



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

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**COMPORTAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DOS ISÓTOPOS  
DE RÁDIO E RADÔNIO E A QUALIDADE DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA  
DE LAGOA REAL, BAHIA.**

**ALINE DA COSTA NOGUEIRA**

SALVADOR

2018

**COMPORTAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DOS ISÓTOPOS  
DE RÁDIO E RADÔNIO E A QUALIDADE DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA  
DE LAGOA REAL, BAHIA.**

**Aline da Costa Nogueira**

*Orientador: Prof. Dr. Luiz Rogério Bastos Leal*

*Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Maria do Rosário Zucchi*

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

SALVADOR

2018

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Universitário de Bibliotecas (SIBI/UFBA),  
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Nogueira, Aline da Costa  
COMPORTAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DOS ISÓTOPOS DE RÁDIO  
E RADÔNIO E A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA  
REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA. /  
Aline da Costa Nogueira. -- Salvador, 2018.  
85 f. : il

Orientador: Luiz Rogério Bastos Leal.  
Coorientadora: Maria do Rosário Zucchi.  
Dissertação (Mestrado - Programa de Pós Graduação em  
Geologia) -- Universidade Federal da Bahia,  
Universidade Federal da Bahia, 2018.

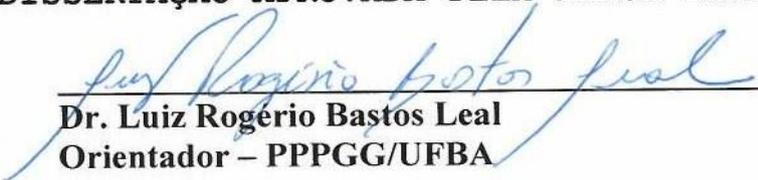
1. Hidrogeoquímica. 2. Urânio. 3. Rádio. 4. Radônio.  
5. Toxicidades. I. Leal, Luiz Rogério Bastos. II.  
Zucchi, Maria do Rosário. III. Título.

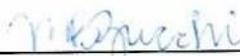
**ALINE DA COSTA NOGUEIRA**

**COMPORTAMENTO HIDROGEOQUÍMICO DOS ISÓTOPOS  
DE RÁDIO E RADÔNIO E A QUALIDADE DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA  
DE LAGOA REAL, BAHIA.**

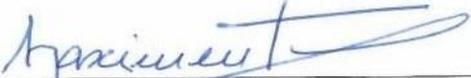
Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Ambiental, Hidrogeologia e Recursos Hídricos no dia 23 de novembro de 2018.

**DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Luiz Rogério Bastos Leal**  
Orientador – PPPGG/UFBA

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. Maria do Rosário Zucchi**  
Co-orientadora – Instituto de Física/UFBA

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Alexandre Barreto Costa – Instituto de Física/UFBA**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Sérgio Augusto de Moraes Nascimento – PPPGG/UFBA**

Salvador – BA  
2018

*“Cada pessoa deve trabalhar para o seu  
aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo,  
participar da responsabilidade coletiva por  
toda humanidade.”*  
*- Marie Curie.*

## **AGRADECIMENTOS**

De coração, espero agradecer a todos que passaram por essa minha jornada de 24 meses!

