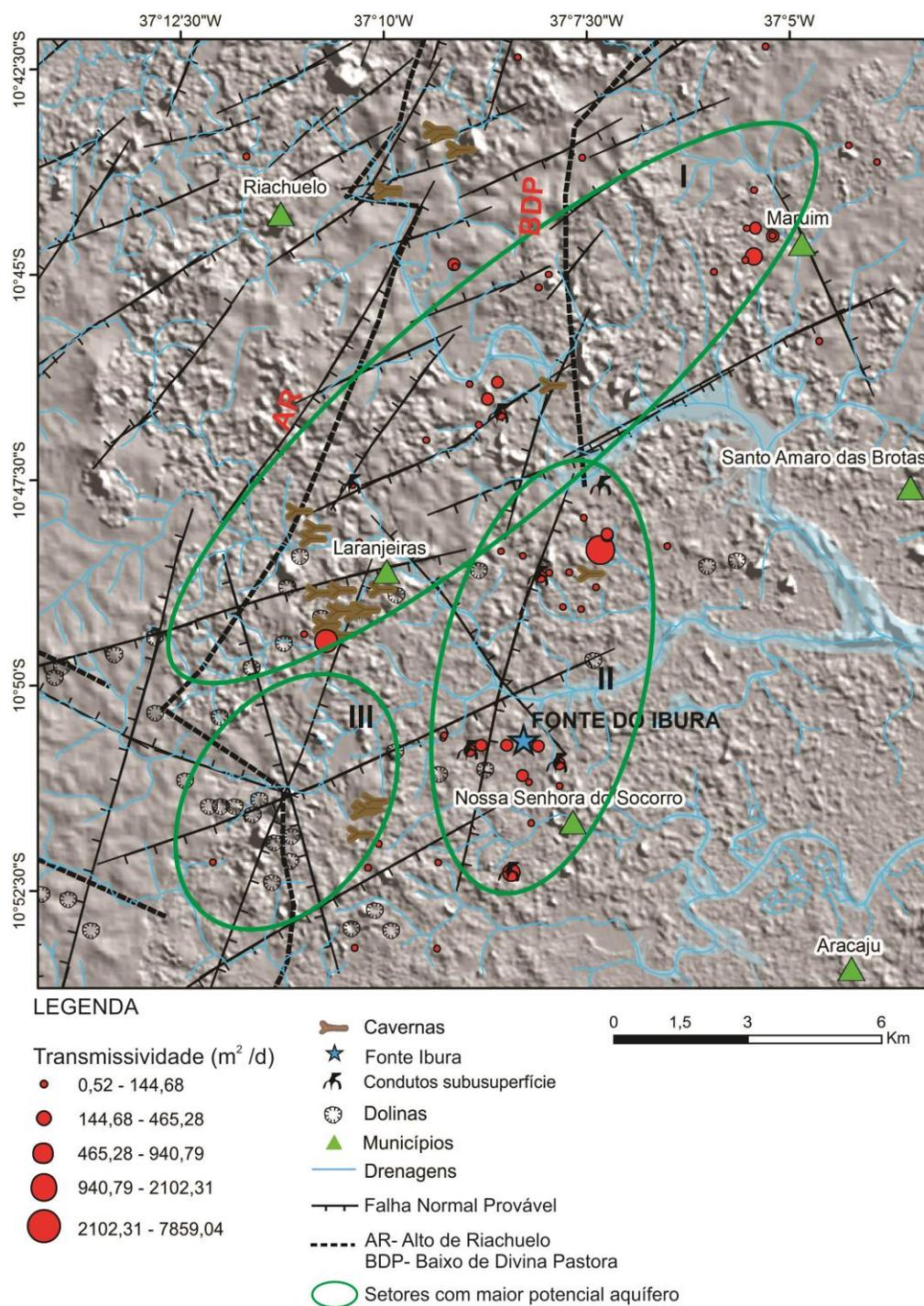


Figura 7. Mapa de Transmissividade (m^2/d) com destaque para os setores de maior potencial aquífero.

Figure 7. Transmissivity Map (m^2/d) with highlight to the sectors with highest aquifer potential.

Reservas hídricas

As reservas hídricas calculadas são apresentadas na Tabela 2. As potencialidades dos aquíferos são de **53.568.983 m³/ano** para o Sapucari e **7.543.645 m³/ano** para o Maruim. Considerando um regime de bombeamento de 8 horas por dia, têm-se vazões anuais de **12.227.208 m³/ano** para o Sapucari, e **764.456 m³/ano** para o Maruim.

Tabela 2. Reservas hídricas dos aquíferos Sapucari e Maruim.

Table 2. Water reserves of the Sapucari and Maruim aquifers.

Reservas Permanentes (m³)				
	Area (m²)	b (m)	Porosidade eficaz (%)	Total (m³)
Sapucari	102.480.000	73,17	0,154	1.154.763.086
Maruim	109.077.000	46,28	0,12	605.770.027
Reservas Renováveis (m³/ano)				
	K*b (m²)	I (m)	i	Total (m³/ano)
Sapucari	264.789	8.796	0,02	46.581.724
Maruim	41.361	9.329	0,017	6.559.691

Modelo hidrogeológico conceitual

No modelo hidrogeológico conceitual da área (Figura 8) observa-se o direcionamento preferencial SE do fluxo subterrâneo, identificando os aspectos estruturais e feições cársticas como zonas de condução deste fluxo.

Este processo permite que as rochas carbonáticas da área sejam dissolvidas, tendo como principal consequência o gradual alargamento dos espaços vazios da rocha, formando condutos e cavernas, com quantidade significativa de água sendo direcionada para as áreas situadas a sudeste e em direção aos rios principais. Como é observado na Fonte do Ibura, zona de descarga do aquífero Sapucari.

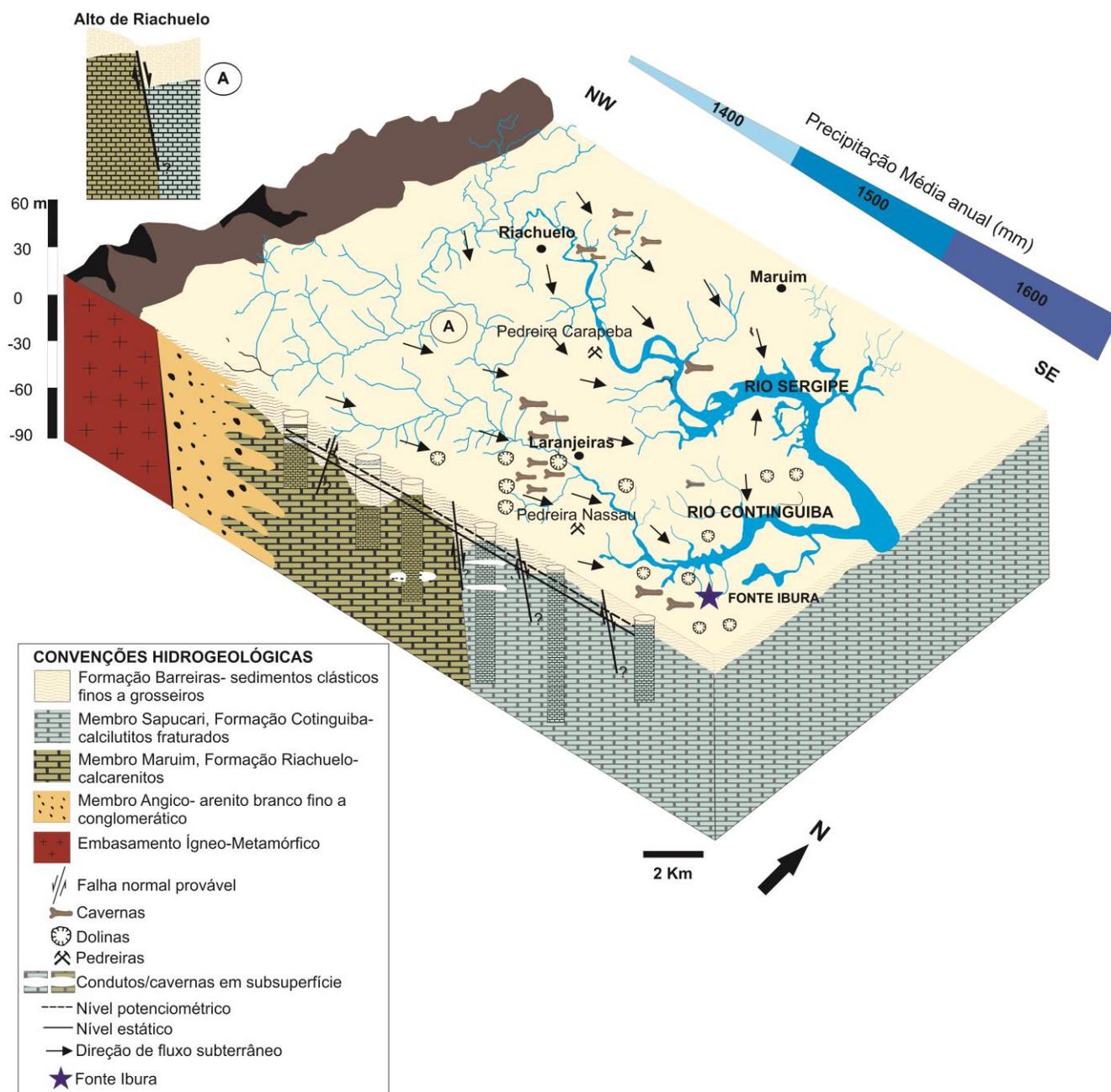


Figura 8. Modelo hidrogeológico conceitual da área de estudo, com representação do direcionamento do fluxo subterrâneo, dolinas e cavernas.

Figure 8. Hydrogeological model of the study area, with representation of the groundwater flow direction, dolines and caves.

CONCLUSÕES

Na área de estudo, os condutos presentes em cavernas são mais frequentes nos calcários Sapucari, com direcionamentos NW e NE. Os padrões NE coincidem com o direcionamento preferencial das falhas geológicas (NE-SW), e o mergulho para sudeste das camadas carbonáticas, permitindo a infiltração da água de superfície pelos espaços fissurais.

As heterogeneidades dos valores de porosidade e permeabilidade são explicadas pelo potencial de dissolução associada à formação de porosidade secundária. Na associação porosidade, permeabilidade e transmissividade, os altos valores desses parâmetros refletem o comportamento cárstico dos aquíferos, onde os fluxos nas zonas fraturadas proporcionam o desenvolvimento de condutos.

A disponibilidade atualmente instalada representa 26,2% da reserva renovável do Sapucari. Enquanto o aquífero Maruim possui uma disponibilidade atualmente instalada correspondente a 11,6% da reserva renovável. Isto torna ambos os aquíferos sustentáveis em termos de reservas, devendo-se considerar o risco geológico associado à exploração das águas subterrâneas em terrenos cársticos, como também a sua qualidade.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/atlas>. Acesso em: 20 out. 2015.

CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA W.S.; CRUZ F.E.G. Bacia Sergipe-Alagoas. Boletim de Geociências da Petrobras. v.15, n. 2, p. 405–415, 2007.

COSTA, W. D. Avaliação de reserva, potencialidade e disponibilidade de aquíferos. 1998. Disponível em: <<https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

DE WIEST, R.J.M. Geohydrology. John Wiley, New York. 1965.

- EL-NAQA, A. Estimation of transmissivity from specific capacity data in fractured carbonate rock aquifer, central Jordan. *Environmental Geology*, v.23, p. 73-80, 1994.
- FEIJÓ, F. J. Bacia de Sergipe e Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. Rio de Janeiro. V. 8, n.1, p. 149-161, 1994.
- FEITOSA, E. C. (Coord.); FILHO, J. M., DEMÉTRIO, J. G. A., SANTOS, R.Q., SANTOS, M. A. V., AGUIAR, N. F., DEMÉTRIO, J. A. Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE. PETROBRAS, 175 p,1998.
- Ford, Derek. C., Williams, P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Ed.Wiley, 2007. 562p.
- GARCIA, A.J.V. et al. Caracterização multiescalar em reservatórios carbonáticos análogos da Bacia Sergipe-Alagoas São Cristóvão, SE. PETROBRAS/REDE CARMOD/UFS. 2015.
- LANA, M. C. Bacia de Sergipe-Alagoas: uma hipótese de evolução tectono-sedimentar. *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*, p.311-332, 1990.
- MACE, R. E. Estimating transmissivity using specific capacity data. Bureau of Economic Geology. University of Texas. 2001.
- RAZACK, M., HUNTLEY D. Assessing transmissivity from specific capacity in a large heterogeneous alluvial aquifer. *Groundwater*, v. 29, n°6, p. 856-861, 1991.
- SEPLAN. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão de Sergipe. Base Cartográfica dos Municípios Litorâneos, 2003.
- THEIS, C.V. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage. *Am. Geophys. Union Trans*, vol. 16, p. 519-524, 1935.

CAPÍTULO IV

ARTIGO 3 - CARACTERIZAÇÃO HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA DOS AQUÍFEROS CÁRSTICOS SAPUCARI E MARUIM, BACIA SEDIMENTAR DE SERGIPE-ALAGOAS, NORDESTE DO BRASIL

RESUMO

Este artigo caracteriza os aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, nas cidades de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, nordeste do Brasil, com uso de ferramentas hidrogeoquímica e isotópicas. As águas subterrâneas são classificadas como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas (Ca-HCO_3^- e Ca-Mg-HCO_3^-). A dominância dos íons HCO_3^- é atribuída à dissolução de carbonatos, um dos processos responsáveis pela salinização das águas subterrâneas na área. A alta correlação do STD com o sódio e cloretos sugere a mistura de águas, devido à influência dos rios Sergipe e Cotinguiba, constituindo fator significativo no processo de salinização das águas subterrâneas. Os índices de saturação das amostras dos aquíferos Sapucari e Maruim mostram que ambos os aquíferos apresentam tendência à saturação e supersaturação em calcita e dolomita. A análise de Componentes Principais contribui para a interpretação da influência dos rios nos aquíferos, principalmente no Sapucari, uma vez que a PC1 apresenta forte associação (positiva) entre as seguintes variáveis: condutividade elétrica, sódio, potássio, magnésio, cloretos e sulfatos. Já no Maruim, o cálcio e o bicarbonato apresentam boas contribuições na PC1, indicando uma predominância da dissolução de carbonatos. O risco de salinização dos solos pelas águas do Sapucari é predominantemente alto, enquanto no Maruim é médio. Na investigação isotópica, o desvio em relação à Linha Meteórica Global é atribuído à evaporação e à

mistura de águas de diferentes fontes. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) indicam uma maior contribuição do intemperismo de carbonato por H_2CO_3^- e pela decomposição da matéria orgânica presente no solo.

Palavras-chave: hidrogeoquímica; isótopos estáveis; aquíferos cársticos; salinização.

ABSTRACT

This paper characterizes the Sapucari and Maruim karst aquifers, Sergipe-Alagoas Sedimentary Basin, in the municipalities of Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras and Maruim, northeastern Brazil, using hydrogeochemical and isotopic tools. Groundwaters samples are classified as Ca- HCO_3^- and Ca-Mg- HCO_3^- . The dominance of HCO_3^- ions is attributed to carbonate dissolution and groundwater salinization. A high correlation of STD with sodium and chlorides indicates a mixture of waters due to the influence of the Sergipe and Cotinguiba rivers, constituting the significant factor in the process of groundwater salinization. The saturation indices of the Sapucari and Maruim aquifers indicate that both shows a tendency to saturation and supersaturation in calcite and dolomite. The analysis of Principal Components contributes to the interpretation of the rivers influence in the groundwater composition, especially in Sapucari aquifer, since PC1 presents a strong (positive) association among the following variables: electrical conductivity, sodium, potassium, magnesium, chlorides and sulfates. In Maruim, calcium and bicarbonate present good contributions in PC1, indicating a predominance of carbonate dissolution. The risk of soils salinization by Sapucari waters is predominantly high, while in Maruim it is medium. In the isotopic investigation, the deviation from the Global Meteorological Line is attributed to the evaporation and mixing of water from different sources. The values of $\delta^{13}\text{C}$ (‰) indicate a higher contribution of the carbonate weathering by H_2CO_3^- and decomposition of the organic matter present in the soil.

Keywords: Hydrogeochemistry; stable isotopes; karst aquifers; salinization.

INTRODUÇÃO

Os aquíferos Sapucari e Maruim estão inseridos em áreas de desenvolvimento urbano e industrial, nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, situados a cerca de 30 Km de Aracaju, capital do estado de Sergipe. Os principais usos das águas subterrâneas na área são o abastecimento humano e industrial.

A qualidade e escassez de água e o risco geotécnico associado aos terrenos cársticos têm sido um desafio para a gestão dos recursos hídricos na área de estudo. A recarga dos aquíferos ocorre principalmente nas zonas das falhas de borda da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, em contato com o embasamento ígneo metamórfico, em cotas topográficas superiores a 40 metros (FEITOSA et al., 2008), enquanto que o clima da região é classificado como úmido subúmido, com precipitação média total 1299 mm/ano (INMET, 2016).

Segundo a metodologia de Thornthwaite (1948), em uma região só ocorrerá seca se a deficiência hídrica for maior que 60% do excedente hídrico da estação chuvosa. A área estudada apresenta 44% de déficit hídrico referente ao excedente da estação chuvosa (abril a agosto).

Os aquíferos cársticos são geralmente vulneráveis à contaminação de diferentes fontes de atividades humanas (DREW; HOTZL, 1999). Esses reservatórios abastecem aproximadamente 20-25% da população mundial (FORD; WILLIAMS, 2007). As rochas carbonáticas estudadas são cobertas por solos do tipo argissolo e chernossolo, que permitem o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e cultivos de subsistência. Outros tipos de atividades se destacam na região como a mineração de calcário utilizado na indústria do cimento, construção civil e a indústria de fertilizantes.

O objetivo principal do estudo foi aplicar ferramentas hidrogeoquímicas e isotópicas na caracterização das águas subterrâneas dos aquíferos Sapucari e Maruim. Outros objetivos consistiram em gerar a modelagem geoquímica a partir dos índices de saturação dos principais elementos analisados; realizar análises isotópicas de δD (Deutério); $\delta^{18}O$ (Oxigênio 18) e $\delta^{13}C$ (Carbono

Inorgânico Dissolvido); determinar a classificação das águas subterrâneas para irrigação, e analisar sua qualidade, a partir dos parâmetros analisados, para o abastecimento humano, dessedentação de animais e outros usos, segundo a Portaria nº 2914/2011 (BRASIL, 2011) do Ministério da Saúde e a Resolução CONAMA nº 396 (BRASIL, 2008).

GEOLOGIA E HIDROGEOLOGIA

A área de estudo encontra-se no contexto geológico da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas (Figura 1), formada por carbonatos marinhos das formações Riachuelo e Cotinguiba. Estas unidades encontram-se sobrepostas aos folhelhos e calcilitos do Membro Oiteirinhos e dos depósitos evaporíticos do Membro Ibura, da Formação Muribeca (Figura 1). No setor oeste da área estão em contato com o embasamento ígneo metamórfico, através da falha de borda da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas.

Feijó (1994) descreve os Membros da Formação Riachuelo da seguinte forma: Mb. Angico – arenito branco fino a conglomerático; Mb. Taquari – calcilitos e folhelhos cinzentos; Mb. Maruim – calcarenito e calcirrudito oncolítico oolítico creme, e recifes algálicos isolados (Figura 1).

A litologia da Formação Cotinguiba permite individualizá-la em dois membros, o Aracaju e o Sapucari (Figura 1). O Membro Aracaju é constituído por calcilitos, folhelhos e margas, enquanto o Membro Sapucari, predominante na área de estudo, é caracterizado por calcilitos maciços e brechoides (CAMPOS NETO et al, 2007). Sobrepostas a estas unidades, encontram-se sedimentos da Formação Barreiras, constituído por sedimentos terrígenos finos a grosseiros, de coloração variada e estratificação irregular (SCHALLER, 1969).

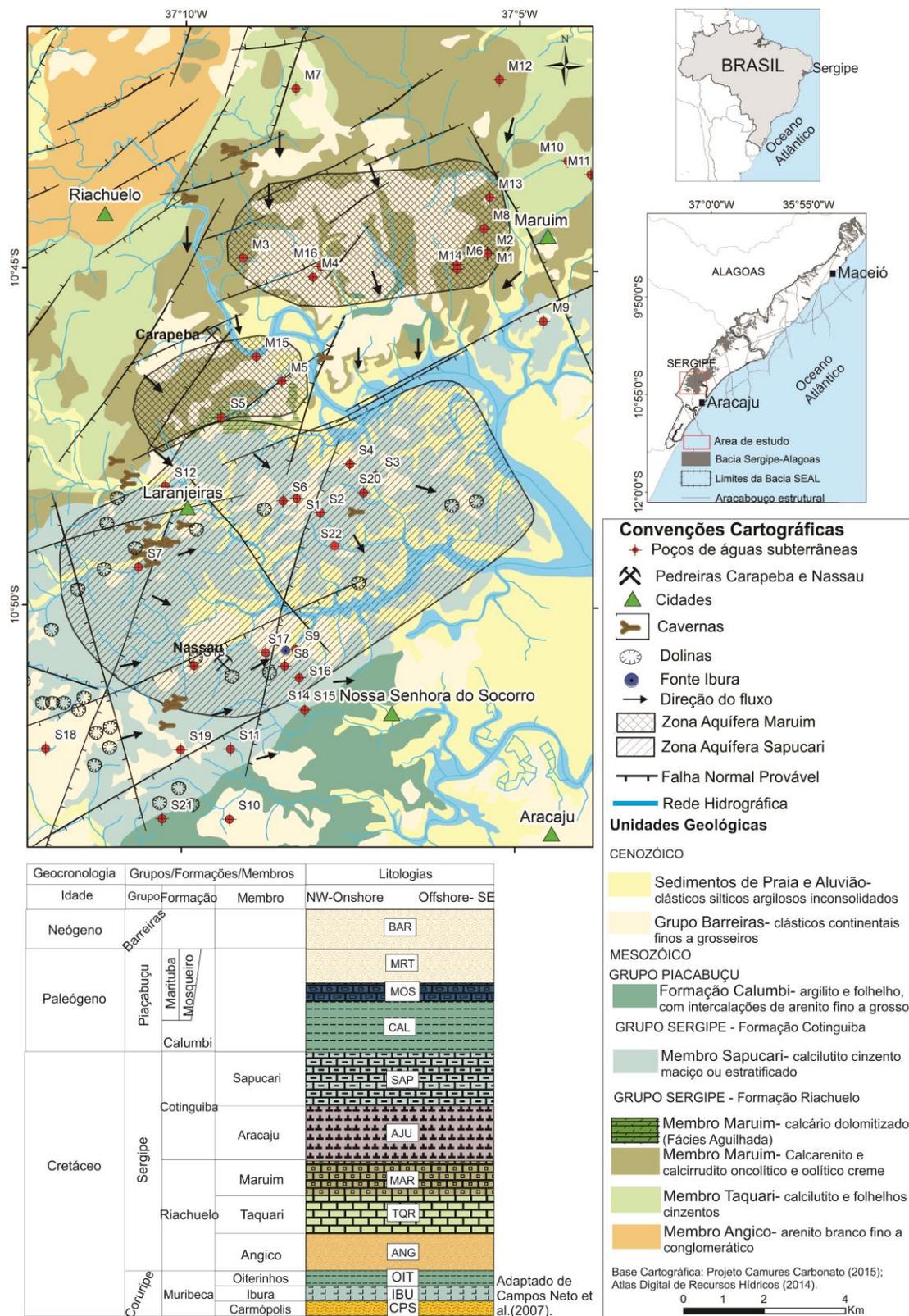


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo com as zonas aquíferas, configurações geológicas e poços de águas subterrâneas (modificado de RIBEIRO; NASCIMENTO; GARCIA, 2017).

Dolinas e cavernas são descontínuas ao longo das zonas carbonáticas analisadas, concentrando-se as maiores ocorrências nas áreas dos calcários Sapucari. Também são identificados condutos e cavernas em descrição de poços tubulares tanto no Membro Sapucari como no Maruim, associados, por vezes, a sistemas de fraturas regionais.

As melhores exposições das rochas carbonáticas são localizadas nas pedreiras Carapeba e Nassau. A primeira é composta por calcarenitos finos a médios oolíticos, pouco bioclástico, e calcário dolomítico (Mb. Maruim, da Fm. Riachuelo), evidenciando um sistema marinho de água rasa.

Na pedreira Nassau encontram-se os calcilutitos laminados fraturados com níveis fossilíferos e margas com alto teor de matéria orgânica, representativo de um ambiente de baixa energia, correspondente a marinho profundo (Mb. Sapucari, da Fm. Cotinguiba). O Membro Sapucari apresenta grande homogeneidade nos seus constituintes litológicos, porém uma considerável heterogeneidade nos seus aspectos estruturais, de porosidade e permeabilidade, que atuam como superfícies condutoras ou barreiras de água subterrânea.

O aquífero Sapucari (Mb. Sapucari, da Fm. Cotinguiba) possui uma transmissividade média de 725,42 m²/d, e o aquífero Maruim, 113 m²/d (RIBEIRO et al., 2017). O fluxo das águas subterrâneas nas zonas aquíferas analisadas flui dos altos topográficos, próximos às falhas de borda da bacia, em direção aos rios Cotinguiba e Sergipe, e em seguida, para o mar. As entradas d'água ocorrem em profundidades médias de 21m nos aquíferos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem

Vinte amostras foram coletadas no mês de agosto de 2015 para as análises hidroquímicas e isotópicas. Dados hidroquímicos de poços outorgados pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos (SEMARH), bem como dados da Companhia de Saneamento de Sergipe

(DESO) e da Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe (COHIDRO), foram inseridos nas análises da pesquisa. Um total de 38 poços de águas subterrâneas foi utilizado na análise hidroquímica.

Os seguintes parâmetros foram obtidos *in situ*, com a sonda Multiparâmetro, da marca Horiba: pH; Eh; temperatura; oxigênio dissolvido; condutividade elétrica; sólidos totais dissolvidos; salinidade; dureza total e turbidez. O processo de coleta das amostras para as análises hidroquímicas seguiu as instruções fornecidas pelo Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS), que são baseadas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

Os parâmetros físico-químicos analisados são: bicarbonatos (HCO_3^-); alcalinidade total (CaCO_3); cálcio (Ca^{2+}); magnésio (Mg^{2+}); sódio (Na^+); potássio (K^+); cloretos (Cl^-); sulfatos (SO_4^{2-}); fluoreto total (F^-); nitrogênio total (N); cobre (Cu); chumbo (Pb); zinco (Zn); cádmio (Cd); ferro total (Fe); manganês (Mn); alumínio (Al); dureza total (CaCO_3); cor aparente (uH); fosfato reativo solúvel (P- PO_4).

A metodologia utilizada na coleta e preservação das amostras para análises isotópicas de Oxigênio 18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deutério (δD) e Carbono Inorgânico Dissolvido ($\delta^{13}\text{C}$) seguiram as instruções da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Análises laboratoriais hidroquímicas e isotópicas

Nas análises de laboratório, para a determinação de cátions e ânions, aplicou-se o método da Cromatografia iônica, e o método Titulométrico 2320 B (APHA, 2012) para o cálculo de carbonatos e bicarbonatos.