- Deus que é a inteligência Suprema do Universo.
- Aos meus pais Manoel e Maria do Carmo: vencedores e exemplos da minha vida;
- Aos meus irmãos Márcio e Marcos que além de serem meus queridos ainda me deram três preciosidades chamados sobrinhos: Diogo, Thiago e Isabela;
- Ao Serviço Geológico do Brasil, empresa onde trabalho e me concedeu a liberação parcial das atividades para me dedicar ao mestrado;
- Ao orientador Dr. Luiz Rogerio Bastos Leal, no apoio às atividades;
- A minha co-orientadora Dr.<sup>a</sup> Maria do Rosário Zucchi e a todos do laboratório de Física Nuclear por todo suporte, atenção e dicas de grande importância;
- Ao físico Zildete Rocha do CDTN/CNEN, que foi um ótimo professor na área de radioatividade além de dicas importantes;
- Ao querido Mota, que me auxiliou muito durante a etapa de campo;
- As geólogas Violeta de Souza e Alessandra Blaskowski pelo auxílio nas etapas iniciais;
- Aos geólogos Amilton Cardoso e Paulo Vittar pelo apoio e dicas imprescindíveis para coleta e preparativos para o campo;
- Ao geólogo Gustavo Carneiro por ter garantido a minha participação nas atividades iniciais;
- A todas as pesquisadoras do LAMIN/CPRM, em especial a Dr.<sup>a</sup> Ana Barandas por todo suporte e informações a cerca das análises;
- Aos meus queridos colegas da equipe do GATE/CPRM, em especial: Jorge Pimentel, Cássio Silva, Maria Angélica Barreto, Marcely Ferreira, João Luiz e Leandro Kuhlmann. Fica aqui meu obrigado especial a João pela grande ajuda na segunda etapa de campo e Leandro pela cooperação à distância;
- Ao geofísico Rodrigo Soares (Routo) que compartilhou e ajudou a interpretar os dados geofísicos da área;

Como eu sou muito abençoada por ter vindo para essas terras baianas, como presente, ganhei uma família muito querida. Então agradeço a todos e todas, em especial:

- As minhas amadas amigas-mães: Mabel, Madalena e Gisélia;
- As minhas irmãs do coração Milena e Lorena (e a lindinha Manu).
- À Vania Passos Borges por muitas vezes ter sido de amiga conselheira e/ou mãe baladeira!
- E, é claro, minha lobinha Shanti que é a fonte de paz e amor gratuito da minha vida.

De coração, muito obrigada a todos e todas!

## RESUMO

Com a crescente utilização de água subterrânea, são necessárias pesquisas que informem tanto a quantidade como a qualidade das águas para consumo humano. Os elementos radioativos de ocorrência natural são menos passíveis de controle, e podem oferecer maiores riscos à população pelo referido desconhecimento. Sendo assim, é proposto um estudo hidrogeoquímico dos isótopos de rádio  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  e do gás radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), na área inserida na Província Uranífera de Lagoa Real, que abrange os municípios de Lagoa Real e Caetitê, no centro-sul do estado da Bahia. A exploração de águas subterrâneas na região está associada a sistemas de fraturamentos formados a partir de múltiplas fases de deformação superimpostas. O urânio é um elemento instável que possui principalmente dois isótopos naturais  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ , que formam séries de decaimento radioativo, até atingir a sua forma mais estável. A partir da série do  $^{238}\text{U}$  são gerados, dentre outros elementos, o  $^{226}\text{Ra}$  e o  $^{222}\text{Rn}$ . O outro isótopo de rádio, o  $^{228}\text{Ra}$  é proveniente da série do  $^{232}\text{Th}$ . Durante a etapa de campo foram amostrados 22 poços de água subterrânea, respeitando as normas de coleta e armazenamento para análises químicas, incluindo os radionuclídeos rádio e radônio que são foco deste estudo. Parâmetros físico-químicos, que são determinantes para a qualidade da água foram medidos no local. Também foi coletada para análise isotópica de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ , e posteriormente acrescentaram-se dados históricos de precipitação como uma ferramenta comparativa entre esses dados. A classificação das águas pode ser compartimentada com relação ao substrato. Nas unidades que representam o embasamento arqueano, na sua maioria, como água bicarbonatada podendo ser sódica ou mista. Já nas rochas pertencentes ao Complexo Lagoa Real são, em sua maior parte, águas cloretadas podendo variar de sódica, cálcica ou mista. Para os resultados de urânio, os poços representados pelas siglas AC-14 e o AC-21 apresentam concentração de 0,10 mg/L e 0,03 mg/L, respectivamente e ultrapassam os valores máximos permitidos pelo CONAMA 396/2008 que é de 0,03mg/L. Para rádio-226, com uma concentração média de 0,52 Bq/l, sendo o poço AC-10 com 1,03 Bq/L, ultrapassa o limite estabelecido pelo CONAMA para potabilidade de água. Para rádio-228, concentrações em média de 0,91 Bq/L, e o valor máximo detectado na amostra AC-08 com 2,92Bq/L, sendo acima do limite em todos os poços amostrados. E por fim, para radônio, como uma concentração média de 184,5 kBq/m<sup>3</sup>, sendo o poço AC-08 com valores superiores ao medidor RAD-07 que é de 1187,2 kBq/m<sup>3</sup>. Isótopos de rádio são continuamente liberados para água subterrânea através do recuo alfa (*alfa recoil*) e sua mobilidade aumenta com a presença de elementos pertencentes à família dos alcalinos terrosos. O  $^{222}\text{Rn}$  não forma compostos químicos e ao ser formado no retículo cristalino é facilmente removido e mobilizado por difusão. Estes elementos são potencialmente prejudiciais à saúde humana e, ao entrar em contato com o organismo através da ingestão de água contaminada podem desenvolver alguns tipos de câncer devido às formas absorção e toxicidades relacionadas.

Palavras-chave: Hidrogeoquímica, Urânio, Isótopos de Rádio, Radônio, Toxicidades.

## ABSTRACT

Due to the increasing use of groundwater, research is needed to assess both the quantity and the quality of the water for human consumption. Natural radioactive elements are less controllable, and may pose greater risks to the population due to the lack of knowledge. Therefore, a hydrogeochemical study of the isotopes  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{228}\text{Ra}$  and of the radon gas in the area inserted in the Uraniferous Province of Lagoa Real is proposed, and covers the municipalities of Lagoa Real and Caetit , in the south-central part of the State of Bahia. The exploration of groundwater in the region is associated with fracture systems formed from multiple superimposed deformation phases. Uranium is an unstable element that has mainly two natural isotopes  $^{235}\text{U}$  and  $^{238}\text{U}$ , which form series of radioactive decay until it reaches its most stable form. From the  $^{238}\text{U}$  series are generated, among other elements,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{222}\text{Rn}$ . The other radioisotope,  $^{228}\text{Ra}$  is from the  $^{232}\text{Th}$  series. During the field camp, 22 wells of groundwater were sampled, in accordance with the collection and storage standards for chemical analyzes, including radionuclides radium and radon that are the focus of this study. Physicochemical parameters, which are determinants for water quality, were measured on site. It was also collected for isotopic analysis of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$ , and later historical rainfall data were added as a comparative tool between these data. The classification of the waters can be compartmentalized with respect to the substrate. In the units that represent the Archean basement, majorly, occurs bicarbonated water either sodic or mixed. In the rocks that belong to the Lagoa Real Complex are, for the most part, chlorinated waters occur and vary from sodic, calcic or mixed. For the uranium results, the wells represented by acronyms AC-14 and AC-21 have a concentration of 0.10 mg/L and 0.03 mg/L respectively and exceed the maximum values allowed by CONAMA 396/2008 which is of 0.03mg/L. For radio-226, with an average concentration of 0.52 Bq/L, the well AC-10 with 1.03 Bq/L, exceeds the limit established by CONAMA for water potability. For radio-228, mean concentrations of 0.91 Bq/L, and the maximum value detected in the sample AC-08 with 2.92Bq/L, being above the limit in all wells sampled. And finally, for radon, as an average concentration of 184.5 kBq/m<sup>3</sup>, the well AC-08 with values higher than the RAD-07 meter which is 1187.2 kBq/m<sup>3</sup>. Radio Isotopes are continuously released into groundwater through alpha recoil and their mobility increases in the presence of alkaline earth metal elements. The  $^{222}\text{Rn}$  does not form chemical compounds and when it is formed in the crystalline lattice it is easily removed and mobilized by diffusion and thus migrates easily through the cracks in the rocks. These elements are potentially harmful to human health and by contact with the body through the ingestion of contaminated water may develop some types of cancer due to absorption forms and related toxicities.

Keywords: Hydrogeochemistry, Uranium, Radioisotopes, Radon, Toxicities.