Para as análises de óleos e graxas na água, obtidas em dois poços, situados em postos de combustíveis, aplicou-se o método gravimétrico 5520B do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012).

A determinação dos metais Cu, Pb, Zn, Cd, Fe total, Mn total e Al total foi realizada através do método Espectrofotometria de Absorção Atômica, tendo como princípio a absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons.

Com uso do software QualiGraf (FUNCEME, 2014) foi estabelecida a classificação e qualidade das águas subterrâneas. A classificação da água foi definida a partir do Diagrama Triangular de Piper (1944). A definição da qualidade das águas para a uso na irrigação se deu a partir da aplicação e análise do diagrama de Lemoine (1954) nos dados obtidos.

Na modelagem geoquímica foi utilizado o software PHREEQC 2.0 de Parkhurst (1999). Os procedimentos realizados nesse software resultaram na definição dos índices de saturação em calcita, dolomita, aragonita, gipsita e halita (ISCalcita, ISDolomita, ISAragonita, ISGipsita e ISHalita) das amostras de águas subterrâneas.

A consulta à Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde e à Resolução CONAMA nº 396/2008 permitiu definir, considerando os dados analisados, a qualidade das águas subterrânea para diferentes usos.

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA/UFBA). A metodologia de análise utiliza o espectrômetro de massa MS Finnigan MAT Delta Plus e um reator automático (H-Device) para medir as razões $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e Deutério/Hidrogênio. As medidas foram realizadas em relação a um padrão internacional, segundo a equação 1.

Segundo Costa et al. (2007), para o controle de qualidade das análises, são utilizados padrões secundários, correspondentes a amostras com composição isotópica conhecida e referenciada em relação ao Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). O valor (δ) é dado em partes por mil, conforme a equação 1, e ajustado em relação à linha meteórica global de Craig (1961):

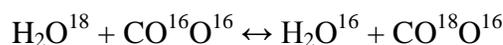
Equação 1:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R \text{ amostra} - R \text{ padrão}}{R \text{ padrão}} \times 10^3$$

Onde R é a razão isotópica, entre os isótopos pesados e os mais leves, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H (COSTA et al., 2007).

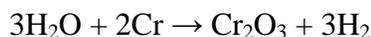
- Análise da razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – a metodologia aplicada, desenvolvida por Epstein e Mayeda (1953), consiste no equilíbrio da reação entre o gás carbônico e a água ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$) em uma temperatura de 25°C . A reação de equilíbrio isotópico ocorre segundo a equação 2. A composição isotópica do Oxigênio da amostra é dada pela equação 1.

Equação 2:



- Análise da razão Deutério/Hidrogênio – o método aplicado foi proposto por Brand et al. (1996). Este método consiste na transformação da água em hidrogênio, reduzindo-a a 850°C com cromo metálico, através do aparelho H-Device, ligado ao espectrômetro de massa (TELES, 2014; COSTA et al., 2007). Uma fração correspondente a $1,0 \mu\text{l}$ da água amostrada é injetada no reator, tendo como consequência a liberação do H_2 (Equação 3). O hidrogênio é conduzido para o espectrômetro de massas, onde é analisado em relação a um gás de referência do próprio H_2 .

Equação 3:



- Análise do $\delta^{13}\text{C}$ – Nas medidas de $\delta^{13}\text{C}$ foi aplicada a metodologia desenvolvida por Craig (1957), onde são utilizados $30 \mu\text{l}$ de ácido fosfórico, em um recipiente com o gás He. Em seguida, é adicionada a água, deixando em equilíbrio por aproximadamente 18h. O CO_2 é colocado no

espectrômetro de massas. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) são gerados em relação ao padrão internacional PDB (carbonato contendo fósseis de belemitas do Cretáceo da Formação Pee Dee, Carolina do Norte, EUA).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Hidroquímica das águas subterrâneas

Os resultados das análises hidroquímicas foram inicialmente avaliados a partir da porcentagem do erro analítico, segundo o método de Schoeller (1962). Esse método visa ao cálculo do erro em uma análise química, onde a soma dos cátions e ânions, em miliequivalentes por litro, deve ser mais ou menos igual (NASCIMENTO, 2008). O erro analítico foi calculado através da Equação 4 (SCHOELLER, 1962).

Equação 4:

$$e (\%) = [r\Sigma p - r\Sigma n / r\Sigma p + r\Sigma n] \times 100$$

Onde:

$r\Sigma p$ = concentração total de cátions em meq/L

$r\Sigma n$ = concentração total de ânions em meq/L

Schoeller considera um erro máximo de 5% para que a análise seja considerada correta, porém outros autores admitem um erro de até 10%, sendo este utilizado no trabalho. Segundo Santos (2008), altos valores de e (%) podem indicar: erro analítico; presença de íon não analisado com concentração apreciável na água e águas pouco mineralizadas. Podem indicar, também, erro devido ao armazenamento inadequado da amostra; erro na filtração da amostra e erro devido ao uso de dados analíticos secundários obtidos em períodos diferentes, entre outros fatores.

Cerca de 95% das amostras podem ser consideradas de boa qualidade, admitindo-se como critério um coeficiente de erro inferior a 10% para análises aproveitáveis (Tabela 1). Duas amostras apresentaram um erro acima do recomendado, o que pode estar relacionado ao erro analítico.

Tabela 1. Balanço iônico das amostras de águas subterrâneas.

Ponto	Σ Cátions	Σ Ânions	Balanço Iônico (%)	Ponto	Σ Cátions	Σ Ânions	Balanço Iônico (%)
S1	7,1355	6,9132	1,58	S20	6,7133	7,4831	5,42
S2	7,2873	8,4985	7,67	S21	4,717	4,5807	1,47
S3	10,0242	9,2295	4,13	S22	6,36	6,33	0,39
S4	8,0276	7,2523	5,07	M1	5,5233	6,4794	7,97
S5	8,1577	7,9076	1,56	M2	6,9514	6,6455	2,25
S6	7,8745	7,5092	2,37	M3	6,6967	7,572	6,13
S7	6,9942	7,2467	1,77	M4	6,5329	7,0426	3,75
S8	8,0913	8,0499	0,26	M5	8,8005	9,7855	5,3
S9	9,0339	9,3903	1,93	M6	6,04	6,767	5,68
S10	5,1067	4,9945	1,11	M7	11,5678	12,2416	2,83
S11	5,9628	6,7736	6,37	M8	7,547	7,241	2,07
S12	5,226	7,7603	19,52	M9	8,4276	8,4713	0,26
S13	6,6313	5,7893	6,78	M10	6,5274	6,391	1,06
S14	9,4144	12,0833	12,41	M11	5,1946	5,5612	3,41
S15	6,9669	7,6505	4,68	M12	2,8018	3,1705	6,17
S16	16,7368	17,7843	3,03	M13	2,8614	2,7304	2,34
S17	4,443	4,8808	4,7	M14	6,04	6,767	5,68
S18	1,7224	1,8603	3,85	M15	4,9642	4,6307	3,48
S19	3,3121	3,6207	4,45	M16	5,3844	5,5008	1,07

As águas do aquífero Sapucari são predominantemente do tipo I (Ca-Mg-HCO₃), e secundariamente do tipo II (Na-Cl-SO₄), conforme observado no diagrama (Figura 2) triangular de Piper (1944). As amostras S16 e S19 são do tipo II, e encontram-se próximas ao rio Cotinguiba. Já as águas do aquífero Maruim são do tipo I (Ca-Mg-HCO₃) e do tipo IV (Ca-Mg-SO₄-Cl). Esta última, representada pela amostra M11, situada na zona de contato entre os folhelhos do Mb. Taquari da Fm. Riachuelo e os calcarenitos do aquífero Maruim.

A relação iônica predominante de cátions nas águas do Sapucari é $rCa > rNa > rMg$ (26%), e de ânions é $rHCO_3 > rCl > rSO_4$ (74%). Enquanto no Maruim a relação iônica de cátions corresponde a $rCa > rNa > rMg$ (24%), e de ânions $rHCO_3 > Cl > SO_4$ (76%).

A dominância dos íons HCO_3^- tanto no aquífero Sapucari como no Maruim é atribuída à dissolução de carbonatos, refletindo o processo de interação água-rocha. A predominância dos íons Cl^- e Na^+ indicam a influência do rio Cotinguiba, principalmente nos poços S2, S3, S9, S14, S16 (Figura 1). As águas desse rio são do tipo cloretadas sódicas (SILVEIRA, 2014).

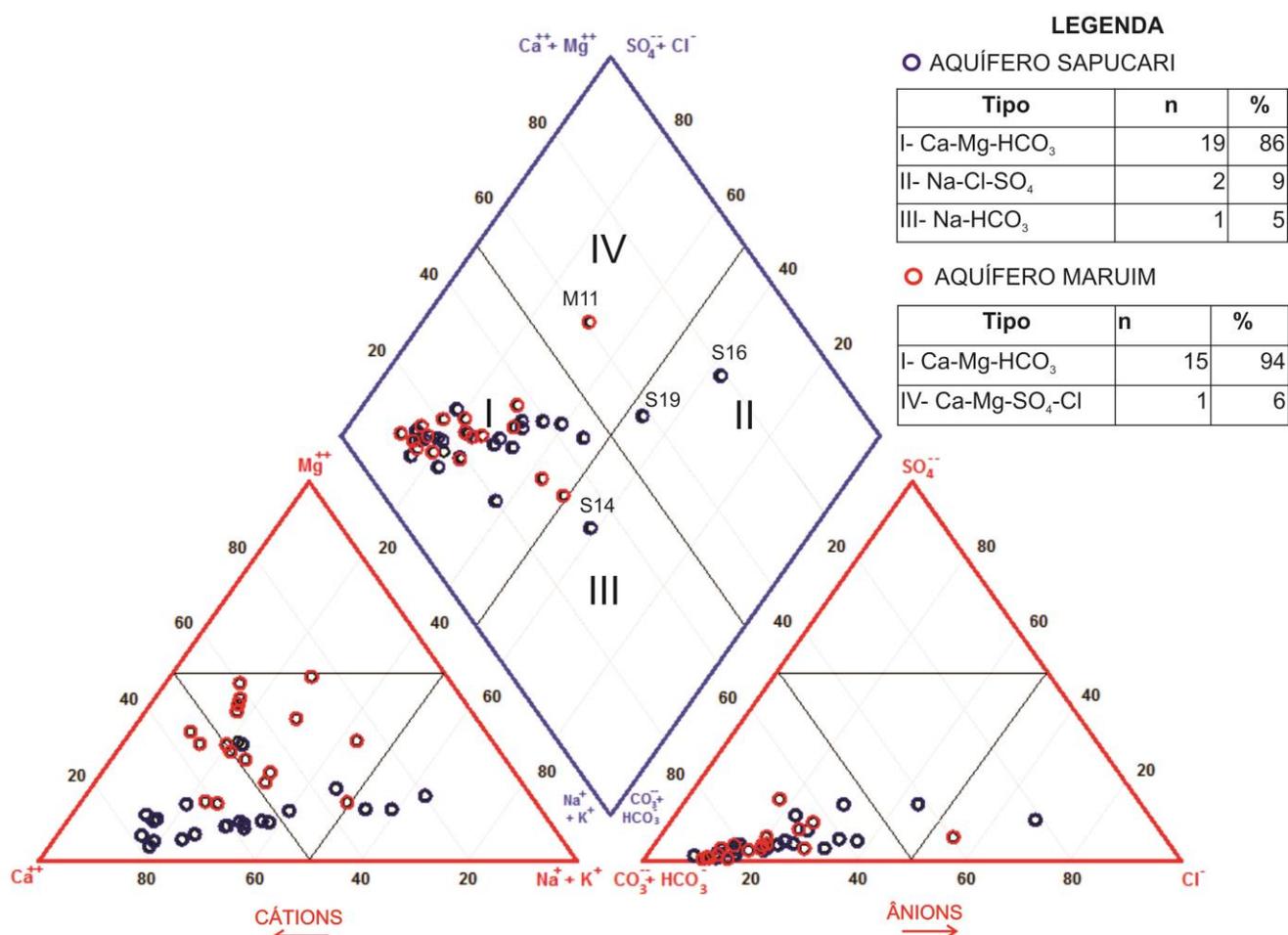


Figura 2. Diagrama Piper (1944) com dados hidroquímicos dos aquíferos Sapucari e Maruim.

Índices hidrogeoquímicos

Os índices hidrogeoquímicos funcionam como indicadores de possíveis mudanças ocorridas na composição da água, em função da interação com os minerais da rocha armazenadora. Esses índices são obtidos através dos constituintes principais em miliequivalente (meq/l) dissolvidos na água subterrânea (NASCIMENTO, 2008).

As razões iônicas funcionam como uma poderosa ferramenta para determinação da origem dos solutos nas águas subterrâneas, para a resposta dos aquíferos cársticos aos eventos hidrológicos e descrição da evolução das águas como resultado da interação água-rocha, responsável pela dissolução dos minerais carbonáticos, intemperismo dos silicatos e processos de trocas iônicas (BHAT; JEELANI; BHAT M., 2014). A Tabela 2 apresenta a mediana das razões iônicas analisadas.

Tabela 2. Razões iônicas.

Ratios	Sapucari (valor da mediana)	Maruim (valor da mediana)
rMg/rNa	0,3	1,5
rNa/rCl	1,2	1,1
rCa/rMg	6	1,6
rMg/rCa	0,16	0,6
rCa/rHCO₃⁻	0,8	0,5
rMg/rHCO₃⁻	0,1	0,4
rMg/rCa+rMg	0,1	0,4

A razão iônica rMg/rNa pode ser explicada pelo aumento do magnésio nas águas do Maruim devido aos níveis com dolomita presentes na sequência estratigráfica desse Membro. O alto valor da razão rNa/rCl pode ser associado à recarga meteórica, que são águas do tipo Cl-Na (CARVALHO JUNIOR, 2005) e influência das águas dos rios Cotinguiba e Sergipe, que são salgadas (12300 mg/l).

A razão Ca/Mg (Figura 3) diminui de acordo com a direção do fluxo SW-NE, em direção à zona de descarga do aquífero Sapucari no rio Cotinguiba. A razão Mg/Ca é maior no aquífero Maruim (Tabela 2), devido aos níveis dolomíticos, e diminui em direção ao fluxo NW-SE no rio Sergipe.

As razões Ca/HCO_3^- e Mg/HCO_3^- explicam a influência do processo de interação água-rocha em ambos os aquíferos, com maiores razões de Ca/HCO_3^- no aquífero Sapucari, o que sugere maior tendência à dissolução de minerais calcita ou dolomita. A razão Mg/HCO_3^- é maior no aquífero Maruim, ocasionada pela presença de níveis dolomíticos no Maruim. A razão $r\text{Mg}/r\text{Ca}+r\text{Mg}$ maior no aquífero Maruim também pode ser explicada pela presença desses níveis.

Associação entre parâmetros hidroquímicos

As Tabelas 3 e 4 mostram as correlações entre os parâmetros selecionados, que apresentam coeficientes de Spearman superiores a $r_s = 0,6$. Nas amostras do aquífero Sapucari, observam-se boas correlações do STD com o sódio ($r_s = 0,86$), cloretos ($r_s = 0,72$), sulfatos ($r_s = 0,55$) e bicarbonatos ($r_s = 0,58$).

Tabela 3. Matriz de correlação de Spearman dos parâmetros físico-químicos analisados do aquífero Sapucari.

	STD	Na+	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl-	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K+	Fe	pH	Dureza Total	CE
STD	1,00	0,86	0,43	0,21	0,72	0,55	0,58	0,42	-0,24	-0,38	0,48	0,91
Na+		1,00	0,31	0,06	0,90	0,79	0,35	0,39	-0,31	-0,14	0,27	0,76
Ca ⁺⁺			1,00	-0,20	0,24	-0,05	0,43	0,00	-0,34	-0,38	0,72	0,55
Mg ⁺⁺				1,00	0,10	-0,02	0,40	0,53	0,50	0,19	0,43	0,21
Cl-					1,00	0,76	0,18	0,48	-0,23	0,01	0,19	0,60
SO ₄ ²⁻						1,00	0,00	0,20	-0,22	0,16	-0,14	0,37
HCO ₃ ⁻							1,00	0,33	0,13	-0,37	0,63	0,64
K+								1,00	0,10	-0,03	0,29	0,37
Fe									1,00	0,33	0,06	-0,26
pH										1,00	-0,18	-0,45
Dureza Total											1,00	0,55
CE												1,00

Intervalo de confiança (IC)=95%; α (nível de significância) =0,05.

Tabela 4. Matriz de correlação de Spearman dos parâmetros físico-químicos analisados do aquífero Maruim.

	STD	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Fe	pH	Dureza Total	CE
STD	1,00	0,67	0,60	0,27	0,54	0,38	0,78	0,21	0,21	-0,58	0,60	0,97
Na ⁺		1,00	0,49	-0,22	0,91	0,75	0,52	0,42	0,09	-0,10	0,25	0,61
Ca ⁺⁺			1,00	-0,14	0,37	0,10	0,62	0,23	0,46	-0,06	0,74	0,63
Mg ⁺⁺				1,00	-0,19	-0,33	0,43	0,02	0,19	-0,28	0,42	0,26
Cl ⁻					1,00	0,79	0,31	0,41	-0,10	0,00	0,09	0,44
SO ₄ ²⁻						1,00	0,12	0,04	-0,10	0,03	-0,18	0,23
HCO ₃ ⁻							1,00	0,20	0,54	-0,28	0,86	0,84
K ⁺								1,00	0,07	-0,25	0,11	0,21
Fe									1,00	0,10	0,47	0,28
pH										1,00	-0,16	-0,55
Dureza Total											1,00	0,67
CE												1,00

Intervalo de confiança (IC)=95% ; α (nível de significância)=0,05.

A alta correlação do STD com o sódio e cloretos indicam influência dos rios Cotinguiba e Sergipe, devido à proximidade dos poços, constituindo fator significativo no processo de salinização das águas subterrâneas.

Segundo Feitosa et al (1998, p. 45), a influência das marés remonta rios acima até, pelo menos, o povoado Pedra Branca, no Município de Laranjeiras, e situações de risco podem surgir em presença de poços nas proximidades desses rios, extraindo descargas muito elevadas e capazes de induzir fluxo a partir dos mesmos.

O cálcio apresenta alta correlação com a dureza total (Tabela 4) e, conforme Santos (2000), sais de cálcio possuem elevada solubilidade, sendo comum precipitar como carbonato de cálcio (CaCO₃), o principal responsável pela dureza da água. Nas amostras de água do aquífero Maruim (Tabela 4), observam-se correlações altas entre o STD e o sódio ($r_s=0,67$) e bicarbonato ($r_s=0,78$). Outras boas correlações são observadas entre o sódio e o cloreto ($r_s=0,9$) e sulfato ($r_s=0,75$).

A análise da regressão linear múltipla entre a CE (variável dependente) e Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ e CaCO₃ (variáveis independentes) mostra que as maiores contribuições na salinização

das águas do Sapucari estão associadas aos parâmetros Na^+ , Cl^- e HCO_3^- . Assim, a salinização das águas do aquífero Sapucari pode ser atribuída à mistura das águas do rio com as águas subterrâneas (Figura 4) e ao processo de interação água-rocha. As amostras S3 e S9 encontram-se próximas às drenagens dos rios Sergipe e Cotinguiba.

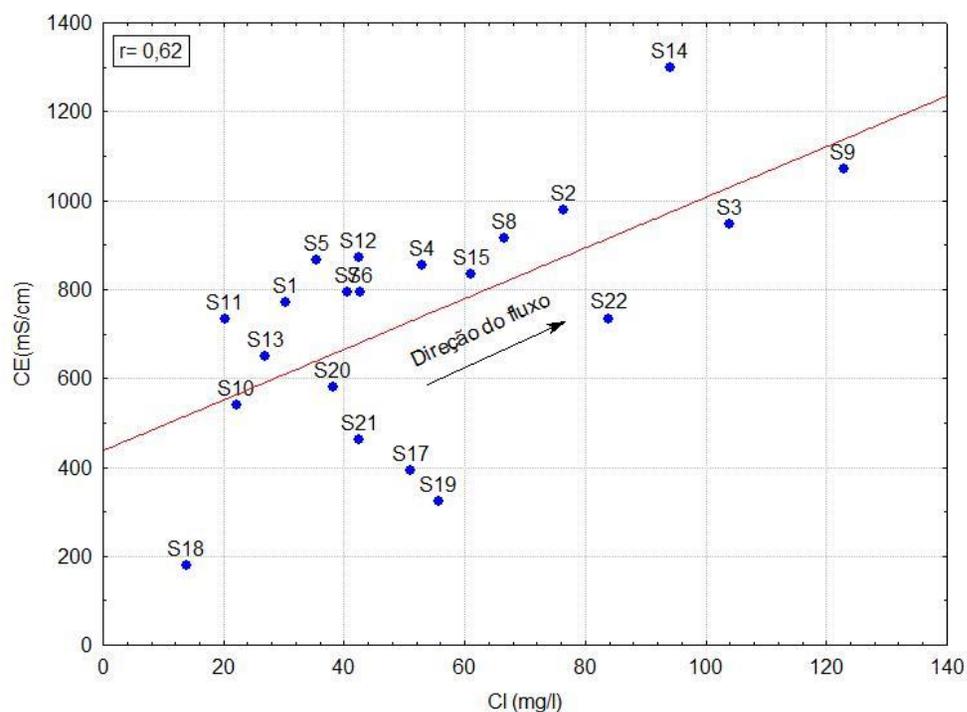


Figura 4. Correlação entre os parâmetros CE e Cl^- do aquífero Sapucari, com indicação do direcionamento do fluxo para a zona de descarga no rio Cotinguiba.

Enquanto no aquífero Marum, as maiores contribuições na análise da regressão linear múltipla entre a CE (variável dependente) e Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- e CaCO_3 (variáveis independentes) são do Na^+ , Ca^{2+} e HCO_3^- . Tal ocorrência sugere a predominância do processo de interação água-rocha. Segundo Singhal e Gupta (2010), onde as rochas carbonáticas estão intercaladas com folhelhos e outras de baixa permeabilidade, pode haver o desenvolvimento de águas do tipo $\text{Na}-\text{HCO}_3^-$ devido às trocas iônicas e ao tempo de residência.

Índices de saturação

Os índices de saturação indicam se a solução está em equilíbrio, insaturada ou supersaturada em relação a uma fase sólida (mineral). As amostras com índices de saturação abaixo de $-0,05$ indicam solução insaturada, favorecendo a dissolução do mineral. Se o respectivo índice excede $+0,05$, a água está supersaturada em relação ao mineral, favorecendo a sua precipitação (J.MERKEL; PLANER-FRIEDRICH, 2008). Já os índices de saturação igual a 0 sugerem o perfeito estado de equilíbrio entre a água e o mineral em solução.

Os gráficos das Figuras 5 e 6 apresentam a distribuição dos índices de saturação das amostras dos aquíferos Sapucari e Maruim, ambos os aquíferos apresentam tendência à saturação e à supersaturação em calcita e dolomita.

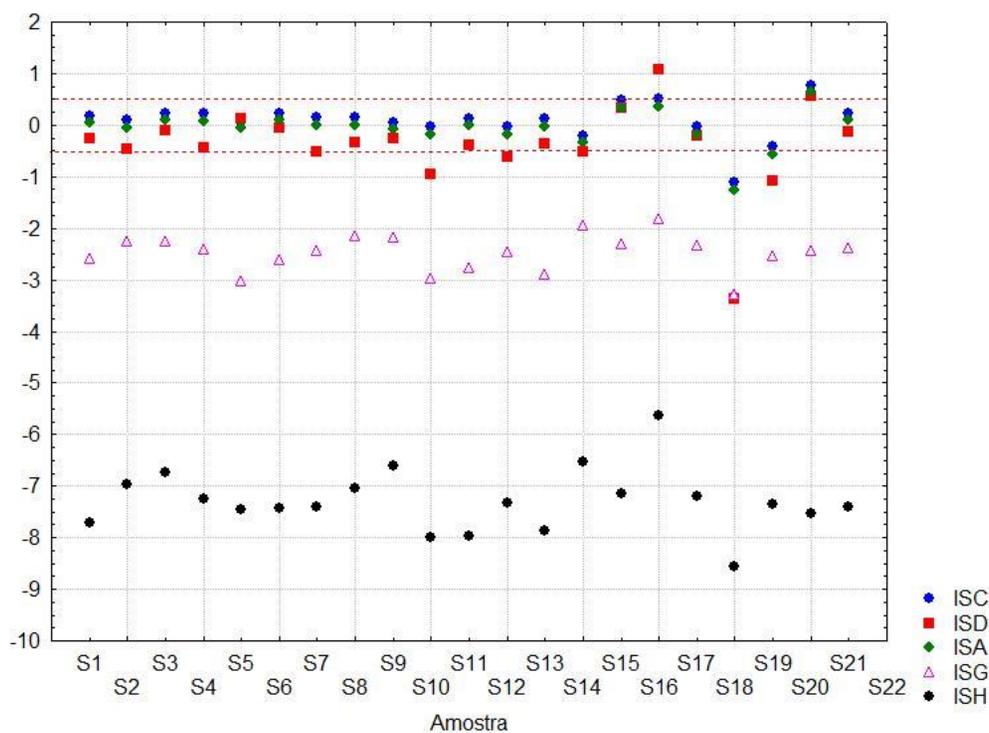


Figura 5. Índices de saturação dos minerais calcita (ISC), dolomita (ISD), aragonita (ISA), gipsita (ISG) e halita (ISH) das amostras de água subterrânea do aquífero Sapucari.

Os índices de saturação das amostras de água subterrânea do aquífero Maruim (Figura 6) mostram um relativo aumento dos índices comparado aos do Sapucari, com tendência para supersaturação dos minerais calcita, dolomita e aragonita, com destaque para a dolomita.

É importante destacar que a supersaturação não é automaticamente equivalente à precipitação, pois se a cinética de precipitação é lenta, as soluções podem permanecer supersaturadas em relação às fases minerais por longos períodos (J.MERKEL; PLANER-FRIEDRICH, 2008). Esse aumento está relacionado à presença dos níveis dolomíticos do Maruim.