## SUMÁRIO

CAPÍTULO I- INTRODUÇÃO GERAL.....	4
CAPÍTULO II - ARTIGO 1: CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS DOS ISÓTOPOS DE RÁDIO E DO RADÔNIO NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.....	17
CAPÍTULO III - ARTIGO 2: A QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA COM ÊNFASE NA TOXICIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.....	41
CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES.....	64
APÊNDICE A - JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS AUTORES.....	69
APÊNDICE B – TABELAS DE CORRELAÇÃO.....	70
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA.....	72
ANEXO B - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO.....	76

# CAPÍTULO 1

## INTRODUÇÃO GERAL

---

Praticamente todos os países do mundo, desenvolvidos ou não, utilizam as águas subterrâneas como fonte para suprir suas necessidades. Segundo o relatório da Conjuntura de Recursos Hídricos no Brasil realizada pela ANA (Agência Nacional de águas) de 2013, a UNESCO estima que mais de 50% da população mundial poderia estar sendo abastecida pelo manancial subterrâneo. Além disso, informa também, que países como a Alemanha, Dinamarca e França atendem de 70 a 90% da demanda para o abastecimento público e que a cidade do México atende cerca de 80% da demanda dos quase nove milhões de habitantes. No Brasil as condições climáticas e geológicas permitem a formação de sistemas de aquíferos, sendo alguns deles de extensão regional, com potencial para suprir em quantidade e qualidade necessárias as mais diversas atividades. Ainda baseado neste relatório supracitado, aproximadamente 52% das cidades brasileiras utilizam águas subterrâneas sendo 39% totalmente abastecidas, ou seja, dependendo unicamente desta fonte de abastecimento e 13% parcialmente abastecidas, combinadas com águas superficiais. Aproximadamente 81 milhões de brasileiros utilizam água subterrânea nos principais usuários urbanos como hospitais, clubes, hotéis, condomínios e grande consumidores do setor de serviço.

A Província Uranífera de Lagoa Real constitui uma área de aproximadamente 1126km<sup>2</sup> localizada na região centro-sul da Bahia. Em 1977 ocorreu a primeira detecção da anomalia uranífera em decorrência da prospecção geofísica sistemática no qual chegou a trinta anomalias na área. Desse total, doze foram constatadas por radiometria autoportada e dezoito por levantamentos aerogamaespectrométricos

(Villaça e Hashizume, 1982). O Brasil possui atualmente a sexta maior reserva de urânio do mundo, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e estima-se que na Província Uranífera de Lagoa Real, uma das maiores do mundo ocorra uma reserva com 100.000 toneladas que supre a necessidade das Usinas Angra I, II e III. A exploração é feita pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil) desde o ano 2000, através de um processo de lixiviação do mineral britado.

A quantidade e, acima de tudo, a qualidade dos recursos hídricos disponíveis a população, deve ser alvo de avaliações e monitoramentos periódicos, que têm como alvo a garantia que a água consumida não forneça riscos à saúde humana. Esta pesquisa teve como objetivo principal a avaliação da qualidade das águas subterrâneas através da caracterização hidrogeoquímica do urânio, rádio e radônio em uma área inserida na Província Uranífera de Lagoa Real. A comparação com resultados obtidos anteriormente e a caracterização dos impactos que podem ocorrer na população local, por se tratar de elementos potencialmente danosos à saúde humana, também são alvos deste estudo.

#### Características da área de estudo

A área de estudo está localizada na região centro-sul da Bahia, inserida nos municípios de Caetité e Lagoa Real e está a 620 km de Salvador, aproximadamente. Caetité possui uma população estimada em 2017 de 52.853 habitantes e Lagoa Real de 16.029 (IBGE, 2018). Uma das fontes de renda da região é a mineração de urânio pela INB (Indústrias Nucleares do Brasil) que atua na cadeia produtiva do urânio, da mineração à fabricação do combustível e é vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação.