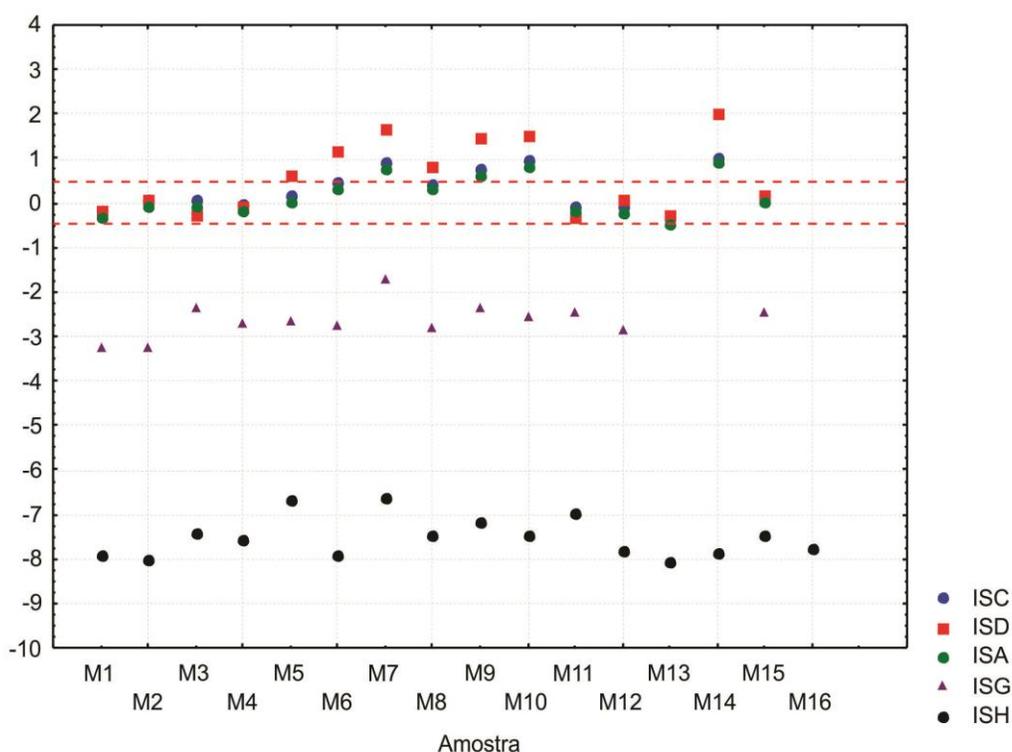


Figura 6. Índices de saturação dos minerais calcita (ISC), dolomita (ISD), aragonita (ISA), gipsita (ISG) e halita (ISH) das amostras de água subterrânea do aquífero Maruim.

Os índices de saturação com tendência à dissolução de calcita e dolomita são observados nas zonas de ocorrências de dolinas e cavernas no setor SW-NE (Figura 7). Tais configurações, analisadas a partir da modelagem hidrogeoquímica, sugerem uma recarga direta e um tempo de residência menor

da água neste setor. A zona de descarga do Sapucari, situada na fonte do Ibura, apresenta índices de saturação semelhantes às amostras deste aquífero com valores de $IS_{\text{Calcita}} = 0,01$ e $IS_{\text{Dolomita}} = -0,5$.

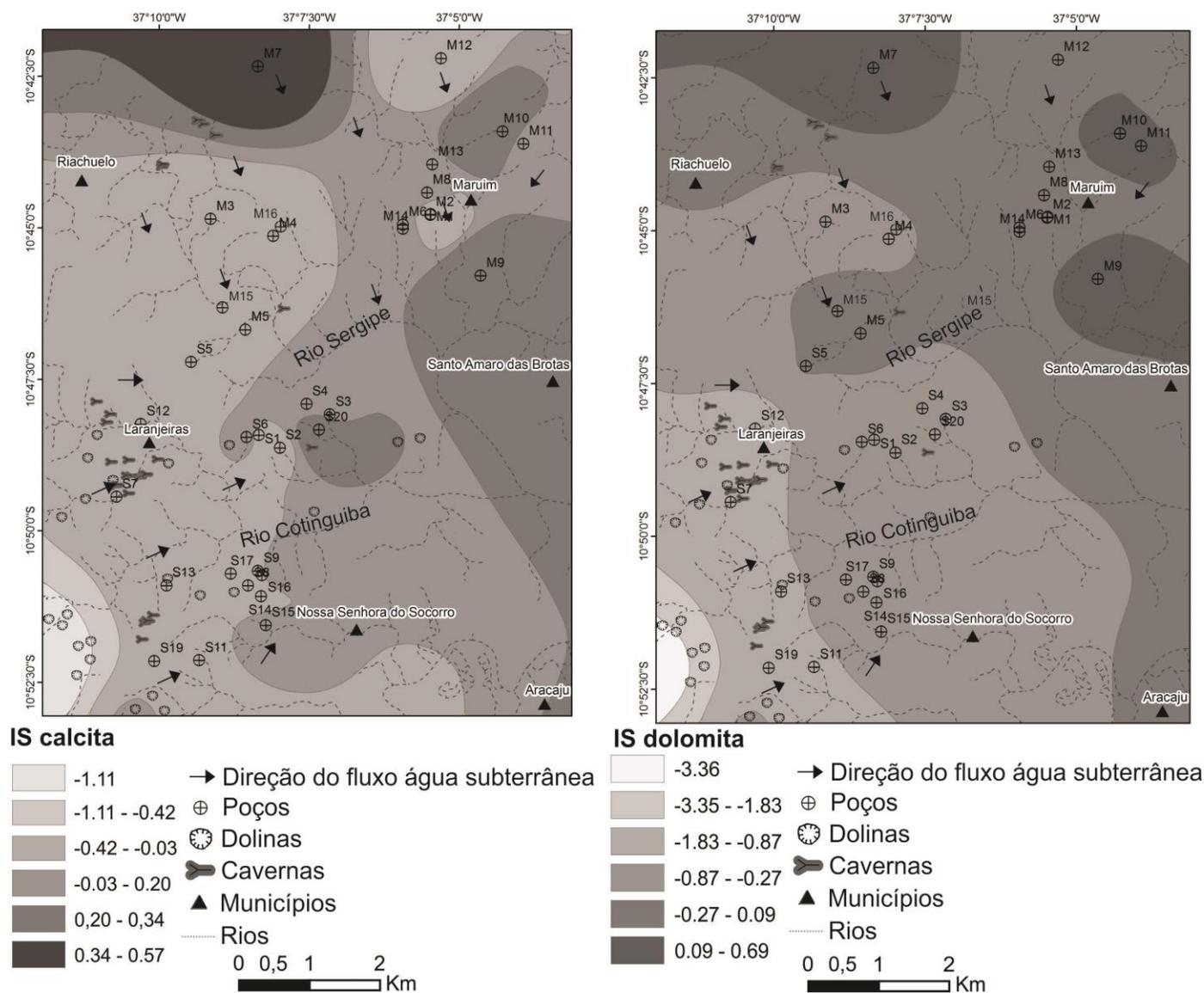


Figura 7. Índices de saturação em calcita e dolomita da área estudada destacando-se as zonas com maior potencial de dissolução de calcita e dolomita.

O aumento do índice de saturação em calcita quando comparado com a profundidade nos poços S15, S16 e S20 do aquífero Sapucari (Figura 8), mostram que o maior potencial de precipitação encontra-se entre 110 e 160 m. Carvalho Junior (2005), ao observar a tendência de valores positivos de saturação em calcita, atribuiu este comportamento a um sistema cárstico mais desenvolvido no Sapucari, com rotas de fluxo mais profundas e tempos de residência maiores.

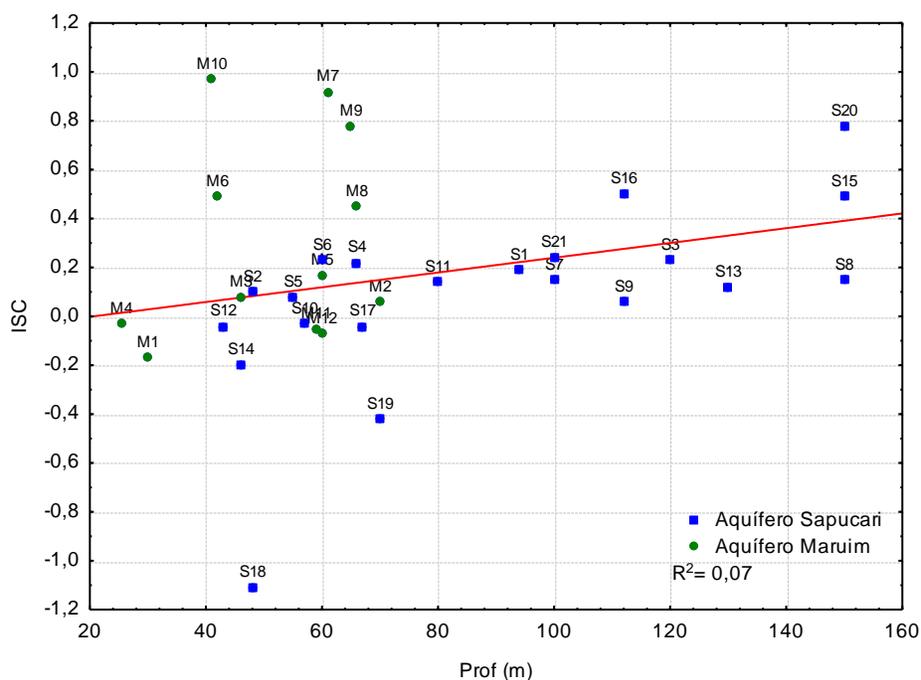


Figura 8. Distribuição da profundidade versus índice de saturação em calcita.

Qualidade das águas subterrâneas para o abastecimento humano e irrigação

A avaliação da qualidade das águas subterrâneas, a partir dos parâmetros analisados, utilizou como referência os valores máximos permitidos estabelecidos pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011) e pela Resolução CONAMA nº 396/2008 (BRASIL, 2008).

De um modo geral, das 23 variáveis analisadas (Tabela 5), apenas o cobre, os óleos e as graxas não foram detectados no aquífero Maruim, uma vez que seus valores se encontravam abaixo do limite inferior de detecção do método aplicado.

As amostras S13, S14, S15 e M5 apresentam níveis de chumbo acima do permitido pela Resolução nº 396 do CONAMA. Os poços ficam próximos à BR-101, o que sugere o forte tráfego rodoviário como fonte potencial de contaminação. Segundo Turer & Maynard (2003), o chumbo originado do tráfego rodoviário pode chegar aos solos após um evento de precipitação, por meio do escoamento superficial e/ou da deposição atmosférica.

Tabela 5. Valores mínimos e máximos e valores máximos permitidos pela Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde e pela Resolução CONAMA nº 396/2008.

Parâmetros Físico-Químico	Unidade	Valor Mínimo		Valor Máximo		Valor Máximo Permitido (VMP)
		Sapucari	Maruim	Sapucari	Maruim	
pH	-	6,6	6,9	7,9	8,16	*
Turbidez	uT	0,0	0,1	6,8	0,2	5
Dureza Total	mg/l	70,8	99,27	342,4	318,9	500
STD	mg/l	176,4	211,6	1206,4	763,20	1000
Condutividade Elétrica	µS/cm	178,7	244,62	1601,5	1134	*
OD	mg/l	4,4	4,0	8,2	6,7	*
Cálcio	mg/l	21,6	14,4	115,8	81,76	*
Magnésio	mg/l	0,9	12,6	35,5	34,2	*
Sódio	mg/l	6,9	15,9	235,0	130,1	200
Potássio	mg/l	0,4	0,8	11,3	19,55	*
Bicarbonato	mg/l	85,4	122,7	484,8	497	*
Cloretos	mg/l	13,8	18,8	424,5	107,1	250
Sulfatos	mg/l	3,3	2,3	94,6	97,5	250
Nitrato	mg/l	0,3	1,7	4,8	3,9	10
Fosfato	mg/l	0,05	0,040	0,1	0,040	*
Ferro	mg/l	0,030	0,0	0,6	2,6	0,3
Fluoreto Total	mg/l	0,100	0,090	0,420	0,180	1,5
Cobre	mg/l	0,002	-	0,020	-	2
Chumbo	mg/l	0,010	0,010	0,040	0,020	0,01
Zinco	mg/l	0,010	0,010	0,040	0,020	5
Alumínio	mg/l	0,02	0,02	0,03	0,02	0,2
Eh	mV	-44,0	166,0	310,0	303,0	*
Óleos e Graxas	mg/l	5,2	-	5,8	-	*

*Sem valor máximo permitido.

Dois poços localizados em postos de combustíveis apresentaram contaminação por óleos e graxas, como o S12 com 5,2 mg/l, e o S14 com 5,8 mg/l. Esse último apresentou um Eh negativo, caracterizando um ambiente redutor.

A dureza (CaCO_3) é definida como a capacidade da água de neutralizar o sabão pelo efeito do cálcio ou magnésio ou outros elementos (SANTOS, 2008). Águas duras podem gerar incrustações nas tubulações.

As amostras dos aquíferos Sapucari e Maruim apresentam águas do tipo mole (0-100 mg/l de CaCO_3), intermediária (100-200 mg/l de CaCO_3), e dura (maior que 200 mg/l de CaCO_3), segundo a classificação de Logan (1965). Verifica-se que 70% das águas do Sapucari são duras, 23% intermediárias e 7% moles; quanto às águas do Maruim, 78% são duras, 12% intermediárias e 10% moles.

A classificação das águas subterrâneas para a irrigação foi obtida através do Diagrama de Lemoine (1954), aplicado pelo U. S. Salinity Laboratory (USSL), em Riverside, CA. Esse diagrama utiliza os parâmetros referentes à razão de adsorção de sódio (RAS) e à condutividade elétrica.

As classes são definidas pelo risco de Sódio (classes- S) e o risco de Salinização (classes- C). A razão de adsorção de sódio é dada pela equação 5:

Equação 5:

$$RAS = \frac{rNa}{\sqrt{\frac{(rCa + rMg)}{2}}}$$

Os valores de condutividade elétrica foram obtidos no campo e nos relatórios de poços. A classificação abrange várias categorias quanto à salinidade e ao risco de sódio. O risco de salinização dos solos pelas águas do Sapucari (Figura 9) é predominantemente alto para 62% das amostras analisadas, 34% de médio risco e 4% de baixo risco. O risco de salinização dos solos pelas águas do

aquífero Maruim (Figura 10) é predominante médio para 65% das amostras, 30% de alto risco e 5% de baixo risco.

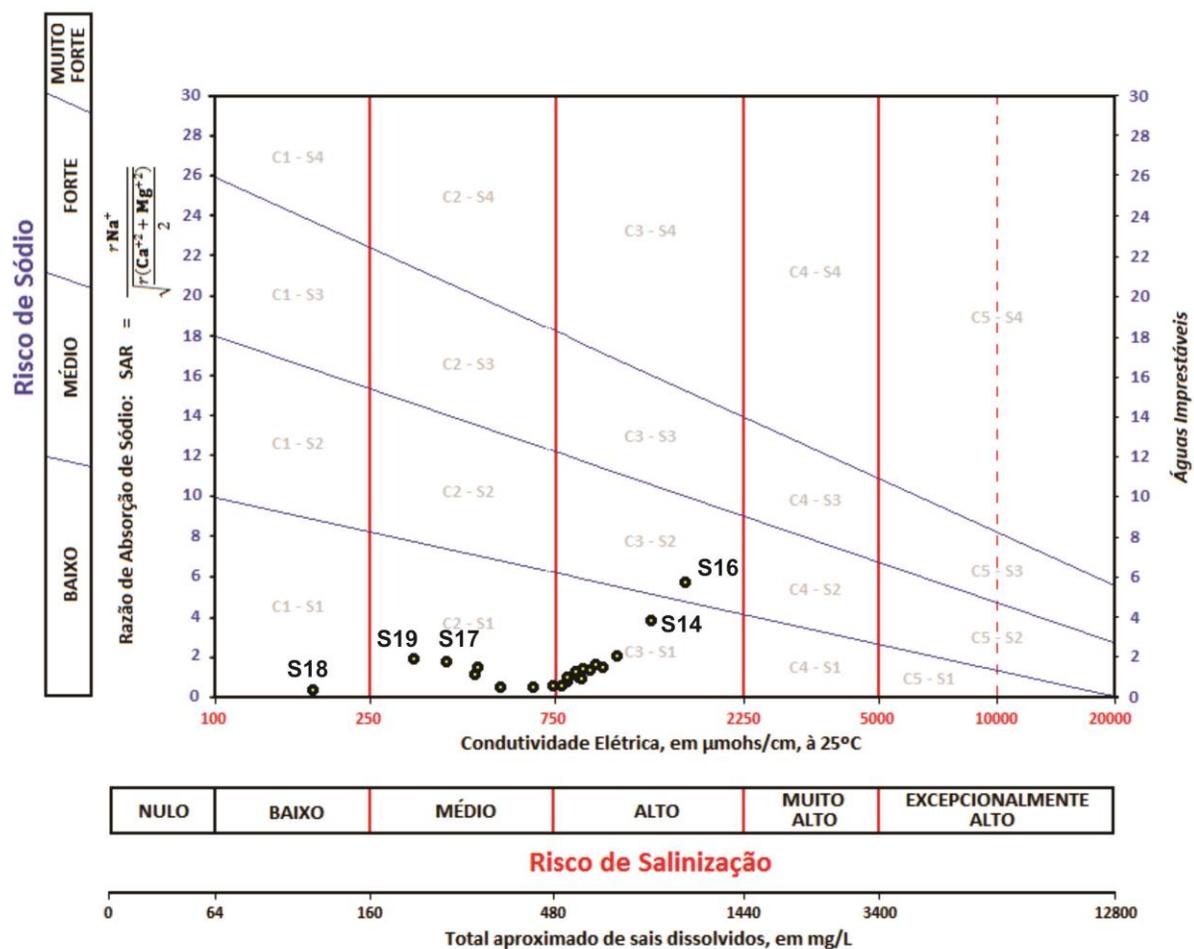


Figura 9. Diagrama de Lemoine (U.S.S.L., 1954) para as águas subterrâneas do aquífero Sapucari.

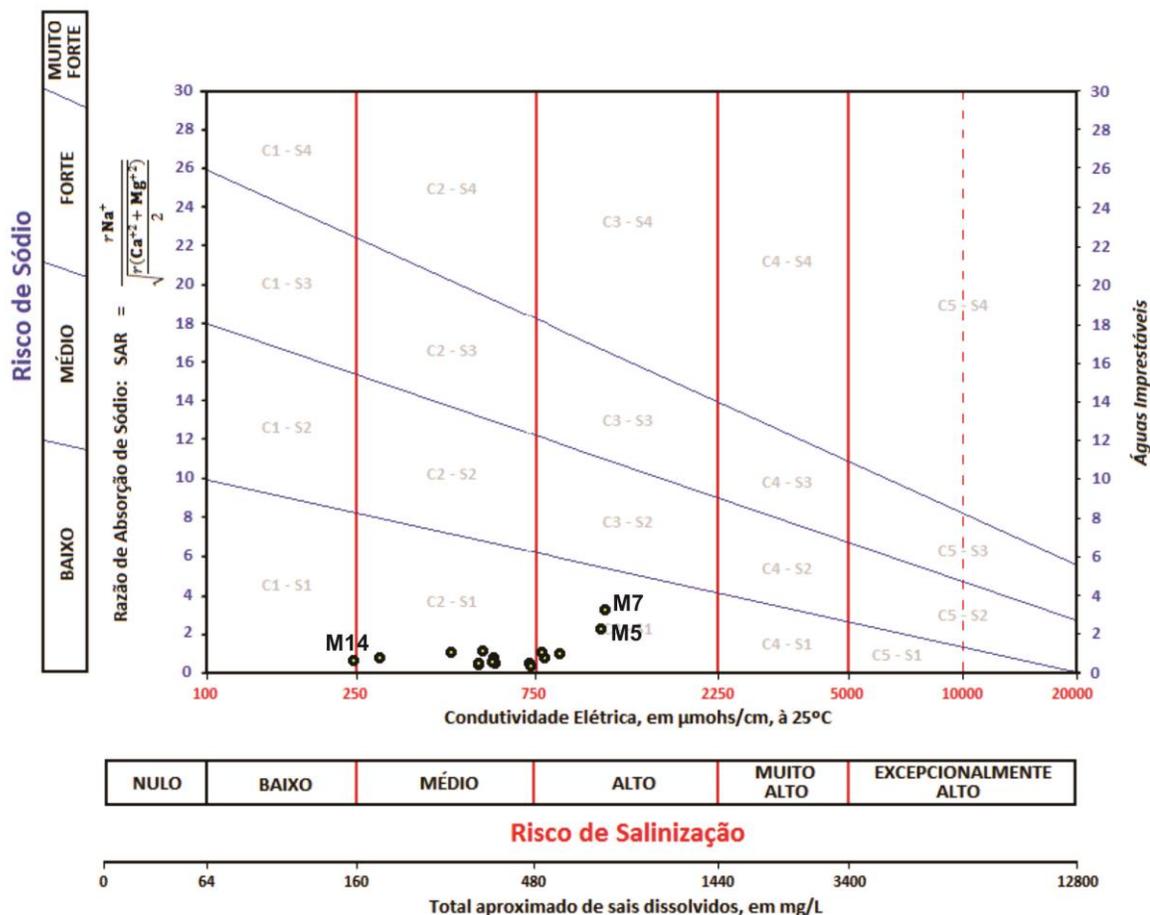


Figura 10. Diagrama de Lemoine (U.S.S.L., 1954) para as águas subterrâneas do aquífero Maruim.

Análise estatística dos componentes principais (ACP)

Para caracterizar as águas subterrâneas dos aquíferos Sapucari e Maruim, aplicou-se a técnica de análise multivariada, nomeada de análise em componentes principais (ACP ou PCA). Essa técnica permite identificar a partir de um conjunto de variáveis aquelas que mais contribuem para explicar a variação dos dados.

As componentes principais representam uma combinação de variáveis, onde a primeira componente é a mais importante, pois explica a maior parte da variabilidade dos dados. Assim, se as variáveis primárias apresentam forte correlação, o número de componentes principais que

expliquem a variabilidade é reduzido, caso contrário essa redução é pouco significativa (GOMES, 2013).

A geoquímica das águas dos aquíferos Sapucari e Maruim é o resultado da dissolução das litologias carbonáticas, das recargas das águas meteóricas e da influência dos rios Sergipe e Cotinguiba. A análise foi aplicada para diferenciar, através de duas componentes principais, as contribuições das variáveis definidas (Tabela 6).

Tabela 6. Matriz das Principais Componentes (PCA) dos aquíferos Sapucari e Maruim.

SAPUCARI				MARUIM			
Variáveis	PC1	PC2	PC3	Variáveis	PC1	PC2	PC3
Na ⁺	0,97	-0,18	0,11	Na ⁺	0,74	0,64	0,06
K ⁺	0,93	-0,18	-0,20	K ⁺	0,20	-0,44	-0,46
Ca ²⁺	0,08	0,89	-0,35	Ca ²⁺	0,76	-0,23	-0,25
Mg ²⁺	0,85	0,08	-0,05	Mg ²⁺	0,47	-0,52	0,21
Cl ⁻	0,94	-0,23	-0,15	Cl ⁻	0,42	0,53	0,37
HCO ₃ ⁻	0,24	0,86	0,27	HCO ₃ ⁻	0,92	-0,26	-0,03
Dureza	0,43	0,82	-0,33	Dureza	0,82	-0,45	-0,14
SO ₄ ²⁻	0,84	-0,38	0,30	SO ₄ ²⁻	0,56	0,73	-0,16
CE	0,88	0,39	0,16	CE	0,93	0,08	0,30
pH	0,25	-0,68	-0,43	pH	-0,28	0,42	-0,46
Fe	0,09	0,07	0,94	Fe	0,24	0,21	-0,80

As 11 variáveis analisadas são: pH, condutividade elétrica (CE), dureza, magnésio, sódio, bicarbonato, cloreto, ferro, potássio, cálcio e sulfatos. Os resultados explicam 89,9% do total da variância amostral para o Sapucari e 75,7% para o Maruim.

A PC1 do aquífero Sapucari apresenta forte associação (positiva) entre as variáveis: condutividade elétrica, sódio, potássio, magnésio, cloretos e sulfatos. As variáveis CE, Mg²⁺, Cl⁻, Na⁺ e K⁺ apresentam contribuições similares, pois possuem vetores de maior comprimento e mais próximos do eixo da PC1 (Figura 11). A forte correlação entre o Ca²⁺ e CaCO₃ na PC2 (Figura 11) explicam a dureza das águas do Sapucari e o processo de interação água-rocha.

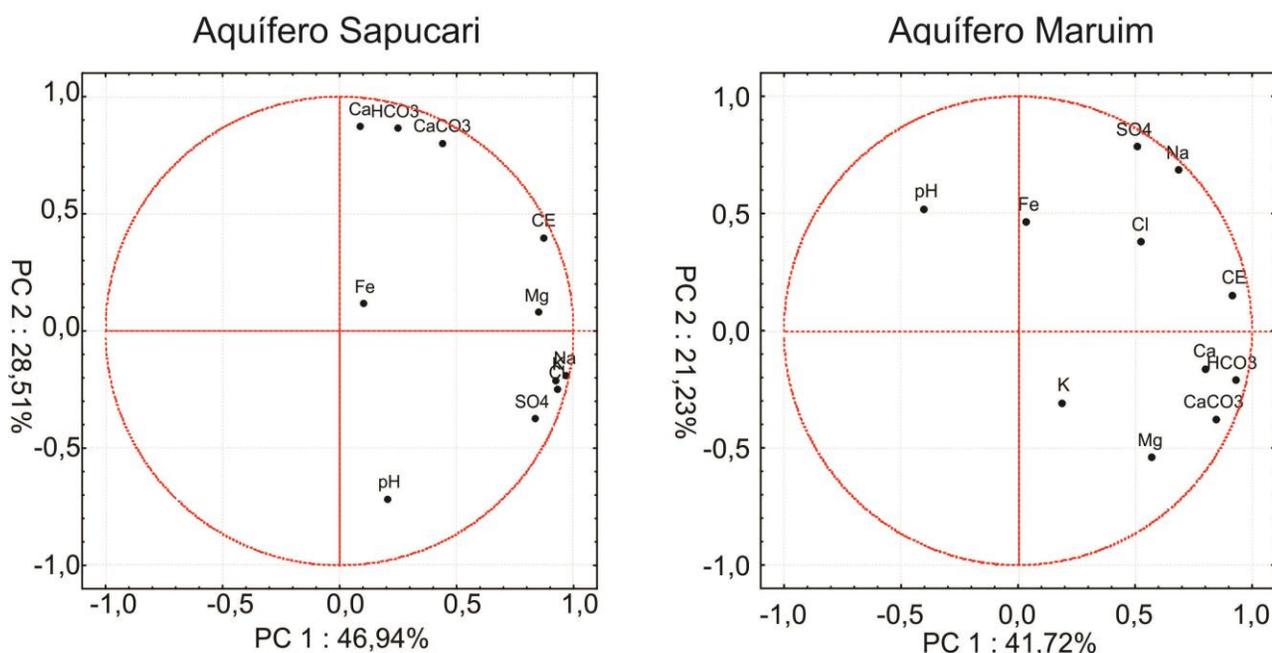


Figura 11. *Loadings* das duas primeiras componentes principais dos aquíferos Sapucari e Maruim.

O cálcio e o bicarbonato apresentam boas contribuições na PC1 do aquífero Maruim. Nas águas desse aquífero a dureza é explicada pela correlação entre Ca e CaCO₃ e Mg e CaCO₃ (Figura 11). O pH contribui pouco para a formação das PCs, tanto no Sapucari como no Maruim.