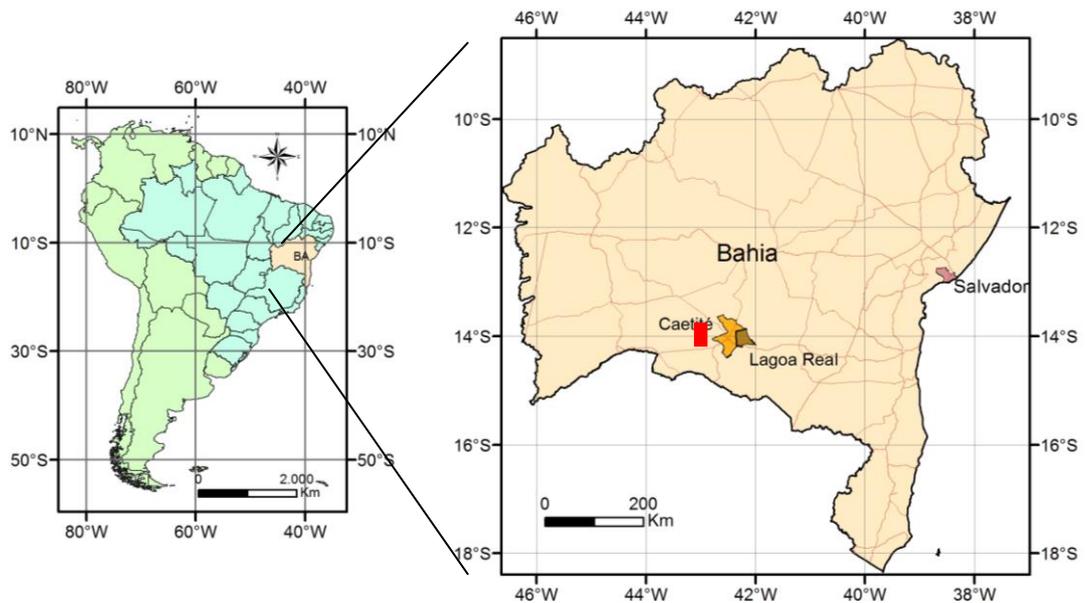


Figura 1: Mapa de localização dos municípios de Caetité e Lagoa Real, com a área de estudo destacada em vermelho. (Fonte: GEOSGB/CPRM).

Praticamente toda população urbana de Caetité, que é o maior município que abrange a área, é abastecido com água tratada pela Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A, a EMBASA. Entretanto, a população rural é abastecida por água proveniente de barragens, poços artesianos, cacimbas ou outros meios de captação de água. É importante mencionar que, segundo relatos, a população rural utiliza na maioria das vezes águas de poços artesianos como água para serviços domésticos e, para o consumo proveniente de carro pipa. Também foi informado que em alguns locais utilizavam essa água para subsidiar as plantações e, em épocas mais secas, para consumo.

A área é caracterizada por feições geomorfológicas bem concebidas. Segundo Costa *et al* (1985) é dividido principalmente em três feições distintas. Um relevo plano e elevado localmente conhecido como “gerais”, um relevo ondulado bastante acidentado e proeminente e um relevo arrasado correspondente às feições de pediplanização das rochas migmatíticas do embasamento cristalino.

O Complexo Lagoa Real, está situado no Cráton São Francisco no âmbito do Aulacógeno do Paramirim (Pedrosa-Soares *et al*, 2001) (figura 2). Costa *et al.* (1985) elucida que o embasamento, referido com Complexo Metamórfico-Migmatítico, é composto por granodioritos e tonalitos sendo estes predominantes em relação a dioritos e granitos. Cruz *et al.*, (2007) definiu a Suíte Intrusiva Lagoa Real, no qual pertence ao Complexo Lagoa Real, intrusivo nos gnaisses do Bloco Gavião e se relaciona com a primeira fase do rifte do Aulacógeno no final do Paleoproterozoico. É formado por granitóides (Granito São Timóteo) e álcali-gnaisses também deles derivados que são hospedeiras de albitos mineralizados em urânio. Oliveira (2006) interpretou que o controle das mineralizações é litotectônico e tem uraninita como principal mineral-minério.

#### Etapa de campo

Uma amostragem criteriosa é fundamental para que os valores sejam representativos, sendo assim buscou-se uma proporção de componentes da amostra da água que fossem iguais ao aquífero. Devido ao intervalo que existe entre a coleta das amostras e a realização das análises, foram adotados métodos específicos para preservação e armazenamento de amostras, como a filtragem e acidificação química da água. Esses métodos são padronizados para coleta de água subterrânea e tem a finalidade de evitar contaminação e/ou perda dos constituintes a serem examinados.