As variáveis CE e HCO₃⁻ apresentam contribuições semelhantes, uma vez que apontam vetores de maior comprimento e mais próximos do eixo da PC1 do aquífero Maruim. Observam-se altas correlações entre as variáveis Ca²⁺ e HCO₃⁻, Mg²⁺ e CaCO₃, e SO₄²⁻ e Na⁺, pois formam ângulos agudos entre si.

Origem das águas subterrâneas

O estudo da origem das águas subterrâneas foi realizado através de isótopos naturais de deutério δD (‰), oxigênio $\delta^{18}O$ (‰) e carbono inorgânico dissolvido $\delta^{13}C_{CID}$ (‰). Os valores de deutério δD (‰) variam de -3,8 a 4,23, enquanto que os de oxigênio $\delta^{18}O$ (‰) variam de -3,2 a -0,5 no aquífero Sapucari (Tabela 7).

Já no Maruim os valores de deutério δD (‰) variam de -3,7 a 1,5, ao passo que os de oxigênio δO^{18} (‰) variam de -2,6 a -1,1 (Tabela 7). O $\delta^{13}C_{CID}$ (‰) apresenta variação de -13,7 a -10,76 no Sapucari e de -13,36 a -10,98 no Maruim. Os rios apresentam valores isotópicos de $\delta^{18}O$ (‰), entre 0,87 (rio Cotinguiba) e 0,75 (rio Sergipe), e δD (‰), entre 2,9 (rio Cotinguiba) e 8,0 (rio Sergipe).

Tabela 7. Valores dos isótopos de deutério δD (‰), oxigênio $\delta^{18}O$ (‰) e carbono inorgânico dissolvido $\delta^{13}C_{CID}$ (‰) das amostras analisadas dos aquíferos Sapucari e Maruim.

	δD (‰)		$\delta^{18}O$ (‰)		$\delta^{13}C$ (‰)	
	Sapucari	Maruim	Sapucari	Maruim	Sapucari	Maruim
No. de amostras	15	5	15	5	15	5
Mínimo	-3,898	-3,694	-3,240	-2,638	-13,7	-13,36
Máximo	4,230	1,540	-0,527	-1,127	-10,76	-10,98
1° Quartil	-2,471	-3,170	-2,267	-2,628	-13,025	-12,56
Mediana	-2,057	-1,973	-1,653	-2,259	-12,64	-12,05
3° Quartil	1,392	-1,584	-1,463	-1,840	-12,065	-11,32
Média	-0,876	-1,776	-1,793	-2,098	-12,513	-12,054

A Figura 12 apresenta a correlação entre os isótopos de deutério δD (‰) e oxigênio $\delta^{18}O$ (‰) para 20 amostras. Os desvios isotópicos em relação à LMG são, em geral, atribuídos à evaporação durante a recarga ou a reações de trocas isotópicas e mistura de águas de diferentes fontes. Nesta mesma figura é apresentada a regressão linear, com coeficiente angular de 2,9, menor que o da linha meteórica global (LMG), o que pode ser associado à proximidade das fontes de evaporação, ou seja, os rios e o oceano.

As Figuras 13 e 14 apresentam a distribuição das amostras *versus* os isótopos de $\delta^{18}\text{O}$ (‰) e δD (‰). Observa-se um enriquecimento isotópico de acordo com o direcionamento do fluxo (NW-SE e SW-NE), o que indica o aumento dos valores de oxigênio e deutério conforme a proximidade das zonas de descarga dos aquíferos nos rios Sergipe e Cotinguiba.

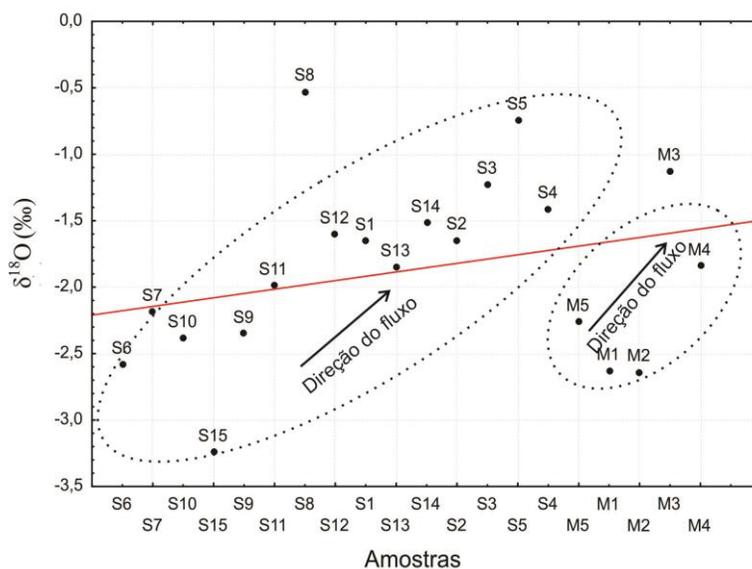


Figura 13. Distribuição das amostras de águas subterrâneas de acordo com o $\delta^{18}\text{O}$ (‰), com indicação do direcionamento do fluxo subterrâneo na área de estudo.

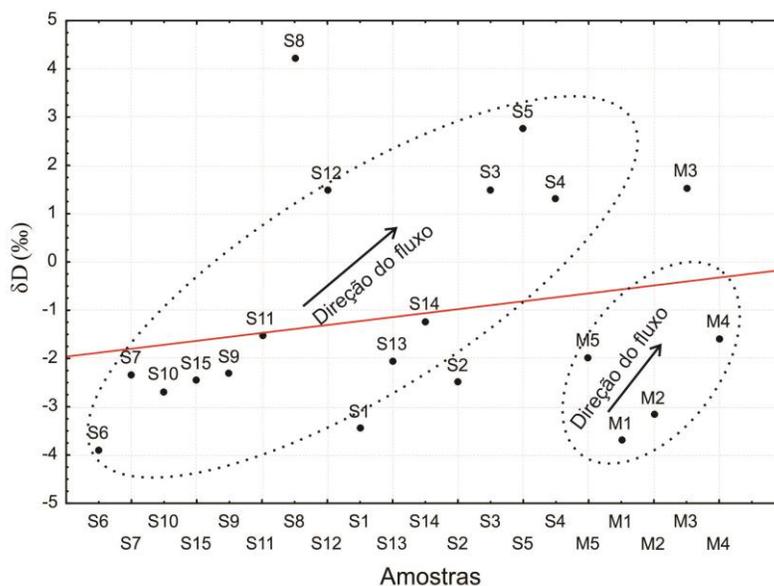


Figura 14. Distribuição das amostras de águas subterrâneas de acordo com o δD (‰), com indicação do direcionamento do fluxo subterrâneo na área de estudo.

A partir da equação da linha meteórica global, Dansgaard (1964) estabeleceu o excesso de deutério ($d = \delta D - 8 * \delta^{18}O$) para determinar o desvio na reta meteórica. O excesso de deutério (d) contém informações sobre as condições meteorológicas e sobre a distância das fontes evaporativas (ARMENGAUD et al., 1998). O valor médio de d para as águas meteóricas é, geralmente, próximo a 10 (TELES, 2014). Valores superiores indicam excesso de deutério.

Segundo Dansgaard (1964), os fatores que controlam o empobrecimento são: o efeito da altitude, distância da costa (quanto mais afastada da fonte de evaporação, mais empobrecidos serão os valores isotópicos) e efeito da latitude. O d varia de 8,44 a 23,43 para o Sapucari e de 10,5 a 17,9 para o aquífero Maruim. Na Figura 15 é possível identificar dois grupos de águas, um referente à recarga dos aquíferos por água meteórica e outro pela mistura de águas dos rios com as águas do aquífero.

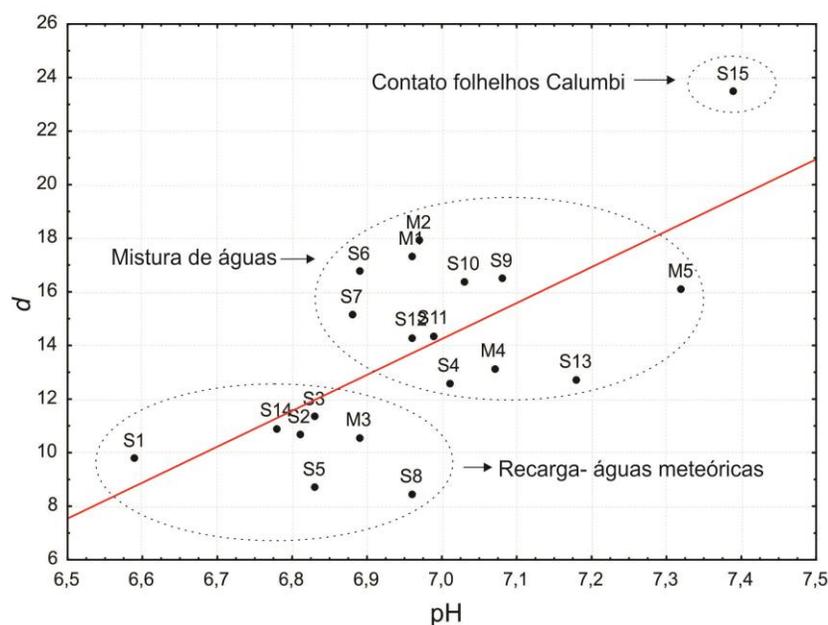


Figura 15. Distribuição do pH *versus* excesso de deutério (d) das amostras analisadas.

A amostra S15 destaca-se com maiores valores de d e pH, pois encontra-se numa zona com intercalações entre os folhelhos e argilas da Formação Calumbi e calcilitos do Membro Sapucari, da

Formação Cotinguiba, indicando uma possível troca isotópica em subsuperfície que altera o valor do δD (‰) em relação ao $\delta^{18}O$ (‰).

Segundo Sacks (1996), os processos que afetam a composição isotópica de $\delta^{13}C$ (‰) incluem a dissolução e a precipitação de minerais, a decomposição de matéria orgânica e a mistura de águas. Os valores de $\delta^{13}C$ (‰) variam de -13,7 a -10,76 para as amostras do Sapucari, e de -13,36 a -10,98 para o Maruim. Esses valores sugerem a contribuição do intemperismo de carbonato por $H_2CO_3^-$ e a decomposição da matéria orgânica presente no solo.

CONCLUSÕES

A aplicação de ferramentas hidrogeoquímicas permitiu classificar as águas do Sapucari e Maruim como predominantemente bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas (Ca- HCO_3^- e Ca-Mg- HCO_3^-). A dominância dos íons Ca^{++} e HCO_3^- nas águas é atribuída à dissolução de carbonatos, refletindo o processo de interação água-rocha.

Os índices hidrogeoquímicos definidos como a razão rNa/rCl indicam que os altos teores de Na e Cl estão associados à recarga meteórica, o que, em situação de proximidade do mar, pode elevar a razão Na/Cl, e à influência dos rios Sergipe e Cotinguiba, que são salgados. Outras razões como Ca/HCO_3^- , Mg/HCO_3^- , Cl/HCO_3^- e Na/HCO_3^- estão relacionadas ao processo de interação água-rocha em ambos os aquíferos, como a ocorrência de camadas dolomíticas do Membro Maruim.

A alta correlação do STD com o sódio e cloretos pode ser explicada pela mistura de águas, devido à proximidade dos poços aos rios Sergipe e Cotinguiba, constituindo um fator significativo no processo de salinização das águas subterrâneas, principalmente no aquífero Sapucari.

Na modelagem geoquímica realizada a partir dos índices de saturação, as amostras do Sapucari apresentam tendência à dissolução de calcita e dolomita nas zonas de ocorrências de dolinas e cavernas no setor SW-NE. Tais configurações sugerem que as recargas diretas de águas meteóricas e menor

tempo de residência ocorrem nesse setor. O maior potencial de precipitação em calcita encontra-se nas profundidades entre 110 e 160 m, indicando tempo de residência maior da água nesse nível estratigráfico, com rotas de fluxos mais profundas.

O risco de salinização dos solos pelas águas do Sapucari é predominantemente alto para 62% das amostras analisadas, 34% de médio risco e 4% de baixo risco. O risco de salinização dos solos pelas águas do aquífero Maruim é predominantemente médio para 65% das amostras, 30% de alto risco e 5% de baixo risco.

A PC1 do aquífero Sapucari apresenta forte associação (positiva) entre as variáveis: condutividade elétrica, sódio, potássio, magnésio, cloretos e sulfatos. Isso sugere uma maior influência das águas dos rios Cotinguiba e Sergipe, e a interação água-rocha no processo de salinização das águas do Sapucari. O cálcio e o bicarbonato apresentam boas contribuições na PC1 do aquífero Maruim, indicando uma predominância do processo de dissolução de carbonatos na salinização das águas subterrâneas.

Na investigação isotópica, observa-se um forte desvio em relação à Linha Meteorica Global. O enriquecimento isotópico pode ser explicado tanto pela proximidade da fonte de evaporação, que produz chuvas enriquecidas isotopicamente, como pela mistura de águas de diferentes fontes, nesse último pela influência dos rios Sergipe e Cotinguiba na composição isotópica das águas subterrâneas.

O pH apresenta uma boa correlação (0,6) com o excesso de deutério, o que sugere a presença de águas que passaram por processos de evaporação, devido à proximidade da fonte de evaporação (oceano), onde se originam as chuvas enriquecidas isotopicamente, e influência das águas dos rios, que também são enriquecidos em isótopos (principalmente em δD), sugerindo o influxo dessas águas, sob influência da maré alta. Os valores de $\delta^{13}C$ (‰) estão associados ao intemperismo de carbonato por $H_2CO_3^-$ e decomposição da matéria orgânica presente no solo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (United States). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22. ed. Washington: Amer Public Health Assn, 2012. 1496p.

ARMENGAUD, A., KOSTER, R., JOUZEL, J., CIAIS, P. Deuterium excess in Greenland snow: analysis with simple and complex models. **Journal of Geophysical Research**, VOL. 103, NO. D8, PAGES 8653–8947, APRIL 27, 1998. Disponível em: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/98JD00274/epdf>. Acesso em: 03 mar. 2018.

APPELO, C.A.J., POSTMA, D. **Geochemistry, Groundwater and Pollution**. 2nd edition. A.A. Balkema Publishers, Amsterdam, 2005.

BRAND, W. A. et al. New methods for fully automated isotope ratio determination from hydrogen at the natural abundance level. *Isotopes Environ Health Stud.* 1996 Aug; 32(2-3):263-73. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22088118>. Acesso em: 05 mar. 2018.

BHAT, N. A; JEELANI. G; BHAT, Y. M. Hydrogeochemical assessment of groundwater in karst environments, Bringi watershed, Kashmir Himalayas, India. **Current Science**, Bengaluru, v. 106, n. 7 (10 April 2014), pp.1000-1007.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 396, de 03 de Abril de 2008**. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências. Disponível em: <http://conama.gov.br>. Acesso em 04 mar. 2015.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº- 2.914**, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <http://bvsmis.saude.gov.br>. Acesso em: 20 jan 2015.

CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA W.S.; CRUZ F.E.G. Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n. 2, p. 405–415, 2007.

CARVALHO JÚNIOR, A. L. P. **Hidrogeologia e Processos Cársticos nas Formações Muribeca, Riachuelo e Cotinguiba na Bacia SE/AL em Sergipe**. 2005. 146 f. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

COSTA, A. B. et al. Avaliação do Padrão da Composição Isotópica de Águas na Bacia do Rio Joanes: Implicações para a Interação entre Águas Superficiais e Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p.211-219, set. 2007.

CRAIG, H. Isotope standards for carbon and oxygen and connection factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1957, (12):133-149.

CRAIG, H.; LAL, D. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, Washington, v. 133, n. 3456, p. 1833-1834, 1961.

DREW, D. & HÖTZL, H. (Eds.). **Karst hydrogeology and human activities: Impacts, consequences and implications**. International Contributions to Hydrogeology, 20, 322 pp., 1999.

DANSGAARD, W. Stable Isotopes in Precipitation. **Tellus**, 16, 436 – 468, 1964. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/tellusa.v16i4.8993>. Acesso em: 03 mar. 2018.

EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. Variations of O¹⁸ content of waters from natural sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. 4(5):213-224 · November 1953.

FEIJÓ, F. J. Bacia de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobrás**. Rio de Janeiro. V. 8, n.1, p. 149-161, 1994.

FEITOSA, E. C. (Coord.) et al. **Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela**. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE.PETROBRAS, 175 p., 1998.

FORD, D., WILLIAMS, P. **Karst Hydrogeology and Geomorfology**. Ed.Wiley, 2007. 576 p.

FUNCEME (2014). **Qualigraf**. Disponível on-line em: <http://www3.funceme.br/qualigraf/>.

GARCIA, A.J.V (Coord) et al.. **Caracterização Multiescalar em Reservatórios Carbonáticos Análogos da Bacia Sergipe-Alagoas**. São Cristóvão, SE. PETROBRAS/REDE CARMOD/UFS. 496p. 2015.

GOMES, V. S. P. S.. **Análise Estatística Multivariada Aplicada a Dados Hidrogeológicos**. 2013. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Estatística, Departamento de Estatística e Investigação Operacional, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2013.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balanço hídrico e dados climatológicos**. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em 10 jan. 2016.

J.MERKEL, B.; PLANER-FRIEDRICH, B. **Groundwater Geochemistry: A Practical Guide to Modeling of Natural and Contaminated Aquatic Systems**. 2. ed. Berlin: Springer, 2008. 229 p.

LEMOINE B. Essai de Classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. **Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières**. Supplement, 1974. 77 p.

LOGAN, J. Interpretação de análises químicas de água. Recife: [U.S. Agency for International Development], 1965. 67 p.

NASCIMENTO, S. A. de M. **Diagnóstico hidrogeoquímico, hidroquímico e da qualidade da água do aquífero freático do alto cristalino de Salvador-Bahia**. 2008. 195f. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2008.

Parkhurst D, Appelo C. A. J. Users's guide to PHREEQC (version 2): a computer program for speciation, batch reaction, onedimensional transport, and inverse geochemical calculations. **US Geol Surv Water Res Investig**. 310:99–4259, 1999.

PIPER, A. M. A Graphic Procedure in the Geochemical Interpretation of Water Analysis. **Trans. Am. Geophysical Union**, 25.911-923, 1944.

- RIBEIRO, D. D. de M.; NASCIMENTO, S. A. de M.; GARCIA, A. J. V. **Caracterização Hidrogeológica dos Aquíferos Cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil. Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 31, n. 3, p.207-221, 28 maio 2017.
- SACKS, Laura A. Geochemical and Isotopic Composition of Ground Water with Emphasis on Sources of Sulfate in the Upper Floridan Aquifer in Parts of Marion, Sumter, and Citrus Counties, Florida. **U.S. Geological Survey**, Tallahassee, 1996, 53p.
- SANTOS, A. C. Noções de hidroquímica. In: Feitosa A. C.; Manoel Filho, J. (Eds.). **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE, 2008.
- SCHALLER, H. Revisão Estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobras**. V.12, n. 1, p. 21-86. 1969.
- SCHOELLER, H. **Lês eaux souterraines**. Paris: Mason, 1962. 642 p.Cap. 7.
- SILVEIRA, A. M. **Avaliação da qualidade da água da Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe usando análises multivariadas de dados**. 2014, 121f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2014.
- SINGHAL, B.B.; GUPTA, R.P. **Applied Hydrogeology of Fractured Rocks**. 2. ed. London: Springer, 2010. 429 p.
- SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE (SRH). **Atlas Digital de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju, 2014. CD-Room.
- TELES, D. R. de S. **Origem e evolução de águas de formação em campos petrolíferos do nordeste brasileiro**. 2014. 105f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.
- THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, New York, v. 38, n. 1, p.55-94, 1 jan. 1948.

TURER, D.; MAYNARD, J. B. Heavy metal contamination in highway soils. Comparison of Corpus Christi, TX and Cincinnati, OH shows organic matter is key to mobility. **Clean Technology and Environmental Policy**, v. 4, p. 235-245, 2003.

USSL. **Diagnosis and improvement of salinity and alkaline soil**. USDA Hand Book no. 60. 1954.

W.H.O. World Health Organization. **Guidelines for drinking-water quality**. 4 ed. 2011. Disponível em: <http://apps.who.int>. Acesso em: 04 mar. 2015.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

As zonas aquíferas do Sapucari e Maruim apresentam um comportamento hidrogeológico, em geral, de natureza livre. O aquífero Sapucari é representado por calcilutitos maciços fraturados, enquanto que o Maruim é formado por calcários dolomitizados e calcarenitos.

Essas zonas correspondem a reservas hídricas estratégicas para o desenvolvimento local, uma vez que são responsáveis por parte do abastecimento humano, industrial e outras atividades nos municípios de Nossa Senhora do Socorro, Laranjeiras e Maruim, como também da capital do estado de Sergipe, Aracaju. Diante disso, torna-se imprescindível o desenvolvimento de ações de gerenciamento desse recurso natural, apesar do risco geotécnico inerente a esses terrenos, como a subsidência do solo, que são potencializados com a exploração das águas subterrâneas, e o risco de contaminação das águas.

O mapa de vulnerabilidade dos aquíferos cársticos Maruim e Sapucari, gerado através do método EPIK, permitiu identificar as áreas potencialmente sujeitas à contaminação. As zonas aflorantes das unidades aquíferas apresentam maior vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas, uma vez que há maiores ocorrências de feições cársticas e formação de pequenos condutos e fraturas em afloramentos analisados.

Os padrões NE de condutos coincidem com o direcionamento preferencial das falhas geológicas (NE-SW), e o mergulho para sudeste das camadas carbonáticas, permitindo a infiltração da água de superfície pelos espaços fissurais, em direção as zonas de descargas dos aquíferos.

Na associação porosidade, permeabilidade e transmissividade, os altos valores desses parâmetros refletem o comportamento cárstico dos aquíferos, onde os fluxos nas zonas fraturadas proporcionam o desenvolvimento de condutos.

Ambos os aquíferos são sustentáveis em termos de reservas. Porém, deve-se considerar o risco geológico, associado à exploração das águas subterrâneas em terrenos cársticos, como também à sua qualidade.

As águas dos aquíferos Sapucari e Maruim são classificadas em geral como bicarbonatadas cálcicas e bicarbonatadas cálcicas magnesianas (Ca-HCO_3^- e Ca-Mg-HCO_3^-). A dominância dos íons Ca^{++} e HCO_3^- explica a dissolução de carbonatos, refletindo o processo de interação água-rocha.

Os índices hidrogeoquímicos, como a razão $r\text{Na}/r\text{Cl}$, sugerem uma relação com a recarga meteórica, o que, em situação de proximidade do mar, pode elevar a razão Na/Cl , e pela influência dos rios Sergipe e Cotinguiba, que são salgados. Outras razões como Ca/HCO_3^- , Mg/HCO_3^- , Cl/HCO_3^- e Na/HCO_3^- estão relacionadas ao processo de interação água-rocha, como a ocorrência dos níveis dolomíticos do Membro Maruim.

A alta correlação do STD com o sódio e cloretos sugerem a mistura de águas, devido à proximidade dos poços aos rios Sergipe e Cotinguiba, constituindo um fator importante no processo de salinização das águas subterrâneas.

A modelagem geoquímica, realizada a partir dos índices de saturação, indicam tendência à dissolução de calcita e dolomita nas zonas de ocorrências de dolinas e cavernas no setor SW-NE. Tais particularidades sugerem, nessa área, a ocorrência de um menor tempo de residência das águas. Em geral, os altos valores de precipitação em calcita encontram-se nas profundidades superiores a 100 metros, sugerindo um tempo de residência maior da água nesse nível estratigráfico.

O risco de salinização dos solos pelas águas do Sapucari é predominantemente alto, enquanto o do aquífero Maruim é predominante médio. A influência das águas dos rios Cotinguiba e Sergipe, e a interação água-rocha no processo de salinização das águas do Sapucari, observadas na PC1, são explicadas pela associação positiva das variáveis condutividade elétrica, sódio, magnésio, cloretos e sulfatos.

O desvio em relação à Linha Meteorica Global observado nas análises isotópicas pode ser explicado tanto pela proximidade da fonte de evaporação (chuvas enriquecidas isotopicamente no oceano), como pela mistura de águas de diferentes fontes, nesse último pela influência dos rios Sergipe e Cotinguiba. A boa correlação entre o pH e o excesso de deutério contribuem para essa hipótese. Já os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) sugerem o intemperismo de carbonato por H_2CO_3^- e decomposição da matéria orgânica presente no solo.

APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS COAUTORES

A participação do Dr. Antonio Jorge Vasconcellos Garcia como coautor nos artigos justifica-se por ser coorientador da autora da pesquisa, com contribuições nos trabalhos de campo, fornecimento dados cartográficos, petrográficos e petrofísicos da bacia Sergipe-Alagoas, e discussões sobre a geoquímica das águas subterrâneas com base nos aspectos diagenéticos evolutivos da bacia.

APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Clima

A área de estudo possui um clima do tipo megatérmico seco e subúmido, com temperatura média anual de 25°C (CPRM, 2002). O balanço hídrico climatológico para o período de 1961-1990 (Figura 1) indica os meses chuvosos entre março e agosto e meses secos entre setembro a fevereiro (INMET, 2016). A análise da figura 1 mostra um excedente hídrico de aproximadamente 430 mm para a série histórica, devido aos altos índices pluviométricos registrados na região. A Figura 2 apresenta o mapa de precipitação média anual para área de estudo.

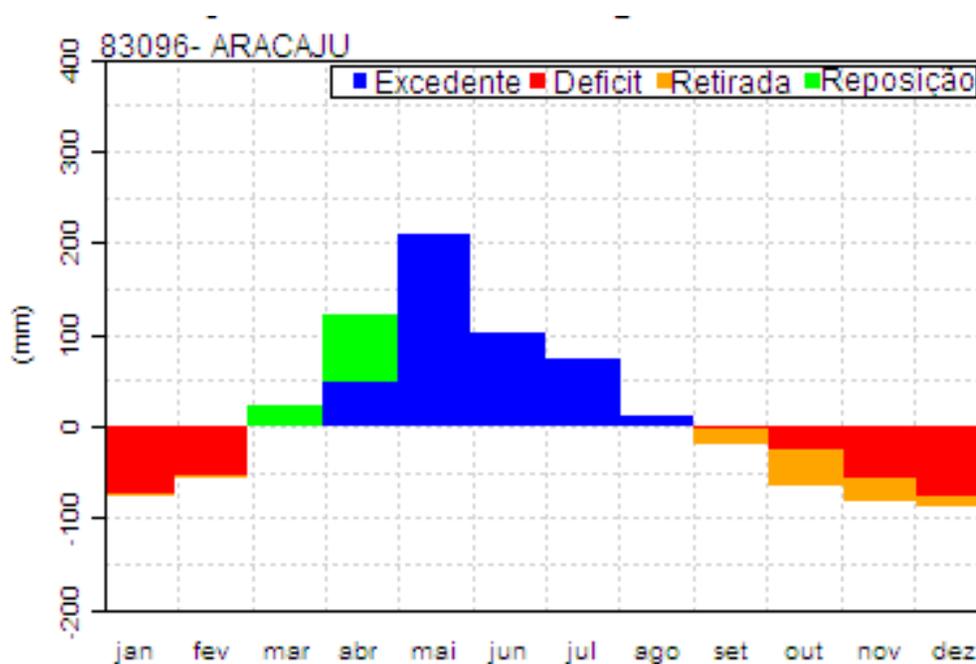


Figura 1. Balanço hídrico climatológico para o período de 1961-1990: Aracaju-SE (INMET, 2016).

O método THORNTHWAITE (1948) foi aplicado para determinação do índice hídrico e classificação climática da área de estudo no período de 2011 a 2015. Foram utilizados os dados do balanço hídrico sequenciado da estação Aracaju (INMET, 2016) para o período citado (Tabela 1).

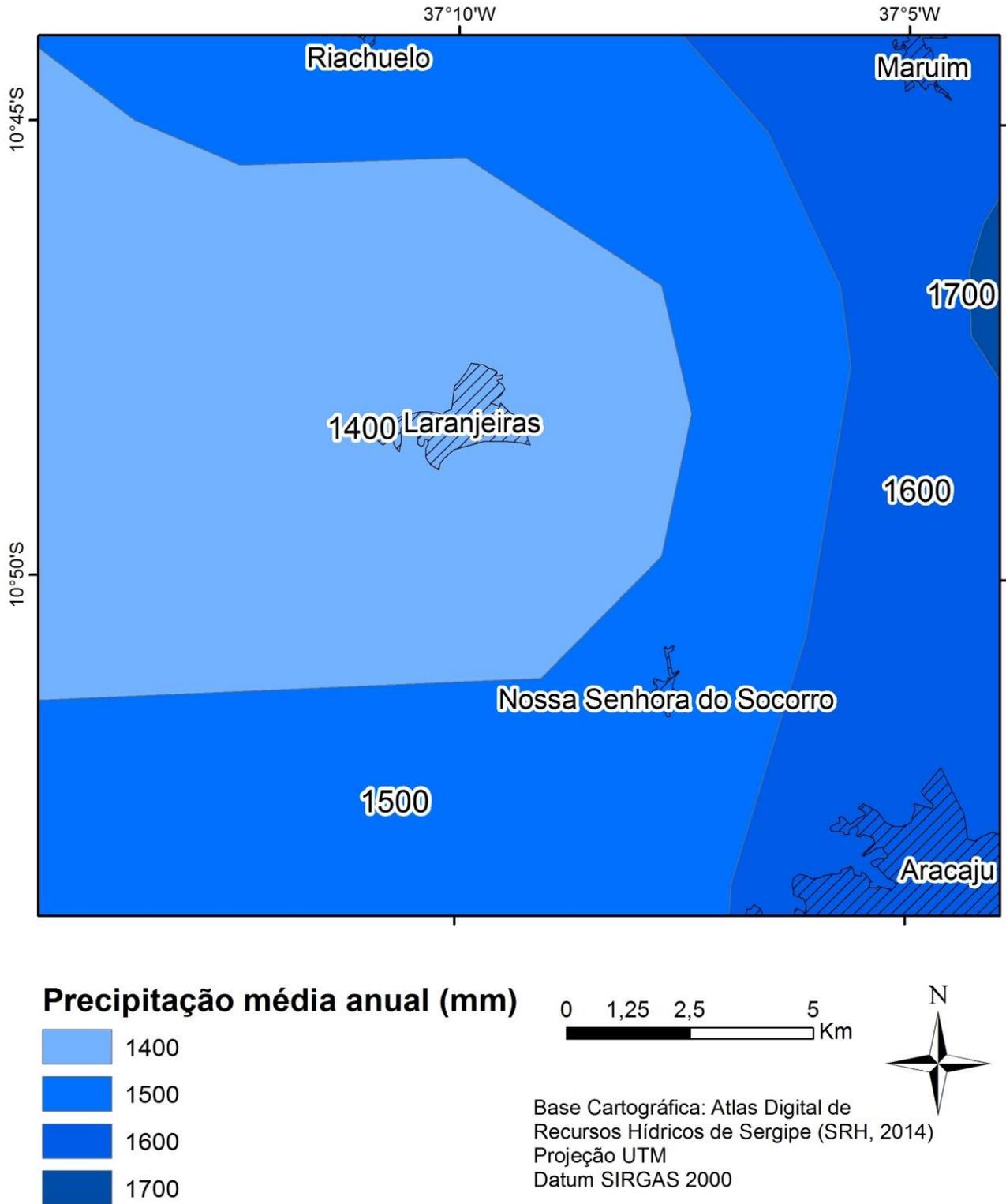


Figura 2. Precipitação média anual da área de estudo. Fonte de dados: Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (2014).

A precipitação média anual total foi de 1299 mm e a evapotranspiração potencial (ETP) de 1441,9 mm/ano. O déficit hídrico foi de 666 mm, cerca de 51,2% da precipitação total, concentrado entre os meses de setembro e março. Considerando-se os dados da Tabela 1, o índice de umidade calculado pelo método (THORTHWAITE,1948) foi de 36,25%, sendo classificado como úmido (B1).

Segundo THORTHWAITE (1948), não ocorrerá seca se a deficiência hídrica não for maior que 60% do excedente hídrico da estação chuvosa. Nesse caso, a área apresenta 44% de déficit hídrico referente ao excedente da estação chuvosa, não ocorrendo seca.

Tabela 1. Dados da Estação climatológica de Aracaju (2011 a 2015).

MÊS/2011-2015	ARM	ETR	Deficit	Excedente	ETP	PRECIPITACAO	TEMPERATURA
jan	382,6	35,6	109,5	0,0	145,1	41,4	27,7
fev	649,7	49,4	71,2	2,1	120,6	62,6	27,8
mar	834,2	70,7	86,3	0,0	157,1	60,0	28,1
abr	1103,3	79,2	62,0	67,7	141,2	182,6	27,7
mai	1807,2	87,2	21,2	175,0	108,4	261,4	26,6
jun	946,9	75,7	5,7	77,3	81,4	168,2	25,9
jul	2136,8	70,2	4,0	98,6	74,1	172,6	25,1
ago	1996,5	71,4	9,2	42,2	80,6	97,5	25,0
set	1350,0	75,8	41,4	4,9	117,2	61,8	25,7
out	1174,9	75,1	65,9	36,4	140,9	102,5	26,3
nov	861,1	56,1	83,5	18,5	139,6	61,4	26,7
dez	425,4	29,0	106,7	0,0	135,7	27,0	27,3
TOTAL	13668,5	775,3	666,6	522,7	1441,9	1299,0	26,7

Fonte: Balanço Hídrico Climatológico para os anos de 2011 a 2015: Aracaju-SE (INMET,2016).

ARM- Armazenamento

ETR- Evapotranspiração Real

Déficit- Deficiência Hídrica

EXC- Excedente Hídrico

ETP- Evapotranspiração Potencial

P- Precipitação

TEMP- Temperatura

Configurações geomorfológicas

A área de estudo encontra-se no domínio morfoestrutural da Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, onde são identificadas três unidades geomorfológicas: relevos dissecados em colinas e interflúvios, terraço fluviomarinho e planície fluviomarinha (Figura 3).

Os relevos dissecados em colinas e interflúvios representam áreas de vertentes dos Tabuleiros Costeiros, dissecadas por ações erosivas dos rios (ALVES, 2010), produzidos nos sedimentos do Grupo Barreiras e rochas carbonáticas da bacia de Sergipe-Alagoas.

As formas das colinas seguem as configurações litológicas, onde as áreas de ocorrências dos sedimentos do Grupo Barreiras e calcarenitos do Membro Maruim (Fm. Riachuelo) apresentam maiores elevações. Nas áreas de ocorrências de litologias, como calcilitos e folhelhos dos Membros Taquari (Fm. Riachuelo) e Sapucari (Fm. Cotinguiba), o relevo de colinas apresenta forma mais suave, que favorece o cultivo da cana-de-açúcar. Os terraços fluviomarinhos ocorrem próximos à planície fluviomarinha, no setor sudeste da área, associados aos sedimentos de praia e aluvião, alcançando os rios Cotinguiba e Sergipe.

- Introdução a Morfologia Cárstica

As feições cársticas estão associadas às unidades geomorfológicas de relevos dissecados em colinas e interflúvios e planície fluviomarinha. Consistem em local onde o solo é removido pela ação fluvial, um ambiente dominado por lençóis freáticos rasos, e que é substituído por condições de superfície envolvendo ataque direto ao afloramento pela precipitação (LAFLEUR, 1999). Uma ampla variedade de formas cársticas é produzida em ambientes desse tipo (Figura 4).

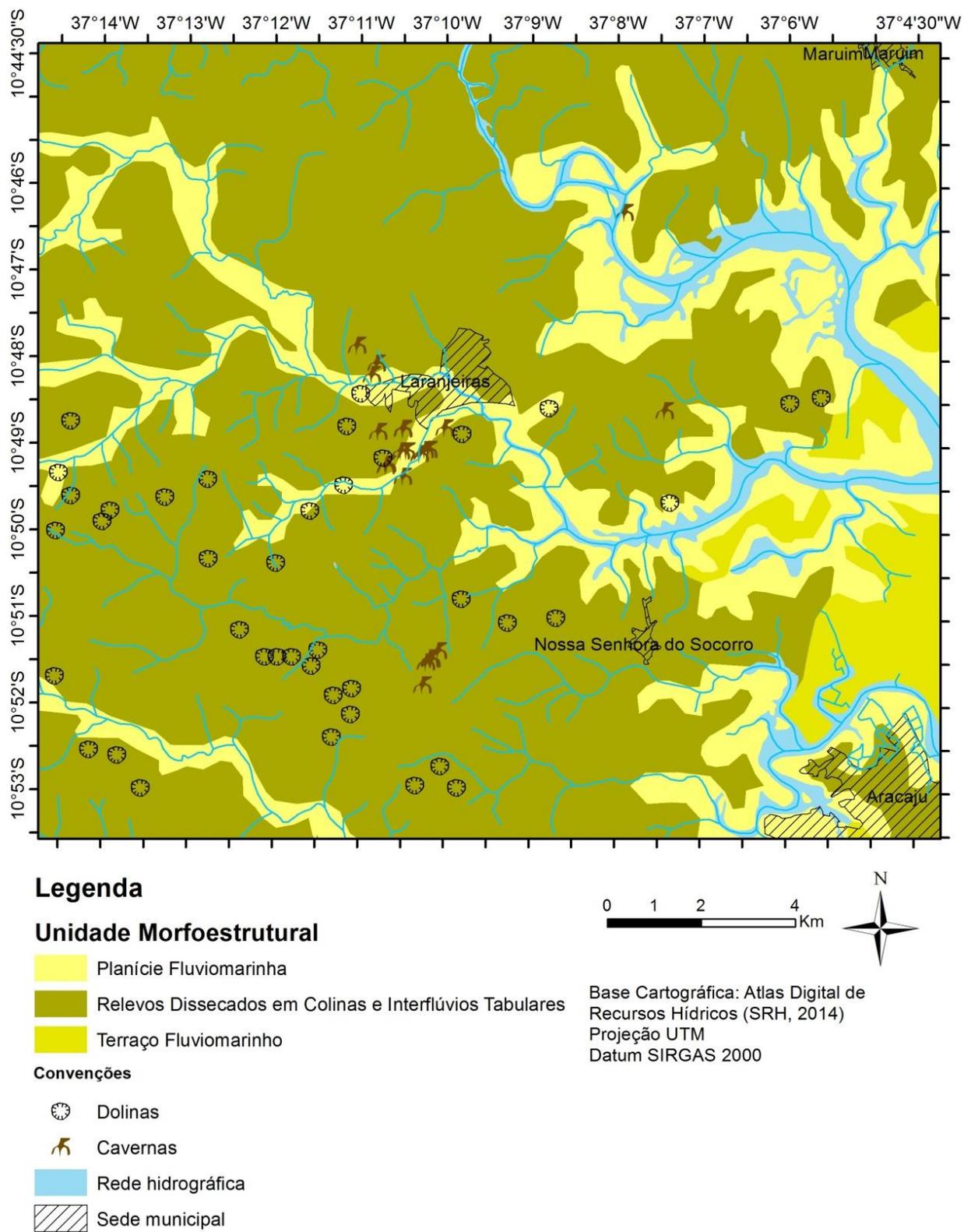


Figura 3. Mapa de unidades Morfoestruturais sobrepostas às feições cársticas, cavernas e dolinas. Fonte de dados: Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH, 2014).

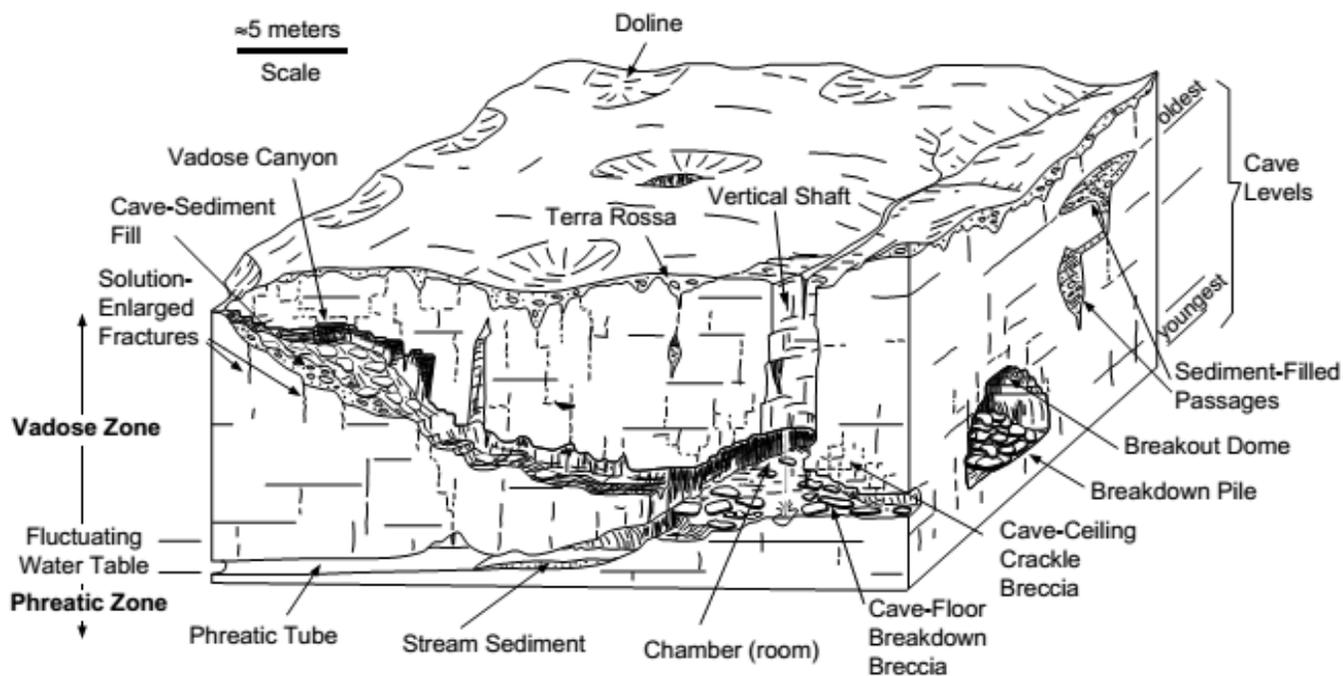


Figura 4. Bloco diagrama representativo do terreno cárstico, incluindo as principais formas desenvolvidas nos processos de carstificação (LOUCKS, 1999).

Os epicarstes são feições cársticas de superfície, formas de dissolução do topo rochoso (ex. *karren* e dolinas). Dolinas são formas de relevo, caracterizadas por drenagem interna com formas circulares a semicirculares. São causadas por processos de dissolução, colapso, sufusão ou subsidência (Figura 5) que transportam água subterrânea através de uma variedade de condutos alargados, ou através do solo, para sistemas de cavernas em profundidade (LAFLEUR, 1999).

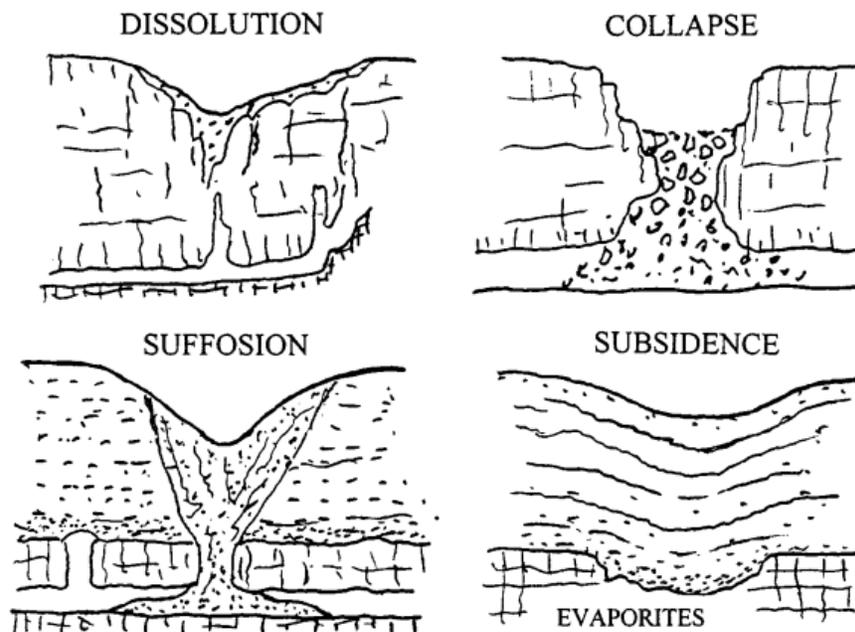


Figura 5. Diferentes tipos de dolinas de acordo com o processo de geração (LAFLEUR, 1999).

Um sistema de cavernas é originado a partir da dissolução de uma rocha solúvel, provocada pela água meteórica ou misturas de águas meteóricas e marinhas (LOUCKS, 1999). Grande parte dos sistemas de cavernas são complexos de megaporos, formados por passagens freáticas e vadosas (Figura 6), que são responsáveis pela geração de diferentes padrões geométricos refletindo a origem do sistema (LOUCKS, 1999).

Palmer (1991) determinou que 57% das cavernas são guiadas por camadas estratificadas separadas e litologia favorável, 43% por fraturas proeminentes e apenas 1% por poros intergranulares. A figura 6 apresenta os principais tipos de geometrias de cavernas.

Na área de estudo, destacam-se os padrões geométricos de passagem única e cavernas de múltiplas passagens com ramificações. As cavernas apresentam projeção horizontal de 40 m, exemplo da Caverna Pedra Furada da Mussuca, até 198 m, caso da Gruta dos Aventureiros (CENTRO DA TERRA, 2014).

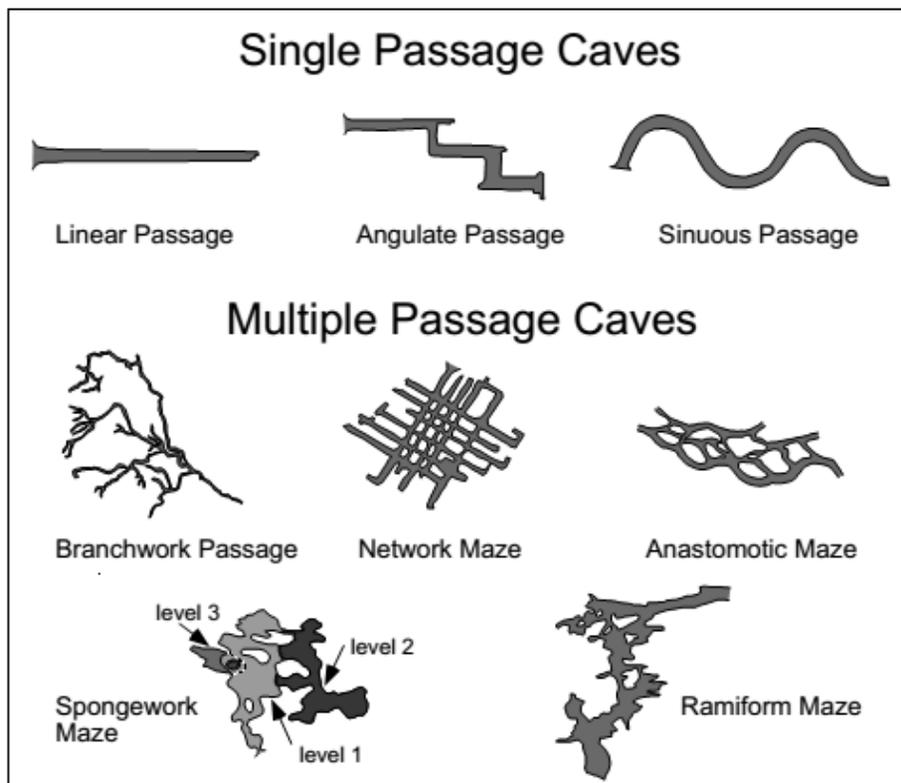


Figura 6. Principais geometrias de cavernas em plano (LOUCKS, 1999).

As feições cársticas de superfície são descontínuas ao longo da área analisada, concentrando-se as maiores ocorrências nos terrenos dos calcários Sapucari. Zonas com feições cársticas de subsuperfície são encontradas em descrição de poços tanto no Membro Sapucari como no Maruim, associadas a sistemas de fraturas regionais com formação de condutos e cavernas em profundidades estratigráficas situadas entre 10 e 140 metros.

Na análise da geometria e estrutura dos condutos, realizada por Carvalho Júnior (2005), foi identificada uma frequência de fraturas com direção preferencial N65E, e quatro secundárias, N15W, N40W, N25E e E-W. Do ponto de vista hidráulico, esse mesmo autor destaca que os conjuntos de fraturas interconectadas representam porosidade secundária nas rochas carbonáticas, com grandes extensões (métricos a decamétricos).

No Membro Sapucari, os condutos cársticos são descritos em fichas de poços de captação de águas subterrâneas em diferentes profundidades do perfil estratigráfico. Encontram-se associados aos sistemas de fraturas, direção NE, nas áreas da floresta do Ibura (Povoado da Estiva), situada no município de Nossa Senhora do Socorro; nos povoados Mussuca e Cedro, pertencentes ao município de Laranjeiras; e também nas proximidades das pedreiras Brejo e Carapeba, nesse mesmo município.

Feições do tipo *karren* com caneluras (Figura 7) são observadas em afloramentos do município de Laranjeiras. Tubos de dissolução são observados no paredão da rocha, indicando o processo de formação de condutos (Figura 8).



Figura 7. Feições do tipo *karren* com caneluras observadas em pedreira do Membro Sapucari, da Formação Cotinguiba, no município de Laranjeiras, Estado de Sergipe. Foto: Autora (2015).



Figura 8. Feição do tipo *shaft* e desenvolvimento de tubos de dissolução em pedreira no povoado Várzea, município de Laranjeiras, Sergipe. Foto: Autora (2015).

As dolinas (Figuras 9 e 10) ocorrem nas áreas próximas às drenagens do rio Cotinguiba, por vezes associadas às falhas geológicas com direção principal NE-SW e ocorrências de cavernas, conforme as figuras 11, 12 e 13.



Figura 9. Dolinas identificadas (setas em preto) na fotointerpretação geológica e georreferenciada na fazenda Sergipe, município de Laranjeiras, representativa do Membro Sapucari da Formação Cotinguiba. Foto: Autora (2015).



Figura 10. Dolina identificada em fonte no povoado Varzea, Município de Laranjeiras, área de ocorrência dos carbonatos Sapucari. Foto: Autora (2015).



Figura 11. Gruta Matriana representativa dos calcários do Membro Maruim, Formação Riachuelo, no município de Laranjeiras, Sergipe. Foto: Autora (2015).



Figura 12. Gruta da Estrada de Ferro (Laranjeiras-Sergipe), representativa dos calcilititos do Membro Sapucari, da Formação Cotinguiba. Foto: Autora (2015).



Figura 13. Gruta da Pedra Furada representativa dos calcários do Membro Sapucari, da Formação Cotinguiba, município de Laranjeiras, Sergipe. Foto: Autora (2015).

Solos

Os solos da área são caracterizados como: Argissolos; Chernossolo; Espodossolo; Gleissolo; Luvisso e Vertissolo (Figura 14). O Argissolo Vermelho-Amarelo abrange altitudes variáveis no relevo de colinas, com predominância de ocorrência na faixa carbonática.

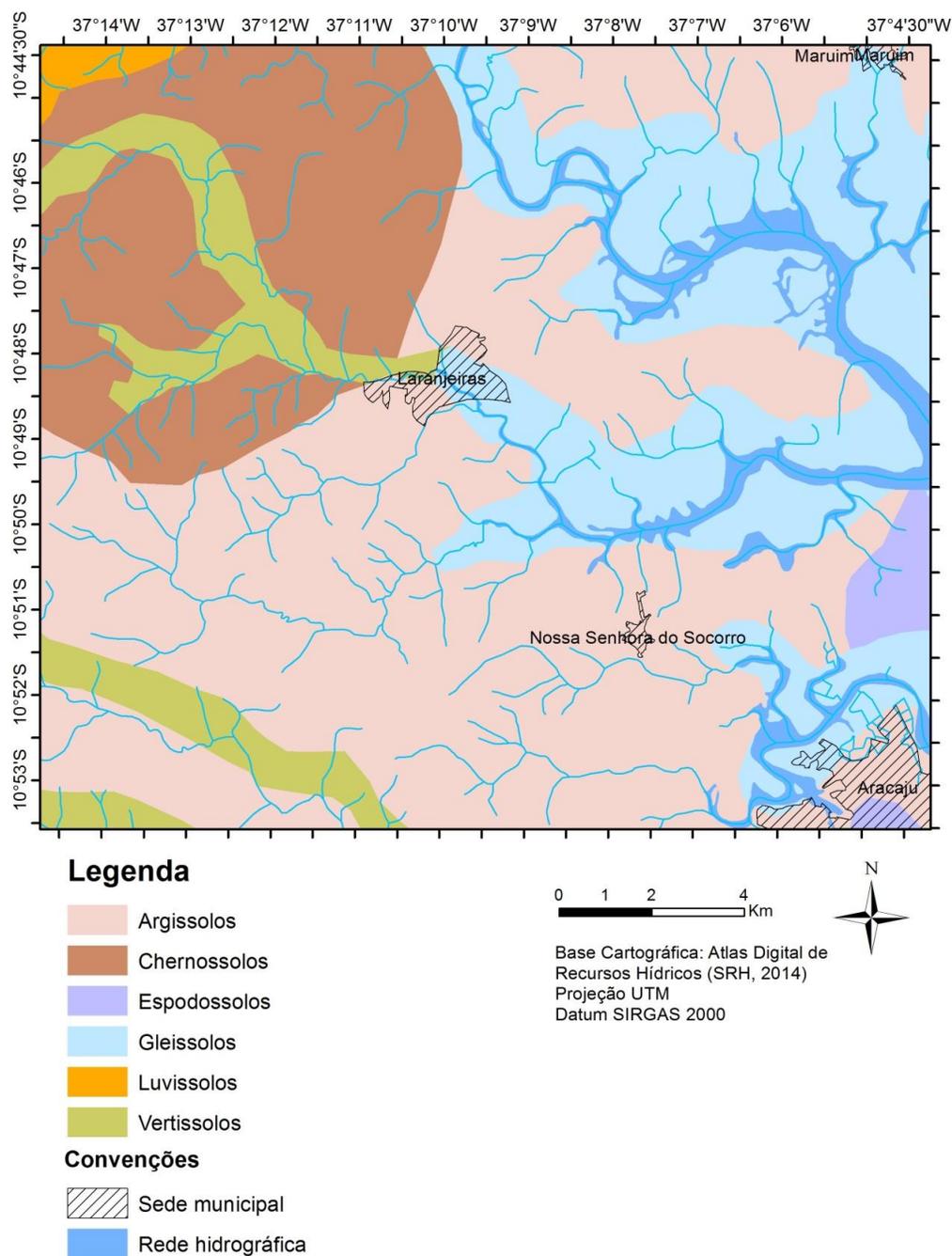


Figura 14. Mapa dos tipos de solo presentes na área de estudo. Fonte de dados: Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH, 2014).

As rochas calcárias da Bacia Sedimentar de Sergipe favorecem a ocorrência de solos mais férteis e com maior potencial de utilização, para a cultura da cana-de-açúcar, culturas de subsistência, fruticultura e pecuária (SEMARH/PROJETEC/TECHNE, 2010).

O Chernossolo apresenta-se sobreposto às rochas calcárias dos Membros Taquari e Maruim. Sua ocorrência está associada ao relevo de colinas, sendo utilizado para o desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar e de subsistência. O Espodossolo encontra-se sobreposto aos sedimentos de praia e aluvião. Sua ocorrência se apresenta em relevo plano, suave a ondulado, representativo na área de estudo pelo terraço fluvio-marinho.

O Gleissolo ocorre nas várzeas dos rios Cotinguiba e Sergipe, com relevo plano, associado à planície fluvio-marinha. Já o Luvisolo encontra-se num relevo ondulado, associado aos arenitos conglomeráticos do Membro Angico, da Formação Riachuelo, onde se desenvolvem a pecuária, a cultura de subsistência e o cultivo da cana-de-açúcar. No Vertissolo se desenvolve a pecuária e o cultivo de cana-de-açúcar, essa última como atividade mais representativa na região.

Uso da Terra

Os principais usos da terra na área de estudo correspondem às pastagens e aos cultivos agrícolas, como cana-de-açúcar e de subsistência (Figura 15). As coberturas vegetais são predominantemente de floresta estacional, mata ciliar e mangues.

A floresta estacional encontra-se em estágio avançado de degradação devido à exploração mineral, pastagens e cultivos agrícolas, como a cana-de-açúcar. As atividades de mineração, como a exploração de calcário, utilizado na indústria de cimento, construção, dentre outros, concentram-se nos municípios de Laranjeiras, Maruim e Nossa Senhora do Socorro.

A exploração em escala industrial é feita por empresas como a Votorantim Cimentos (Fábrica CIMESA), situada no município de Laranjeiras, NASSAU (Itaguassu Agro Industrial) no município de Nossa Senhora do Socorro, e INORCAL no município de Maruim.

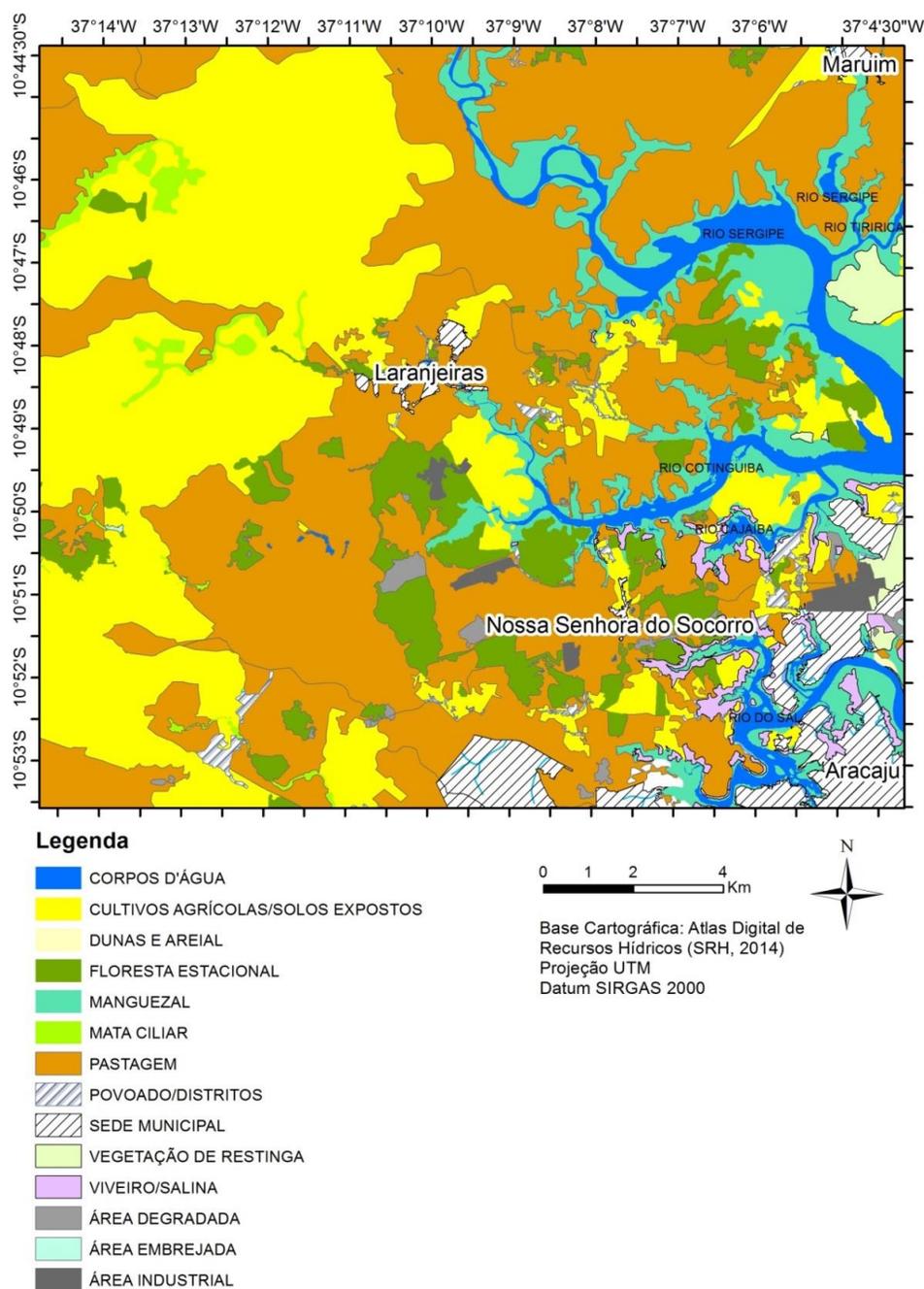


Figura 15. Principais usos da terra presentes na área de estudo, com destaque para as áreas de pastagens e cultivos agrícolas como a cana-de-acúcar. Fonte de dados: Atlas Digital de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH, 2014).

A exploração artesanal dos calcários dos Membros Sapucari e Maruim também acontece nos mencionados municípios. Outras atividades industriais se destacam na área, como a Fábrica de Fertilizantes de Nitrogenados (FAFEN-SE) e a White Martins Gases do Nordeste.

Abastecimento de água na região

A partir do Banco de Dados “Cidades” do IBGE (IBGE, 2016), da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008; 2016), do Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água (ANA, 2015), e do Atlas de Recursos Hídricos de Sergipe (SRH, 2014), é possível destacar os seguintes aspectos no que diz respeito à população e ao abastecimento de água:

- O município de Laranjeiras apresenta uma população estimada, no ano de 2016, em 29.418 habitantes, e o número de domicílios e de economias ativas, ligados à rede de abastecimento de água é de 4.986 (IBGE, 2008; 2016). O volume total de água por dia com tratamento (simples desinfecção-cloração e outros) é em torno de 3.600 m³/d (IBGE, 2008). A Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO) é responsável pelo fornecimento de água nesse município, onde o abastecimento é realizado por poços tubulares. Constam cerca de 14 poços outorgados, sendo 43% destinados ao abastecimento humano (vazão de 482,4 m³/h) e 57% para uso industrial (vazão de 296 m³/h). Segundo a ANA (2015), a demanda de abastecimento urbano em Laranjeiras para o ano de 2015 foi de 75 L/s.

- O município de Nossa Senhora do Socorro possui uma população estimada, no ano de 2016, em 179.661 habitantes. O número de domicílios e de economias ativas com abastecimento de água está em torno de 37.906. O volume total de água tratada (tratamento convencional) é de 38.205 m³/d (IBGE, 2008; 2016). O abastecimento público nesse município é fornecido também pela DESO, proveniente dos rios Poxim e São Francisco, fonte e poços do Ibura. Esses últimos são responsáveis por 13% do abastecimento do município (ANA, 2015). A demanda estimada para o ano de 2015 foi de 464 L/h. Na

área existem 15 poços outorgados, sendo 14% para abastecimento público (vazão de 755 m³/h), 66% para o industrial (vazão de 428m³/h) e 20 % para outros usos (32 m³/h).

- O município de Maruim conta com uma população estimada, no ano de 2016, em 17.225 habitantes, e um número de domicílios e de economias ativas com abastecimento de água em torno de 3.658. O volume total de água tratada distribuída (simples desinfecção-cloração e outros) é de 4.314 m³/d. A DESO é responsável pelo fornecimento de água na zona urbana, garantindo 100% do abastecimento (ANA, 2015). Esse abastecimento é feito completamente por poços. A demanda urbana para o ano de 2015 foi estimada em 37 L/s (ANA, 2015). Na área, encontram-se 9 poços outorgados, sendo 89% para abastecimento humano (vazão de 398,8 m³/h) e 11% para outros usos (vazão de 7,2 m³/h).

Geologia Regional

A área de estudo encontra-se no contexto geológico da Bacia Sedimentar de Sergipe/Alagoas e dos depósitos continentais da Formação Barreiras sobrepostos ao embasamento, constituído por filitos, metaconglomerados e metarenitos das formações Ribeirópolis e Itabaiana, Grupo Miaba, Domínio Vaza-Barris (SANTOS et al., 1998; GARCIA et al., 2015), que forma o domínio geotectônico da Faixa de Dobramentos Sergipana (Figura 16).

A Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas ocupa uma faixa alongada na costa leste brasileira (Figura 17), com limite ao norte, no Alto do Maragogi (Bacia Pernambuco-Paraíba), e ao sul, com a Bacia de Jacuípe (GARCIA et al., 2015). É subdividida em duas sub-bacias, a de Sergipe e a de Alagoas, com preenchimento sedimentar e estilos tectônicos diferenciados (CAMPOS NETO et al., 2007). Os compartimentos tectônicos, em geral, são limitados por grandes falhas (LANA, 1990), que diferencia a sub-bacia de Sergipe da sub-bacia de Alagoas.

O preenchimento sedimentar da bacia de Sergipe-Alagoas é dividido em 5 estágios evolutivos, segundo Campos Neto (2007): sinéclise; pré-rifte; rifte; pós-rifte e drifte.

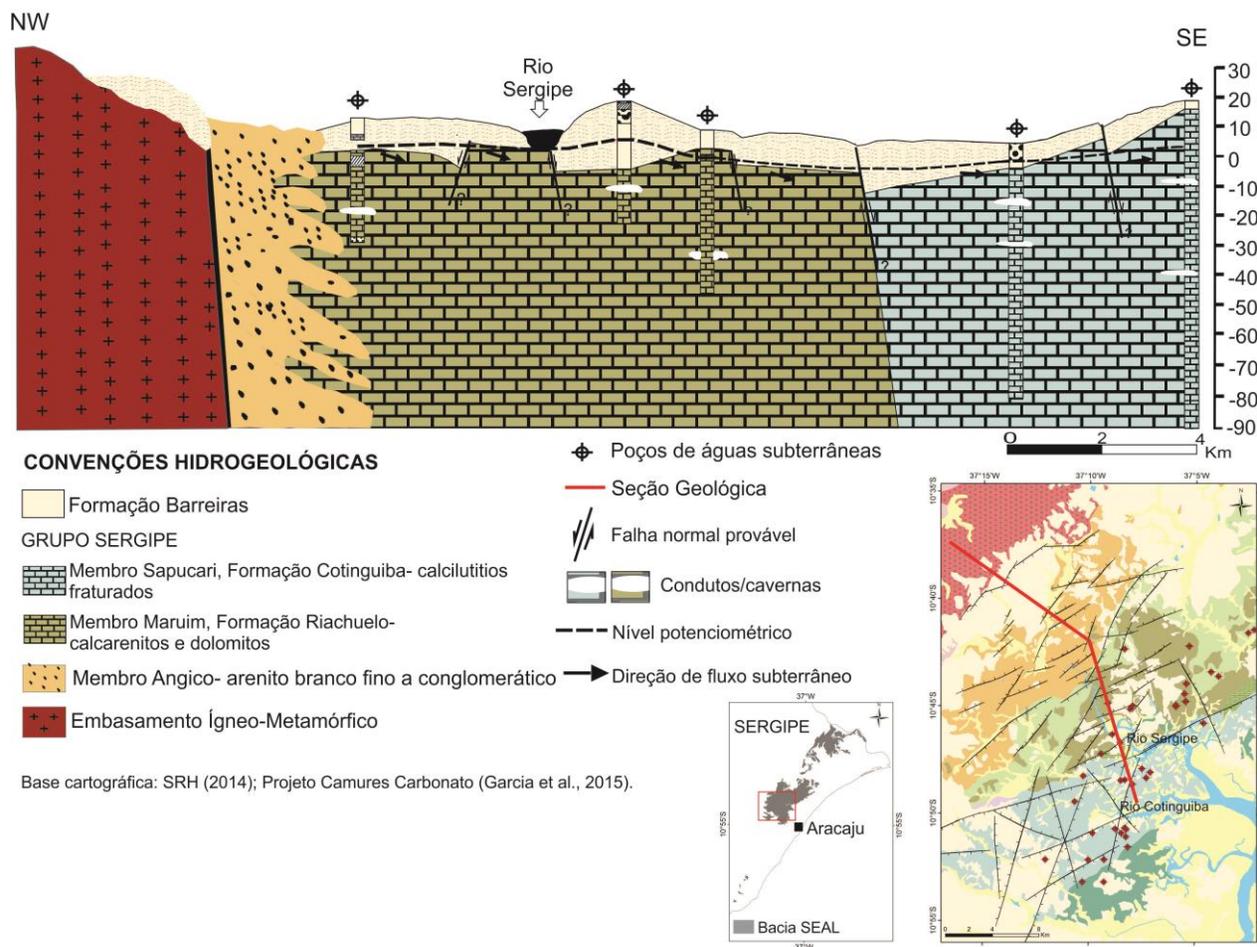


Figura 16. Seção geológica simplificada do contexto geológico regional da área de estudo, elaborada a partir de dados de poços de águas subterrâneas e mapa geológico da área de estudo.

No estágio **sinéclise** ocorre a deposição da sequência Carbonífera, representada pelos arenitos, siltitos e diamictitos da Formação Batinga, e pelos arenitos e calcarenitos da Formação Aracaré (CAMPOS NETO et al, 2007). Já no estágio **pré-rifte** houve a deposição dos sedimentos fluviais e lacustres do Grupo Perucaba (formações Candeeiro, Bananeiras e Serraria), representados pelos

arenitos fluviodeltáicos da Formação Candeeiro, sobrepostos pelos folhelhos vermelhos lacustres da Formação Bananeiras, e os arenitos da Formação Serraria (CAMPOS NETO et al, 2007).

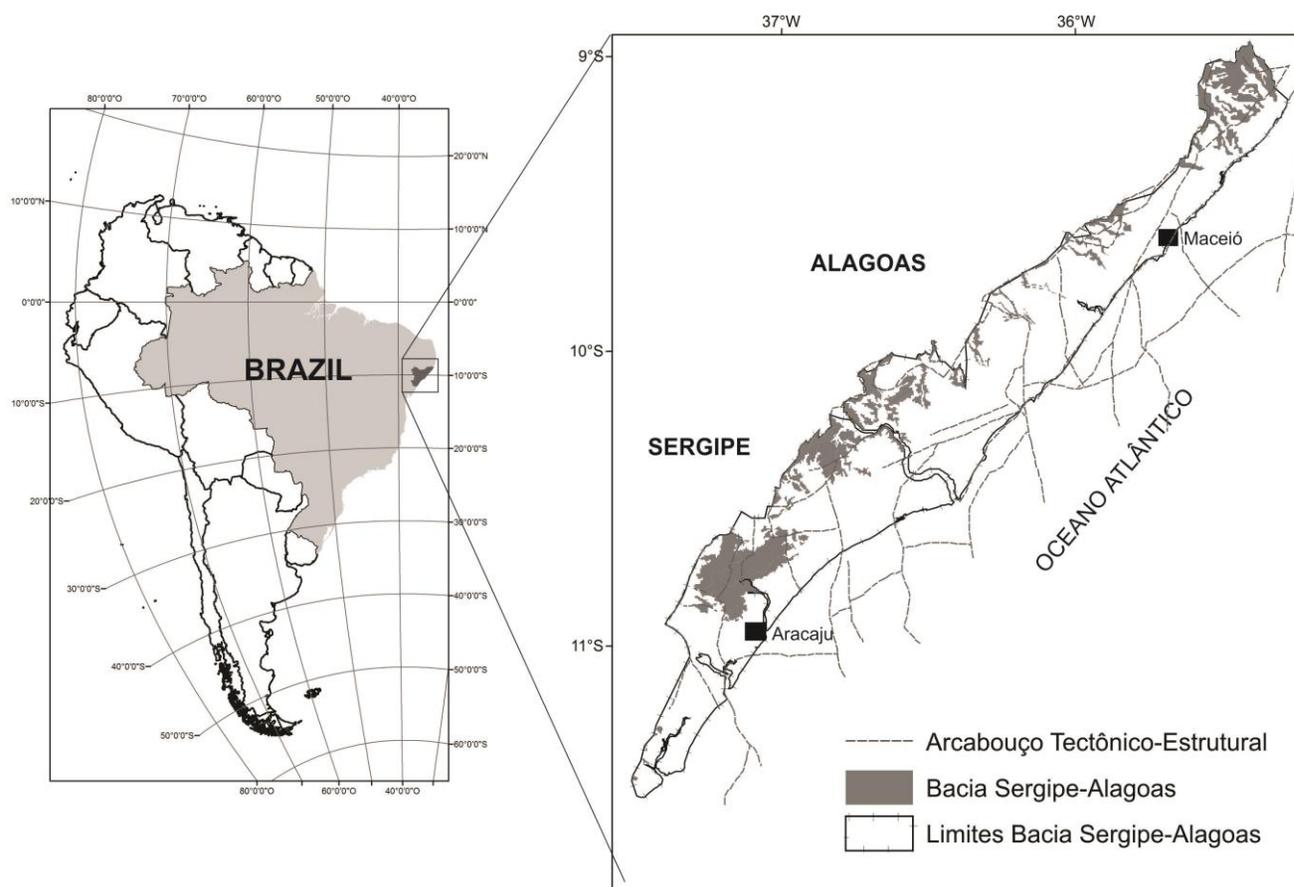


Figura 17. Localização da bacia Sergipe-Alagoas, NE do Brasil. Representação do arcabouço tectônico-estrutural (adaptado de LANA, 1990; Garcia et al, 2015).

O estágio **rifte** corresponde à fase de subsidência mecânica da bacia (CAMPOS NETO et al., 2007), representada pelos depósitos aluviais, fluviais e deltaicos do Grupo Coruripe (Figura 18). Nesse estágio, o arcabouço estrutural da Bacia Sergipe-Alagoas foi definido por falhas geológicas de direções preferenciais NE, N-S, E-W e, secundariamente na direção NW, em geral interpretadas como falhas normais (FALKENHEIN et al., 1986 apud CRUZ, 2008).

No estágio **pós-rifte** ocorre a deposição das seções evaporíticas das bacias costeiras, identificada pela Formação Muribeca na bacia Sergipe-Alagoas (GARCIA et al., 2015), composta por

siliciclásticos grossos do Membro Carmópolis, evaporitos do Membro Ibura, como também por intercalações de folhelhos e calcilitos do Membro Oiteirinhos (CAMPOS NETO et al., 2007).

- Geologia Local

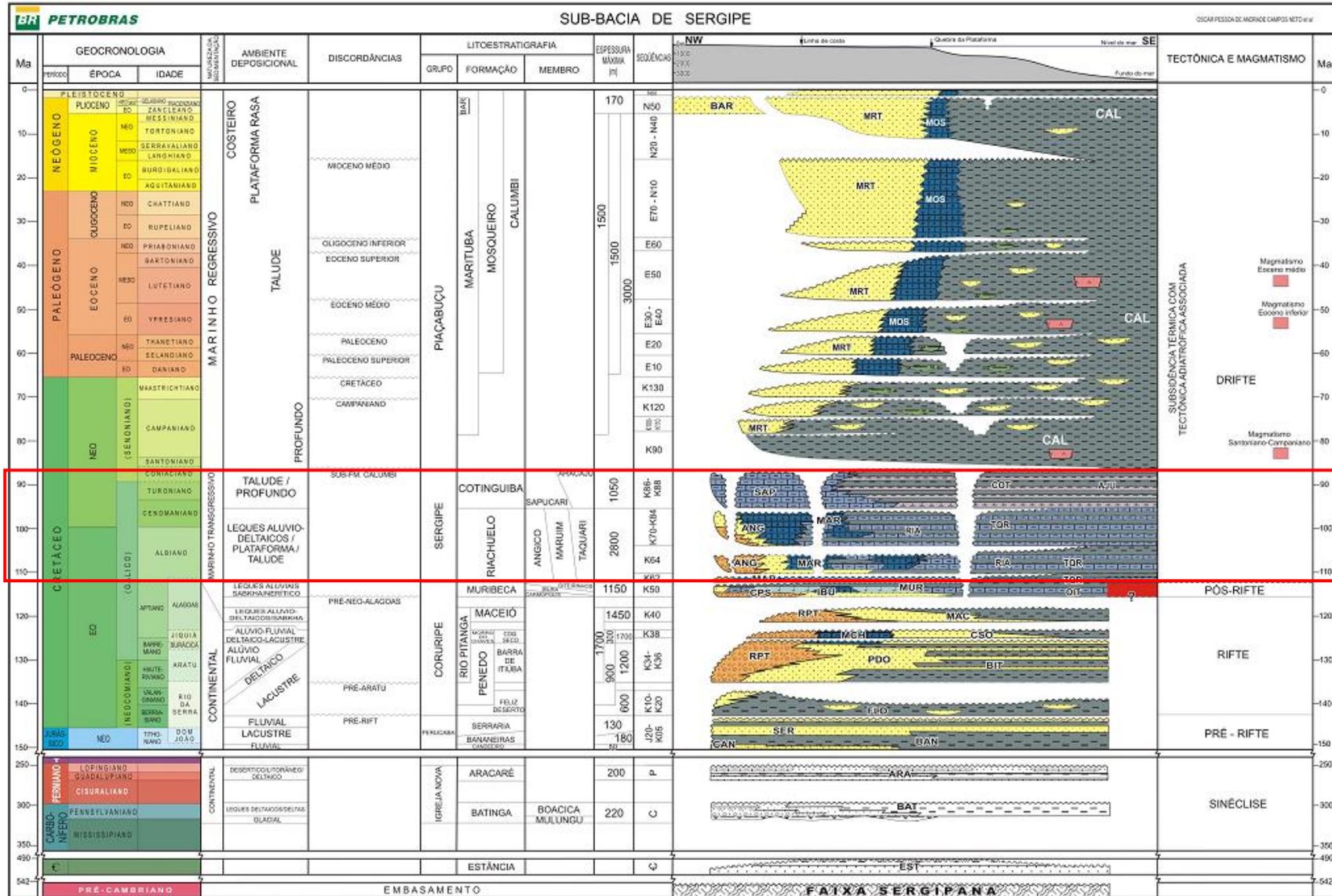
O estágio final de evolução da bacia, denominado **drifte**, contempla a fase que permitiu a deposição das rochas dos Grupos Sergipe e Piaçabuçu (CAMPOS NETO et al., 2007). Nesse caso, é destacado o intervalo estratigráfico representativo das unidades carbonáticas da sub-bacia de Sergipe, objeto da pesquisa.

O Grupo Sergipe é constituído por depósitos marinhos carbonáticos das Formações Riachuelo e Cotinguiba (Figura 18). A Formação Riachuelo é constituída por carbonatos, folhelhos, siltitos e arenitos (SCHALLER, 1969).

A litologia permite individualizar a Formação Riachuelo da seguinte forma: membros Taquari, Maruim e Angico. O Membro Taquari é constituído por calcilitos e folhelhos, enquanto o Membro Maruim é formado por calcarenito e calcirrudito oncolítico. Já o Membro Angico é constituído por arenitos finos a conglomeráticos, intercalados de folhelhos, siltitos e calcários (SCHALLER, 1969).

Feijó (1994) descreve os Membros da Formação Riachuelo da seguinte forma: Membro Angico - arenito branco fino a conglomerático; Membro Taquari - calcilitos e folhelhos cinzentos; Membro Maruim - calcarenito e calcirrudito oncolítico oolítico creme, e recifes algálicos isolados.

A Formação Cotinguiba caracteriza-se pela presença de carbonatos, depositados num grande evento transgressivo (SCHALLER, 1969). A litologia dessa unidade permite individualizá-la em dois membros, o Aracaju e o Sapucari. O Membro Aracaju é constituído por calcilitos, folhelhos e margas, enquanto o Membro Sapucari, predominante na área de estudo, é caracterizado por calcilitos maciços e brechoides (CAMPOS NETO et al., 2007).



Sobrepostos à Formação Cotinguiba, encontram-se os clásticos e carbonatos do Grupo Piaçabuçu, representativos das Formações Calumbi, Formação Mosqueiro e Formação Marituba. Como também, a Formação Barreiras, que é composta por clásticos continentais finos a grosseiros, de coloração variada, pouco ou não consolidados (SCHALLER, 1969).

- Hidrogeologia

Os aquíferos podem ser classificados quanto à pressão da água e à constituição litológica. Quanto à pressão, podem ser livres, confinados, semiconfinados e suspensos (REBOUÇAS et al., 2006). Quanto à constituição do seu material geológico, são classificados em três tipos: porosos ou sedimentares, fraturados ou fissurais e cársticos (BORGHETTI, 2004).

Quanto à pressão, os aquíferos são assim classificados (REBOUÇAS et al., 2006):

- Aquífero livre – primeira camada litológica porosa e permeável da área estudada, onde as águas da zona saturada encontram-se sob condições de pressão atmosférica normal, ou seja, livre (aquífero A da Figura 19).
- Aquífero Confinado – camada do aquífero que se encontra entre duas relativamente impermeáveis. A pressão, neste tipo de aquífero (aquífero B da Figura 19), é superior à atmosférica, devido ao peso das camadas litológicas sobrepostas.
- Aquífero Semiconfinado – trata-se de um tipo de aquífero intermediário, com presença de camadas confinantes relativamente permeáveis e de pequena espessura.
- Aquífero Suspenso – formado quando há acumulação de água acima do nível freático regional, formando um reservatório de extensão horizontal limitada (localização 3 da Figura 19).

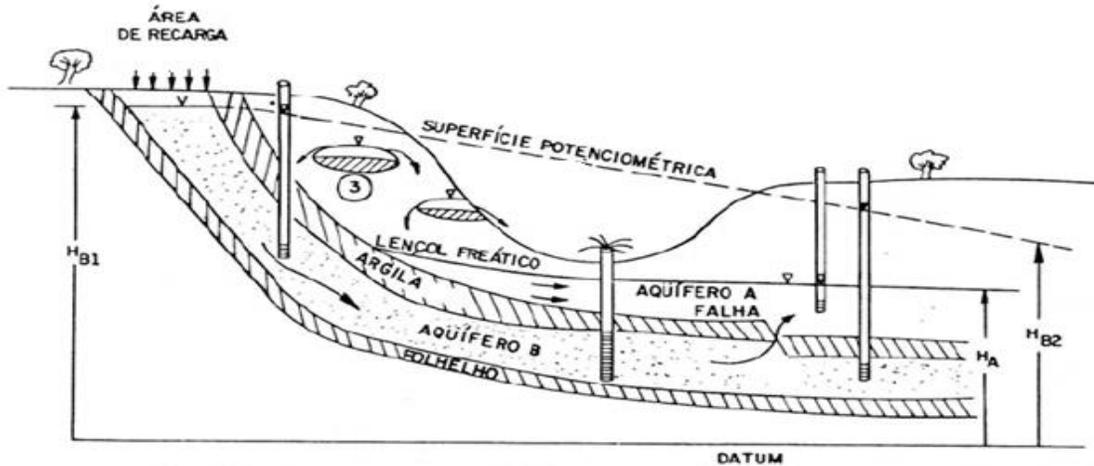


Figura 19. Tipos de Aquíferos (CLEARLY,1989).

Quanto aos tipos litológicos, os aquíferos são classificados em (BORGHETTI, 2004):

- Aquífero Poroso ou Sedimentar – formado por rochas sedimentares consolidadas e sedimentos inconsolidados. Sua ocorrência se dá em terrenos sedimentares e apresentam porosidade quase sempre homogênea, considerando, as macro-heterogeneidades dos depósitos sedimentares.
- Aquífero fraturado ou fissural – geralmente ocorre em rochas ígneas e metamórficas, podendo também ser encontrado em rochas sedimentares extremamente cimentadas. A capacidade de armazenamento de água nesses reservatórios está relacionada à ocorrência de fraturas.
- Aquífero Cárstico – associado ao processo de dissolução de rochas carbonáticas ou evaporíticas. A ocorrência de água neste aquífero está associada à presença de fraturas e/ou outras discontinuidades, derivadas de esforços exercidos sobre as rochas e dos processos de dissolução, que podem gerar cavernas e condutos subterrâneos capazes de transmitir quantidades significativas de água.

Na área de estudo, encontram-se os sistemas aquíferos do tipo poroso, livre e/ou confinado, formados por sedimentos não consolidados a consolidados, representativos da Formação Barreiras e do Membro Angico, da Formação Riachuelo. E o sistema aquífero cárstico, livre e/ou confinado,

constituído de rochas carbonáticas do Membro Maruim (Formação Riachuelo), e do Membro Sapucari, (Formação Cotinguiba). Nesta pesquisa, o objeto de estudo são os aquíferos cársticos representativos dos Membros Maruim (Formação Riachuelo) e Membro Sapucari (Formação Cotinguiba).

O carste possui características hidrogeológicas e geomorfológicas distintas e significativa heterogeneidade espacial e temporal. O desenvolvimento da dissolução da rocha nesses terrenos depende de aspectos hidrodinâmicos e físico-químicos. O processo de carstificação (dissolução) permite a geração de uma rede de condutos, desenvolvidos por conta da variação espacial da permeabilidade da rocha e potencial de infiltração, para os quais são direcionados os fluxos subterrâneos (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN,1999). Trata-se de um fenômeno condicionado a mudanças de fatores climáticos, morfológicos e geológicos. Assim, o modelo hidrogeológico conceitual do aquífero cárstico é necessário para determinar as heterogeneidades do meio e suas influências no direcionamento do fluxo.

Os aquíferos Sapucari e Maruim são classificados como cársticos. O primeiro apresenta alto gradiente hidráulico, e produtividade de maior destaque nos povoados Mussuca, Estiva e Machado, nos municípios de Nossa Senhora do Socorro e Laranjeiras. A vazão média dos poços nesse aquífero é de 99 m³/h.

A ocorrência de condutos no aquífero Maruim é menor, apresentando uma evolução de sistema com pequenas cavernas (CARVALHO JUNIOR, 2005). A vazão média nos poços do aquífero Maruim é de 20,6 m³/h.

O fluxo subterrâneo no aquífero Maruim exhibe feições típicas de circulação cárstica, desenvolvida ao longo de zonas fraturadas com geração de canais de magnitude não desprezível, evoluindo mesmo, em alguns casos, para cavernas (FEITOSA et al., 1998).

Outro aspecto importante corresponde às feições cársticas de superfície (cavernas), que coincidem com o direcionamento preferencial das falhas geológicas (NE-SW), e mergulho SE das

camadas carbonáticas. Isso possibilita a migração da água de superfície pelos espaços fissurais, sendo interpretadas como áreas de recarga (entradas de água) dos sistemas aquíferos Sapucari e Maruim.

REFERÊNCIAS

ANA. Agência Nacional de Águas. **Atlas Brasil de Abastecimento Urbano de Água**. Disponível em: <http://atlas.ana.gov.br/atlas>. Acesso em: 20 out. 2015.

ALVES, N. M. de S. **Análise geoambiental e socioeconômica dos municípios costeiros do litoral norte do estado de Sergipe**: diagnóstico como subsídio ao ordenamento e gestão do território. 2010. 348 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geografia, Geografia, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2010.

BORGHETTI, N. R.; BORGHETTI, J. R.; ROSA FILHO, E. F. Águas Subterrâneas. In: **Aquífero Guarani**. Curitiba, 2004. Disponível em: < <http://www.abas.org.br> > Acesso em: 20 mar. 2014.

CAMPOS NETO, O.P.A.; LIMA W.S.; CRUZ F.E.G. Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**, v.15, n. 2, p. 405-415, 2007.

CARVALHO JÚNIOR, A. L. P. **Hidrogeologia e Processos Cársticos nas Formações Muribeca, Riachuelo e Cotinguiba na Bacia SE/AL em Sergipe**. 2005. 146f. Tese (Doutoramento em Recursos Minerais e Hidrogeologia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

CENTRO DA TERRA. **Projeto Expedição Centro da Terra**: Conhecendo as Cavernas no Meio Ambiente. Aracaju, 2014.

CLEARY, R. W. **Águas Subterrâneas**. Ed. Marques-Saraiva. Clean Environment Brasil, Princeton Groundwater, INC, 1989. 112 p.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM) / SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (SEPLANTEC). Projeto Cadastro de Infraestrutura Hídrica do Nordeste – Estado de Sergipe. Aracaju: CPRM, 2002.

- CRUZ, L. R. **Caracterização tectono-estratigráfica da sequência transicional na sub-bacia de Sergipe**. 2008. 195 f. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008.
- DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection area using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology: International Journal of Geosciences**, v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.
- FEIJÓ, F. J. Bacia de Sergipe e Alagoas. **Boletim de Geociências da Petrobras**. Rio de Janeiro. V. 8, n.1, p. 149-161. 1994.
- FEITOSA, E. C. (Coord.) et al. **Avaliação dos Aquíferos da Bacia Sergipe/Alagoas entre Aracaju e Capela**. Recife: LABHID-Laboratório de Hidrogeologia CTG/UFPE.PETROBRAS, 175 p,1998.
- GARCIA, A.J.V (Coord) et al. **Caracterização Multiescalar em Reservatórios Carbonáticos Análogos da Bacia Sergipe-Alagoas** (Projeto Camures-Carbonato). São Cristóvão, SE. PETROBRAS/REDE CARMOD/UFS. 496p. 2015.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades**. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/v3/cidades/home-cidades>. Acesso em: 12 set. 2016.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**. 2008.
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Balanço hídrico e dados climatológicos**. Disponível em: www.inmet.gov.br. Acesso em 10 jan. 2016.
- LANA, M. C. **Bacia de Sergipe-Alagoas**. Origem e Evolução de Bacias Sedimentares, p.311-332, 1990.
- LAFLEUR, Robert. G. **Geomorphic aspects of groundwater flow**. Hydrogeology Journal, V.7, p. 78-93.

- SCHALLER, H. Revisão Estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobras**. V.12, n. 1, p. 21-86. 1969.
- LOUCKS, R. G. Paleocave Carbonate Reservoirs: Origins, Burial-Depth Modifications, Spatial Complexity, and Reservoir Implications. **AAPG Bulletin**, v. 83, 1795-1834 p,1999.
- PALMER, A. N. Origin and morphology of limestone caves. **Geological Society of America Bulletin**, v. 103, p. 1–21. 1991.
- REBOUÇAS, A. C.; FEITOSA, F. A. C.; DEMÉTRIO, J. G. A. Elementos de Hidrologia Subterrânea. In: GIAMPÁ, C. E.Q.; GONÇALES, V.G. (org). **Águas Subterrâneas e Poços Tubulares Profundos**. São Paulo: Editora Signus, 2006. 502p.
- SANTOS, R.A. dos; MARTINS, A.A.M.; NEVES, J.P. das; LEAL, R.A. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Sergipe**. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. CPRM: Codise. Brasília, 156p.
- SCHALLER, H. Revisão Estratigráfica da Bacia Sergipe-Alagoas. **Boletim Técnico da Petrobras**. V.12, n. 1, p. 21-86. 1969.
- SEMARH/PROJETEC/ TECHNE. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos de Sergipe- SEMARH/ Projetos Técnicos Ltda- PROJETEC/ Engenheiros Consultores Ltda- TECHNE. ELABORAÇÃO DOS PLANOS DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS DOS RIOS JAPARATUBA, PIAUÍ E SERGIPE- Diagnóstico Integrado da Bacia Hidrográfica do Rio Japaratuba. Aracaju-SE, 2010.
- SUPERINTENDÊNCIA DE RECURSOS HÍDRICOS DE SERGIPE (SRH). **Atlas Digital de Recursos Hídricos do Estado de Sergipe**. Aracaju, 2014. CD-Room.
- THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1. P. 55-94, 1948. Disponível em: <http://www.jstor.org>. Acesso em: 2 dez. 2015.

APÊNDICE C – DETALHAMENTO DOS MATERIAIS E MÉTODOS DE TRABALHO DESENVOLVIDOS

Os procedimentos metodológicos realizados na construção dos artigos/capítulos são apresentados de forma geral no fluxograma da Figura 1. As fases relacionadas aos trabalhos de pré-campo, campo e análises laboratoriais tiveram como objetivos, respectivamente:

- Pré-campo – fotointerpretação geológica, reconhecimento de feições cársticas, levantamento e cadastro de poços de captação de águas subterrâneas;
- Campo – amostragem de águas subterrâneas para análises físico-químicas e isotópicas;
- Análises laboratoriais – análises no Instituto de Tecnologia e Pesquisa de Sergipe (ITPS) e no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA/UFBA);
- Pós-campo – tratamento e processamento de dados.

Levantamento de dados, Fotointerpretação e Cadastro de Poços

Inicialmente, foram consultados os bancos de dados do: SIAGAS (CPRM), Companhia de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Irrigação de Sergipe (COHIDRO), e Companhia de Saneamento de Sergipe (DESO).

Com base nas ortofotocartas dos municípios litorâneos, escala 1:10.000 (SEPLAN-SE, 2003) e fotografias aéreas 1:50.000 (SEPLAG, 2012), foram realizados procedimentos de fotointerpretação geológica (Figura 2) para identificação de pedreiras, dolinas, contatos litológicos e fotolineamentos. Na identificação de fotolineamentos, foram aplicados procedimentos de sombreamento do relevo em SIG, em diferentes direções.

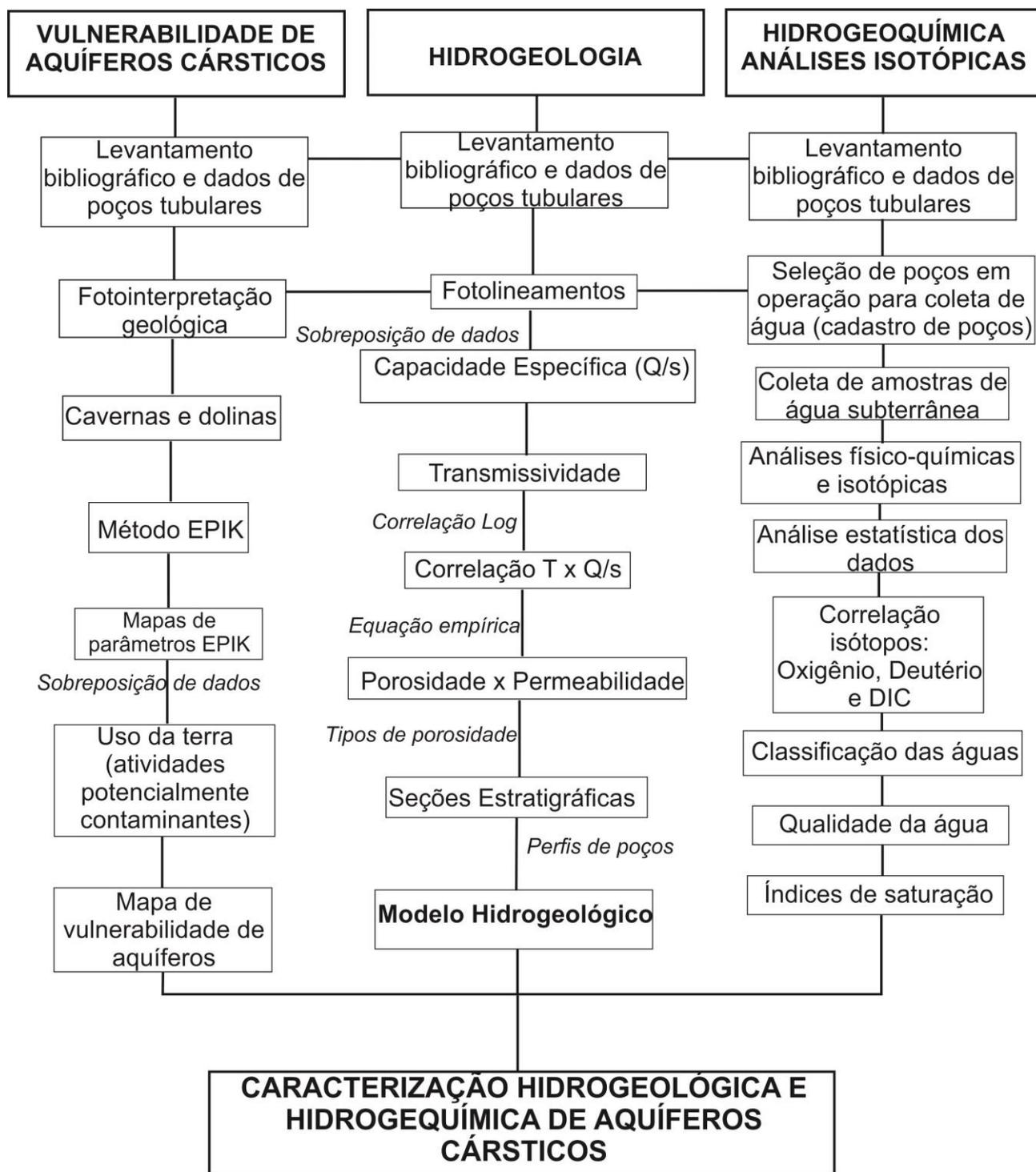


Figura 1. Fluxograma de desenvolvimento dos capítulos referentes à vulnerabilidade, hidrogeologia e hidrogeoquímica da área de estudo.

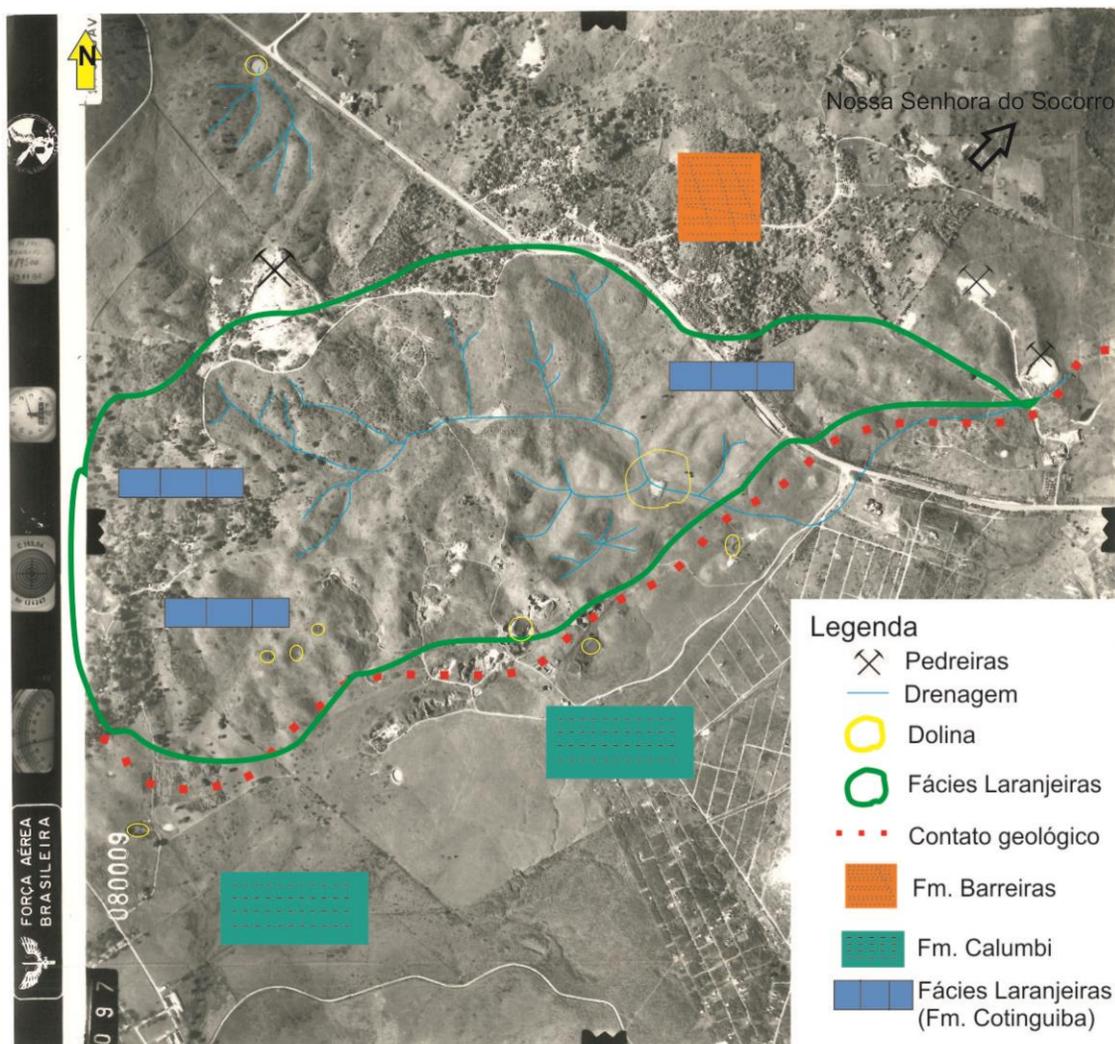
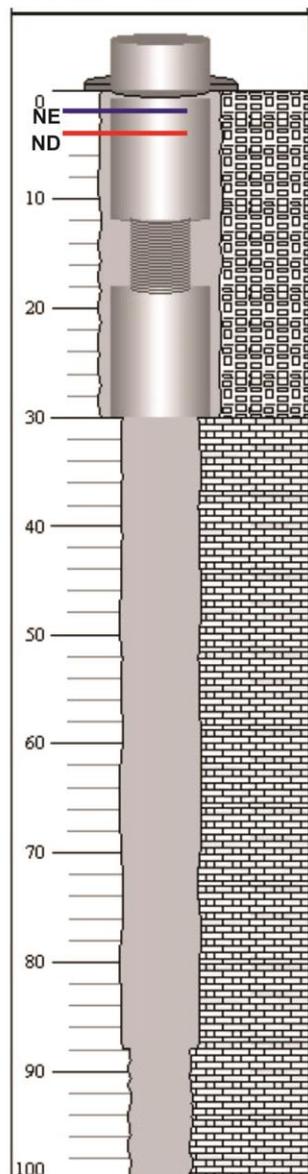


Figura 2. Procedimentos realizados na fotointerpretação geológica e posteriormente georreferenciados em ambiente SIG. Exemplo de imagem 1:50.000 de 1984, do município de Nossa Senhora do Socorro, Sergipe (reproduzido de Garcia et al., 2013).

Foram levantados, inicialmente, dados de 74 poços tubulares com informações sobre: profundidade, nível estático (NE), nível dinâmico (ND), e vazão (Q). A Figura 3 apresenta os perfis geológicos construtivos utilizados, extraídos da base SIAGAS (CPRM, 2014). Desses, 70 apresentavam perfis litológicos esquemáticos. Em 57 poços constavam dados hidroquímicos como: sólidos totais dissolvidos (STD), potássio (K), ferro total (Fe), sódio (Na), cálcio (Ca), magnésio (Mg), cloreto (Cl), sulfatos (SO_4), bicarbonato (HCO_3^-), dureza total e Ph.

POÇO: DESO 1- POVOADO MACHADO
MUNICÍPIO: LARANJEIRAS
AQUÍFERO: SAPUCARI

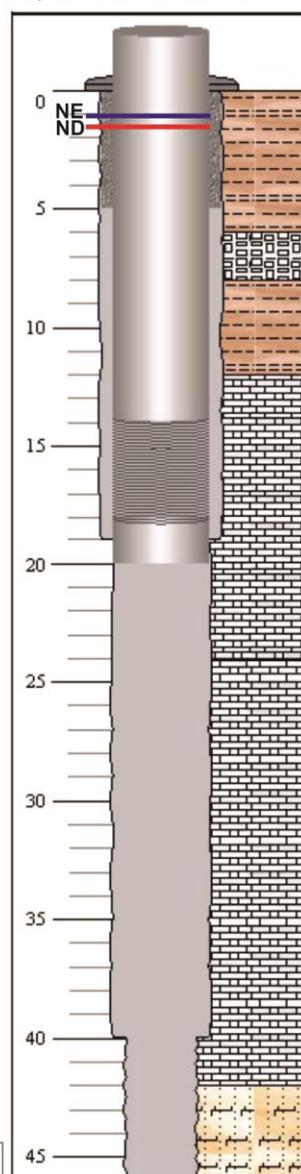


COORDENADAS:
X- 699216/ Y- 8802894
VAZÃO: 90m³/h
VAZÃO ESPECÍFICA: 145,16
m³/h/m

LEGENDA

 calcário alterado
 calcário
 argila
 arenito calcífero

POÇO: MAR98SE
MUNICÍPIO: MARUIM
AQUÍFERO: MARUIM



COORDENADAS:
X- 702463/ Y- 8812369
VAZÃO: 20,8 m³/h
VAZÃO ESPECÍFICA: 94,54
m³/h/m

Figura 3. Perfis construtivos de poços tubulares perfurados nos aquíferos Sapucari e Maruim. Fonte: SIAGAS (CPRM, 2014).

Com base nos dados disponíveis, o trabalho de campo foi realizado com objetivo de verificar a situação de poços (em operação ou paralisado) e cadastramento para posterior amostragem. Cerca de 20 poços apresentaram boas condições para amostragem de água subterrânea.

Trabalho de Campo

As campanhas foram realizadas em 3 etapas, entre maio de 2014 e agosto 2015. A primeira referente ao reconhecimento geológico; a segunda, ao cadastro de poços tubulares aptos à amostragem, e a terceira, à amostragem/coleta de água em 25 pontos, ou seja, 20 poços (Figura 4), 2 fontes, 1 lagoa, 2 rios (rio Cotinguiba e rio Sergipe). A coleta de água foi realizada em agosto de 2015.

Os parâmetros obtidos *in situ*, com a sonda Multiparâmetro, marca Horiba (Figura 5), foram: pH; Eh; temperatura; oxigênio dissolvido; condutividade elétrica; sólidos totais dissolvidos; salinidade; dureza total e turbidez.



Figura 4. Coleta água subterrânea no município de Nossa Senhora do Socorro (Coordenadas: X- 700737; Y- 8800194). Foto: Autora (2015).



Figura 5. Sonda Multiparâmetro utilizada no campo para aquisição de dados (STD, Temperatura, Salinidade, CE, Turbidez, Eh e OD). Fonte: <http://www.analyser.com.br/>

Coleta de água subterrânea

As instruções de coleta de água fornecidas pelo laboratório Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) definiram as orientações do processo de amostragem, que são baseadas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2012). Na coleta, adotaram-se os seguintes procedimentos:

- Acionar a bomba por 10 minutos antes da coleta;
- Realizar a coleta em um ponto ou torneira que recebe água diretamente do poço;
- Utilizar recipiente de polietileno ou poliuretano de 1,5 litro fornecido pelo ITPS;
- Lavar o recipiente da coleta 3 vezes com a água a ser coletada;
- Identificar o recipiente com etiqueta, contendo dados como: nome; identificação do item; data e hora da coleta;
- Transportar sobre refrigeração (sacos com gelo) e encaminhá-los ao laboratório o mais breve possível.

- Para as análises de óleos e graxas, foram utilizados frascos âmbar de 1000mL, fornecidos pelo laboratório.

Os parâmetros físico-químicos analisados no ITPS foram: bicarbonatos (HCO_3^-); carbonatos (CO_3); alcalinidade total (CaCO_3); cálcio (Ca); magnésio (Mg); sódio (Na); potássio (K); cloretos (Cl); sulfatos (SO_4); fluoreto Total (F); nitrogênio total (N); cobre (Cu); chumbo (Pb); zinco (Zn); cádmio (Cd); ferro total (Fe); manganês (Mn); alumínio (Al); silicatos (SiO_4); dureza total (CaCO_3); cor aparente (uH); fosfato reativo solúvel (P- PO_4).

Coleta de água para análise isotópica

A metodologia utilizada para coleta e preservação das amostras isotópicas de Oxigênio 18 ($\delta^{18}\text{O}$), Deutério (δD) e Carbono Inorgânico Dissolvido ($\delta^{13}\text{C}_{\text{CID}}$) foram seguidas de acordo com as instruções da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). As principais recomendações consistem em:

- Frascos âmbar de 100 mL (Figura 6) com tampas e botoques;
- Higienização dos frascos;
- Desenvolvimento do poço;
- Ambientar os frascos com a água a ser coletada;
- Encher recipiente, sem deixar vestígios de bolhas na superfície.



Figura 6. Frascos âmbar de 100 mL com tampas e botoques (amostras de isótopos). Foto: Autora.

Análises Laboratoriais

As análises de laboratório contemplaram as fases de preparação, decomposição, separação e análise instrumental dos principais elementos maiores, menores e traços presentes na água. Um total de 22 parâmetros foi analisado no laboratório do Instituto de Tecnologia e Pesquisa de Sergipe (ITPS).

O método da Cromatografia Iônica foi aplicado na determinação de cátions e ânions, e o método Titulométrico 2320B (APHA; AWWA; WEF, 2012) utilizado no cálculo de carbonatos e bicarbonatos.

Nas análises de óleos e graxas, realizadas em dois poços de postos de combustíveis, aplicou-se o método gravimétrico, 5520B do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2012).

Os parâmetros Cu, Pb, Zn, Cd, Fe total, Mn total e Al total foram determinados pela Espectrofotometria de Absorção Atômica. Esse método realiza a determinação qualitativa e quantitativa de metais, tendo como princípio a absorção de radiação ultravioleta por parte dos elétrons.

O programa Qualigraf (FUNCEME, 2014) foi aplicado para a classificação hidroquímica e qualidade das águas subterrâneas. O Diagrama Triangular de Piper (1944) permitiu a classificação das

águas. A qualidade das águas para a uso na irrigação foi determinada a partir do diagrama de Lemoine (1954). Na modelagem geoquímica foram utilizadas as ferramentas do software PHREEQC 2.0 de Parkhurst (1999) baseado no programa PHREEQE de Parkhurst et al. (1980).

A Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2014), que estabelece os valores máximos permitidos para os padrões de potabilidade da água, e a Resolução CONAMA nº 396/2008 (BRASIL, 2008), que dispõe sobre a classificação das águas, serviram como base para a determinação da qualidade das águas subterrâneas.

Metodologia de análises isotópicas

As análises isotópicas foram realizadas no Laboratório de Física Nuclear Aplicada da Universidade Federal da Bahia (LFNA/UFBA). A metodologia de análise utiliza o espectrômetro de massa MS Finnigan MAT Delta Plus e um reator automático (H-Device) para medir as razões $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e Deutério/Hidrogênio. As medidas foram realizadas em relação a um padrão internacional, segundo a equação 1.

Segundo Costa et al. (2007), para o controle de qualidade das análises, são utilizados padrões secundários, correspondentes a amostras com composição isotópica conhecida e referenciada em relação ao Vienna Standard Mean Ocean Water (VSMOW). O valor (δ) é dado em partes por mil, conforme a equação 1, e ajustado em relação a linha meteórica de Craig (1961):

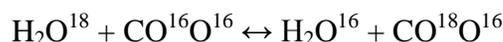
Equação 1:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{R \text{ amostra} - R \text{ padrão}}{R \text{ padrão}} \times 10^3$$

Onde R é a razão isotópica, entre os isótopos pesados e os mais leves, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e D/H (COSTA et al., 2007).

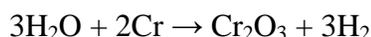
- Análise da razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ – a metodologia aplicada, desenvolvida por Epstein e Mayeda (1953), consiste no equilíbrio da reação entre o gás carbônico e a água ($\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$) numa temperatura de 25°C . A reação de equilíbrio isotópico ocorre segundo a equação 2. A composição isotópica do Oxigênio da amostra é dada pela equação 1.

Equação 2:



- Análise da razão Deutério/Hidrogênio – o método aplicado foi proposto por Brand et al. (1996). Esse método consiste na transformação da água em hidrogênio, reduzindo-a a 850°C com cromo metálico, através do aparelho H-Device, ligado ao espectrômetro de massa (TELES, 2014; COSTA et al., 2007). Uma fração correspondente a $1,0\ \mu\text{l}$ da água amostrada é injetada no reator, tendo como consequência a liberação do H_2 (Equação 3). O hidrogênio é conduzido para o espectrômetro de massas, onde é analisado em relação a um gás de referência do próprio H_2 .

Equação 3:



- Análise do $\delta^{13}\text{C}$ - Nas medidas de $\delta^{13}\text{C}$ foi aplicada a metodologia desenvolvida por Craig (1957), onde são utilizados $30\ \mu\text{l}$ de ácido fosfórico, em um recipiente com o gás He. Em seguida, é adicionada a água, deixando em equilíbrio por aproximadamente 18h. O CO_2 é colocado no espectrômetro de massas. Os valores de $\delta^{13}\text{C}$ (‰) são gerados em relação ao padrão internacional PDB (carbonato contendo fósseis de belemitas do Cretáceo da Formação Pee Dee, Carolina do Norte, EUA). A figura 7 mostra o equipamento Finningan GasBench utilizado na análise de carbono inorgânico dissolvido ($\delta^{13}\text{C}$).



Figura 7. Equipamento para Medidas de $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ - LFNA (Finningan GasBench). Foto:autora.

Metodologias para análise de vulnerabilidade de aquíferos (cársticos)

As metodologias de determinação da vulnerabilidade de aquíferos são aplicadas como ferramenta de apoio às propostas de proteção das águas subterrâneas, associadas a atividades de gerenciamento dos recursos hídricos e territorial.

Diversos métodos são utilizados na determinação da vulnerabilidade de aquíferos. Entre esses, os principais são: DRASTIC, GOD, TPE, Poluição dos Lençóis Aquíferos, Mapa de Vulnerabilidade dentre outros (HIRATA e REBOUÇAS, 2001). Existem também, adaptações dos métodos citados como o DRATLu (FRANCÊS et al., 2001), que corresponde a uma adaptação do DRASTIC (ALLER et al., 1987), e o GODS (CUSTODIO, 1995), que trata de uma adaptação do método GOD (FOSTER e HIRATA, 1988).

Para a determinação da vulnerabilidade de aquíferos cársticos são poucas as metodologias existentes, devido às dificuldades de determinar as heterogeneidades desses sistemas, como condutos e direcionamento de fluxo. Assim, três metodologias se destacam na análise da vulnerabilidade de aquíferos cársticos, são elas: COP (VÍAS et al., 2002); PI (GOLDSCHIEDER, 2002) e EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

O método COP (VÍAS *et al.*, 2002) foi desenvolvido para determinar a vulnerabilidade intrínseca de aquíferos cársticos a partir da definição e sobreposição dos seguintes *layers*:

Propriedades das camadas sobrepostas ao nível da água (O) – refere-se à proteção natural do aquífero, em função das características do solo e zona não saturada;

Concentração de fluxo (C) – refere-se a vulnerabilidade a contaminação onde a infiltração, através da zona não saturada, é difusa. Esse parâmetro indica o grau em que a proteção natural da zona não saturada se altera por condições de superfície que anulam sua capacidade de filtração (NOSSA, 2011).

É baseado nos métodos PI (GOLDSCHIEDER, 2002) e EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Precipitação (P) – Este fator inclui a quantidade de precipitação e os fatores que influenciam a taxa de infiltração.

O índice deste método é dado pela seguinte equação:

Equação 4:

$$COP = C * O * P$$

Os fatores são multiplicados e o índice varia entre 0 e 15, agrupados em cinco classes de vulnerabilidade: muito alta; alta; moderada; baixa e muito baixa.

O método PI, desenvolvido por Goldscheider (2002), aplica dois fatores na avaliação da vulnerabilidade de aquíferos cársticos: Cobertura de Proteção (P) e Condições de Infiltração (I).

O fator P é dado pela espessura e propriedades hidráulicas das camadas entre a zona não saturada e saturada. Essas camadas são identificadas como: parte superior do solo; parte inferior do solo; rochas não cársticas e rochas cársticas não saturadas (NOSSA, 2011). Os valores das classes de P variam de 1, indicativo de baixo grau de proteção e 5 para estratos mais espessos.

Já o fator I, considera valores 0 e 1, onde 0 a infiltração atravessa a cobertura de proteção, diretamente para o aquífero, e 1, a infiltração ocorre de forma difusa. O índice final é dado pela sobreposição de mapas representativos dos fatores P e I.

O método EPIK (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN,1999) consiste na classificação e atribuição de pesos em multiparâmetros, com sobreposição de dados geoespaciais e geração de um índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas. São utilizados quatro parâmetros/atributos: Epicarste (E); Cobertura de Proteção (P); Condição de Infiltração (I); Desenvolvimento de rede cárstica (K). Um multiplicador é atribuído a cada parâmetro, refletindo a relativa importância ponderada.

As classes presentes em cada parâmetro recebem valores, e são multiplicadas pelo respectivo peso e, em seguida, os produtos (mapas) são somados para se chegar a um valor final. Quanto maior a pontuação, maior é o grau de proteção da área, ou seja, menos vulnerável. No fim, o intervalo de pontuação numérica final é atribuído a classes de diferentes graus de vulnerabilidade. Os parâmetros EPIK são descritos da seguinte forma:

Epicarste (E): corresponde à zona de epicarste sob o solo consolidado. Baseia-se em estudos das formas cársticas presentes na área. Este parâmetro apresenta um alto nível de dificuldade para determinação das zonas de epicarste e conexão com rede cárstica (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Cobertura de Proteção (P): determinado a partir de mapas de uso da terra, de solos e fichas de descrição de poços de captação de águas subterrâneas (descrição de perfis litológicos). Esse parâmetro inclui tanto o solo (profundidade) como outras configurações geológicas, tais como: depósitos do quaternário (silte, sedimentos inconsolidados e detritos), e outras camadas não cársticas, por exemplo, argila e areia.

Condições de Infiltração (I): baseado na identificação de zonas de concentração da infiltração. Trata do tipo de recarga do aquífero cárstico, não sendo considerada em termos de quantidade e localização. A recarga é classificada em difusa ou concentrada.

Desenvolvimento de rede cárstica (K): O desenvolvimento da rede cárstica e seu grau de organização possuem grande influência na velocidade do fluxo da água. Como o mapeamento detalhado de redes cársticas não é possível na maioria dos casos, um único valor é comumente usado (DOERFLIGER; JEANNIN; ZWAHLEN, 1999).

Os pesos das classes de cada parâmetro desse método são descritos em detalhe no artigo de Vulnerabilidade de Aquíferos Cársticos. Nesta pesquisa, optou-se pela aplicação do método EPIK em função da disponibilidade de dados e compatibilidade com a escala de trabalho desenvolvida no objetivo geral da pesquisa.

REFERÊNCIAS

ALLER, L., LEHR, Jay H., PETTY, R. DRASTIC: A Standardized system of evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings. United States: EPA, 1987.

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for examination of water and wastewater**. 22nd ed. Washington: American Public Health Association. 1360 p. 2012.

BRAND, W. A. et al.. New methods for fully automated isotope ratio determination from hydrogen at the natural abundance level. *Isotopes. Environ. Health Stud.*1996, (32): 263-273.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução 396**, de 03 de Abril de 2008. Dispõe sobre a Classificação e Diretrizes Ambientais para o Enquadramento das Águas Subterrâneas e dá outras Providências. Disponível em: <http://conama.gov.br>. Acesso em: 20 abr.2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria Nº 2.914**, de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br>. Acesso em: 20 abr. 2014.

COSTA, A. B. et al. Avaliação do Padrão da Composição Isotópica de Águas na Bacia do Rio Joanes: Implicações para a Interação entre Águas Superficiais e Subterrâneas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 12, n. 3, p.211-219, set. 2007.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Sistema de Informação de Águas Subterrâneas – SIAGAS. Disponível em: <http://siagas.cprm.gov.br>. Acesso em: junho de 2014.

CRAIG, H. Isotope standards for carbon and oxygen and connection factors for mass spectrometric analysis of carbon dioxide. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. v.12. p.133-149, 1957.

CRAIG, H.; LAL, D. Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. **Science**, Washington, v. 133, n. 3456, p. 1833-1834, 1961.

CUSTODIO GIMENA, E. Consideraciones sobre el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la polución. In: II Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. **Serie Correlación Geológica # 11:99-122**. San Miguel de Tucumán: 1995.

DOERFLIGER, N.; JEANNIN, P.; ZWAHLEN, F. Water vulnerability assessment in karst environments: a new method of defining protection area using a multi-attribute approach and GIS tools (EPIK method). **Environmental Geology: International Journal of Geosciences**, v. 39, n. 2, p. 165-176, 1999.

EPSTEIN, S. & MAYEDA, T. Variations of O¹⁸ content of waters from natural sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**. 1953, (4):213-221p.

FOSTER, S. S. D.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk evaluation**: the methodology using available data. Lima: CEPIS/PAHO/WHO, 74 p, 1988.

FRANCÉS, A.; PARALTA, E.; FERNANDES, J.; RIBEIRO, L. Development and application in the Alentejo region of a method to assess the vulnerability of groundwater to diffuse agricultural pollution: the susceptibility index. In: **3rd International Conference on Future Groundwater Resources at Risk**, Lisboa (Portugal). 2001.

- FUNCEME (2014). **Qualigraf**. Disponível on-line em: <http://www3.funceme.br/qualigraf/>.
- HIRATA, R. REBOUÇAS, A. C. **La protección de los recursos hídricos subterráneos**: Una visión integrada, basada en perímetros de protección de pozos y vulnerabilidad de acuíferos. 2001. Disponível em: <http://www.medioambienteonline.com>. Acesso: 21 jun. 2010.
- GARCIA, A.J.V (Coord) et al. **Caracterização Multiescalar em Reservatórios Carbonáticos Análogos da Bacia Sergipe-Alagoas** (Projeto Camures-Carbonato- Segunda Etapa). São Cristóvão, SE. PETROBRAS/REDE CARMOD/UFS. 121p. 2013.
- GOLDSCHIEDER, N. **Hydrogeology and vulnerability of karst systems**: examples from the Northern Alps and Swabian. Alb. Ph.D. Thesis, Schr. Angew. Geol. Karlsruhe, Karlsruhe. 2002, 236p.
- LEMOINE B. Essai de Classification et de cartographie de la qualité chimique des eaux souterraines. **Bulletin du Bureau de Recherches Geologiques et Mineres**. Supplement, 1954. 77 p.
- NOSSA, T. C. B. **Avaliação da vulnerabilidade do aquífero cárstico Salitre - Bahia, através de análises hidroquímicas, isotópicas e aplicação da metodologia COP**. 2011. 252 F.. Tese (doutorado). Universidade Federal da Bahia. 2011.
- PARKHURST D. L., THORENSTON D.C. & PLUMMER N.L. PHREEQC - A computer program for geochemical calculations. **U.S. Geological Survey Water Resource Investigations**, 1980, 80-96, 210 p.
- Parkhurst D, Appelo C. A. J. Users's guide to PHREEQC (version 2): a computer program for speciation, batch reaction, onedimensional transport, and inverse geochemical calculations. **US Geol Surv Water Res Investig**. 310:99-4259, 1999.
- PIPER, A. M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis. **Transactions American Geophysical Union**, Washington, v. 25, p. 911-923, 1944.
- SEPLAN. Secretaria de Estado do Planejamento, Orçamento e Gestão de Sergipe. **Base Cartográfica dos Municípios Litorâneos**, 2003.

SEPLAG. Secretaria de Planejamento do Estado de Sergipe. **Banco de Dados Cartográfico do Estado** - Fotografias aéreas: FAB (1984). 2012.

VÍAS, J. M. et al. Proposed method for groundwater vulnerability mapping in carbonate (karstic) aquifers: the COP method. Application in two pilot sites in Southern Spain. **Hidrogeology Journal**. 2006, 14(6):912-925.

TELES, D. R. de S. **Origem e evolução de águas de formação em campos petrolíferos do nordeste brasileiro**. 2014. 105 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Orientações para Preparação do Artigo

O trabalho submetido para avaliação preliminar deverá ser submetido em programa Word for Windows ou compatível, fonte Arial, tamanho 12, espaçamento duplo, em papel A4, margens de 2,5 cm, sem numeração de páginas e ter, no máximo, 20 páginas, já incluindo figuras e tabelas. O documento deverá ter a numeração de linhas visível e contínua a partir do seu título, visando acelerar o processo de revisão pelos pares.

IMPORTANTE: O(s) nome(s) do(s) autor(es), sua(s) instituição(ões) e endereço(s) para correspondências **NÃO DEVEM CONSTAR** do texto, a identificação do trabalho será feita pelo preenchimento dos metadados da submissão e pelo número de identificação gerado automaticamente. Referências a publicação (ões) do(s) autor(es) dentro do texto ou na lista de referências devem aparecer somente como "AUTOR", de modo a garantir uma avaliação cega segura.

Serão aceitos trabalhos em Português, Espanhol e Inglês e serão publicados no idioma em que foi redigido originalmente. Os artigos deverão, obrigatoriamente, apresentar resumo em Português e Inglês. Além disso, caso o idioma escolhido não seja o Português, o título deverá obrigatoriamente ser apresentado secundariamente nesse idioma, sendo mantido o título original no idioma do artigo. O título do trabalho, com no máximo 140 toques, deverá aparecer na primeira página do trabalho, sem a identificação do(s) autor(es).

Antecedendo o texto serão apresentados dois resumos em Português e Inglês. Para trabalhos redigidos em Espanhol, o segundo resumo será em Português e o terceiro em Inglês. O resumo deverá ser redigido em parágrafo único, variando entre 1.000 a 1.500 toques, apresentando de forma breve e objetiva a justificativa do trabalho, os métodos utilizados, os resultados e as conclusões. Após o resumo, incluir obrigatoriamente uma lista de até cinco palavras-chave que expressem o assunto do trabalho.

O texto deverá ser redigido de forma impessoal, objetiva, clara, precisa e coerente. O título do trabalho, bem como os das tabelas e figuras deverão ser apresentados no idioma do trabalho e em Inglês. As abreviaturas deverão ser identificadas, por extenso, na primeira vez que aparecem no texto. As unidades das grandezas numéricas deverão obedecer aos padrões do Sistema Internacional de Unidades (SI).

As tabelas serão numeradas sequencialmente e inseridas normalmente dentro do texto. O título deve ser claro e conciso e colocado no topo da tabela. Outras informações relativas à tabela (origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da tabela, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal.

As figuras (mapas, fotos, perfis, esboços, gráficos, diagramas, etc.), devem ser numeradas sequencialmente. O título deve ser claro e conciso e colocado na base da figura. Outras informações relativas à figura (legenda, origem dos dados, observações, etc.), serão colocadas logo abaixo da figura, com espaçamento simples e fonte de tamanho menor que a do texto principal. As figuras devem ser preparadas em alta resolução (maiores que 1Mb). Para uma boa legibilidade, os símbolos e caracteres de texto das figuras devem ter tamanho mínimo de 1 mm, mesmo após a

redução da figura. As citações mencionadas no texto devem ser indicadas pelo sistema Autor-Data, obedecendo a norma ABNT NBR 10.520 (agosto/2002), ou a que estiver vigente.

ANEXO B – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ENVIRONMENTAL EARTH SCIENCES

Instructions for Authors

EDITORS-IN-CHIEF'S COMMENTS:

The publisher has now released a note with regard to China Maps that will be published in every issue of the journal. Therefore, we will not need to publish this rebuttal in the journal. The publisher's statement is as follows:

- Editorial Note

It has been brought to the attention of the editors of Environmental Earth Sciences (EES) that some readers may interpret the publication of certain Chinese maps referenced in EES as a political statement. This is not the case. EES's submission policy is clearly expressed in the authors' copyright transfer statements where authors warrant sole ownership of their paper, confirm that they have been authorized by any additional copyright owner to assign the right to publish the work, and assert that the article does not infringe any third party rights. Works published, therefore, reflect the individual views of the authors and are not the official point of view of EES, its Editorial Board or its Publisher. EES neither has a position with regard to any jurisdictional claims in the area of water that might be inferred from the maps, nor does EES have any vested interest in the details of the jurisdictional boundaries depicted. The published scientific results are the critical concern to the subscribers of EES.

MANUSCRIPT SUBMISSION

Manuscript Submission

Submission of a manuscript implies: that the work described has not been published before; that it is not under consideration for publication anywhere else; that its publication has been approved by all co-authors, if any, as well as by the responsible authorities – tacitly or explicitly – at the institute where the work has been carried out. The publisher will not be held legally responsible should there be any claims for compensation.

Permissions

Authors wishing to include figures, tables, or text passages that have already been published elsewhere are required to obtain permission from the copyright owner(s) for both the print and online format and to include evidence that such permission has been granted when submitting their papers. Any material received without such evidence will be assumed to originate from the authors.

Online Submission

Please follow the hyperlink “Submit online” on the right and upload all of your manuscript files following the instructions given on the screen.

Please note:

that **no authorship changes** are possible after submissions. The names and order of the authorship needs to be final.

Manuscript Processing

To submit manuscripts to Environmental Earth Sciences, go to website: <http://www.editorialmanager.com/enge> and upload all manuscript files. Files will automatically be converted to pdf format in the final process.

Authors who do not already have an account with EES will be asked to create a short user profile and given a unique password.

Manuscripts received are verified for formatting and topical focus and then submitted through the standard peer review process for scientific publishing. Times for review and consideration will vary. Calendar reminders will be sent to all parties to keep the review process on schedule.

It is very important that authors take the time to thoroughly review for grammar and spelling before submitting manuscripts. Please have a native English speaker provide a courtesy reading prior to submittal.

Papers should consist of no more than 7500 words and generally should contain no more than 8 figures.

If the study relates to a particular site or geographical location, please mention the geographical name including country in the paper title.

Please select 4 to 6 keywords from the subject classification list which can be used for indexing purposes.

Manuscripts should be submitted in Word. Use formal English. Do not use I, me, we, you.

Reviewers and editors may provide feedback in the form of comments and concerns to the author. Such information may should not be considered as personal criticism; it is part of the process of assuring that the best possible standards for scientific publishing are upheld.

When papers are accepted for publication, authors are provided a final proof directly from Springer. Please review this final proof document very thoroughly. Once published online, no further modifications will be possible.

Thank you for considering Environmental Earth Sciences.

Policy on Intellectual Dishonesty and Plagiarism

As a leading international scientific journal, the staff of Environmental Earth Sciences is deeply committed to the practice of intellectual honesty in all dealings. Infractions against generally acceptable standards for research and publication of results are taken very seriously.

Such infractions may include:

- Fabrication – the falsification of research or exaggeration or misrepresentation of data.
- Tampering – altering original data or documents or interfering with the examination of the same.
- Plagiarism – representing the thoughts, words, ideas, discoveries or data of another as one’s own original work. Plagiarism includes copying the work or part of the work of another, either published or unpublished, without giving a proper reference or citation.

Upon receiving report of a suspected offense of intellectual dishonesty, the editorial staff will commence an investigation within 30 days and make every attempt to conclude its findings within 60 days.

If after investigation, the allegation seems to raise valid concerns, the accused author will contacted personally and given an opportunity to address the issue.

The author’s failure to make satisfactory remedy or explanation may result in implementation of any or all of the following measures:

- If the article is still under consideration, it may be rejected and returned to the author.
- If the article has already been published online, an official disclaimer announcing that Environmental Earth Sciences is unable to support the research contained herein because of questions of plagiarism may be placed online next to the article.
- The author may be barred from publishing the results of any future studies in Environmental Earth Sciences.

Title Page

The title page should include:

- The name(s) of the author(s)
- A concise and informative title
- The affiliation(s) and address(es) of the author(s)
- The e-mail address, and telephone number(s) of the corresponding author
- If available, the 16-digit ORCID of the author(s)

Abstract

Please provide an abstract of 150 to 250 words. The abstract should not contain any undefined abbreviations or unspecified references.

Keywords

Please provide 4 to 6 keywords which can be used for indexing purposes.

Text Formatting

Manuscripts should be submitted in Word.

- Use a normal, plain font (e.g., 10-point Times Roman) for text.
- Use italics for emphasis.
- Use the automatic page numbering function to number the pages.
- Do not use field functions.
- Use tab stops or other commands for indents, not the space bar.
- Use the table function, not spreadsheets, to make tables.
- Use the equation editor or MathType for equations.
- Save your file in docx format (Word 2007 or higher) or doc format (older Word versions).

Manuscripts with mathematical content can also be submitted in LaTeX.

- [LaTeX macro package \(zip, 182 kB\)](#)

Headings

Please use no more than three levels of displayed headings.

Abbreviations

Abbreviations should be defined at first mention and used consistently thereafter.

Footnotes

Footnotes can be used to give additional information, which may include the citation of a reference included in the reference list. They should not consist solely of a reference citation, and they should never include the bibliographic details of a reference. They should also not contain any figures or tables.

Footnotes to the text are numbered consecutively; those to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data). Footnotes to the title or the authors of the article are not given reference symbols.

Always use footnotes instead of endnotes.

Acknowledgments

Acknowledgments of people, grants, funds, etc. should be placed in a separate section on the title page. The names of funding organizations should be written in full.

Citation

Cite references in the text by name and year in parentheses. Some examples:

- Negotiation research spans many disciplines (Thompson 1990).
- This result was later contradicted by Becker and Seligman (1996).
- This effect has been widely studied (Abbott 1991; Barakat et al. 1995a, b; Kelso and Smith 1998; Medvec et al. 1999, 2000).

The list of references should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should only be mentioned in the text. Do not use footnotes or endnotes as a substitute for a reference list.

Reference list entries should be alphabetized by the last names of the first author of each work. Order multi-author publications of the same first author alphabetically with respect to second, third, etc. author. Publications of exactly the same author(s) must be ordered chronologically.

- **Journal article**

Gamelin FX, Baquet G, Berthoin S, Thevenet D, Nourry C, Nottin S, Bosquet L (2009) Effect of high intensity intermittent training on heart rate variability in prepubescent children. *Eur J Appl Physiol* 105:731-738. <https://doi.org/10.1007/s00421-008-0955-8>

Ideally, the names of all authors should be provided, but the usage of “et al” in long author lists will also be accepted:

Smith J, Jones M Jr, Houghton L et al (1999) Future of health insurance. *N Engl J Med* 965:325–329

- **Article by DOI**

Slifka MK, Whitton JL (2000) Clinical implications of dysregulated cytokine production. *J Mol Med.* <https://doi.org/10.1007/s001090000086>

- **Book**

South J, Blass B (2001) *The future of modern genomics*. Blackwell, London

- **Book chapter**

Brown B, Aaron M (2001) The politics of nature. In: Smith J (ed) *The rise of modern genomics*, 3rd edn. Wiley, New York, pp 230-257

- **Online document**

Cartwright J (2007) Big stars have weather too. IOP Publishing PhysicsWeb. <http://physicsweb.org/articles/news/11/6/16/1>. Accessed 26 June 2007

- **Dissertation**

Trent JW (1975) *Experimental acute renal failure*. Dissertation, University of California

Always use the standard abbreviation of a journal’s name according to the ISSN List of Title Word Abbreviations, see

- **ISSN LTWA**

If you are unsure, please use the full journal title.

For authors using EndNote, Springer provides an output style that supports the formatting of in-text citations and reference list.

- **EndNote style (zip, 2 kB)**

- All tables are to be numbered using Arabic numerals.
- Tables should always be cited in text in consecutive numerical order.
- For each table, please supply a table caption (title) explaining the components of the table.
- Identify any previously published material by giving the original source in the form of a reference at the end of the table caption.
- Footnotes to tables should be indicated by superscript lower-case letters (or asterisks for significance values and other statistical data) and included beneath the table body.