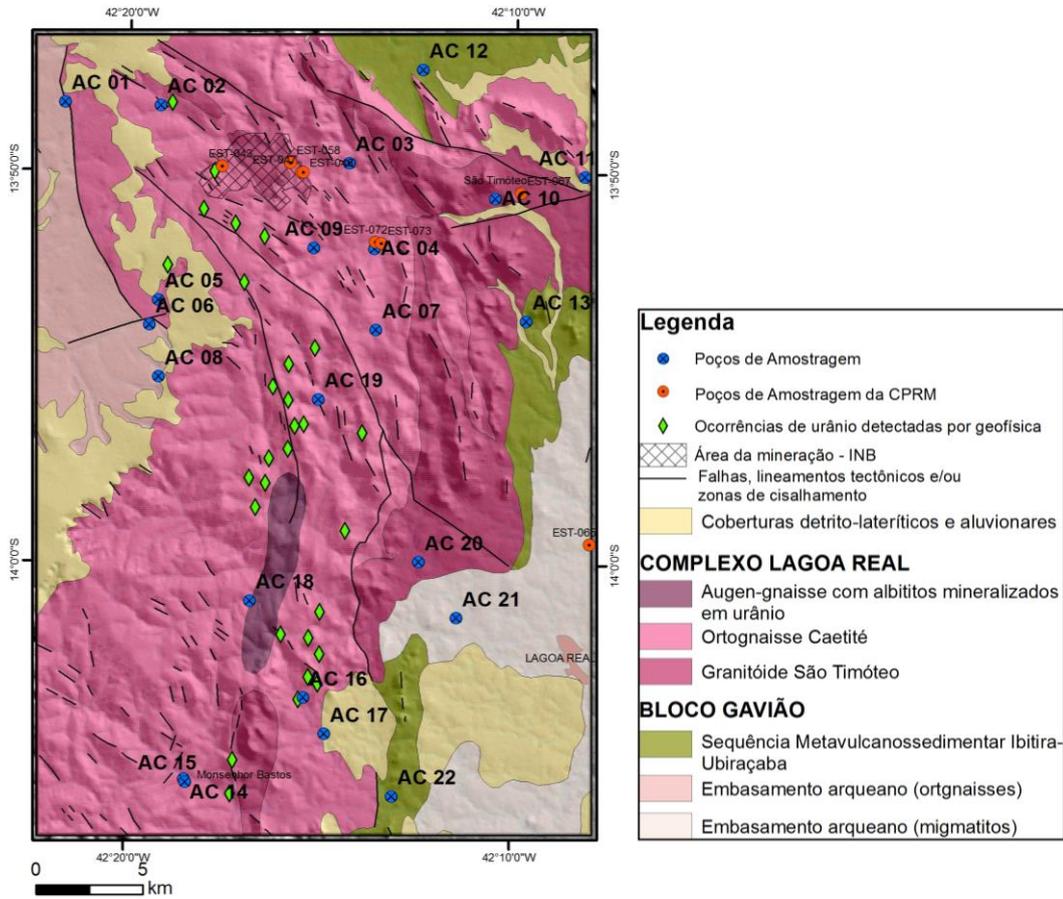


Figura 2: Mapa geológico da área de estudo com detalhe para os pontos de amostragem e de pesquisas anteriores e as anomalias de urânio detectadas. (Fonte: Projeto Mapas Geológicos Estatuais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1: 1.000.000. GEOSGB/CPRM)

No local foram amostrados 22 poços de água subterrânea, sendo a maioria destes perfurados pela CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia) e outros implantados por empresas particulares. Foram analisados os parâmetros físico-químicos e os seguintes elementos: Al, As, Ag, B, Ba, Be, Br<sup>-</sup>, Ca, Cd, Cl<sup>-</sup>, Co, Cr, Cu, F<sup>-</sup>, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Pb, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Sb, Se, Si, Sn, Sr, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ti, U, V e Zn; além dos radionuclídeos <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra e <sup>222</sup>Rn. A esse conjunto foram adicionados os resultados de urânio de oito poços provenientes de um trabalho realizado na CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, através do Programa Nacional de Pesquisa em Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM).

Durante a etapa de campo deste trabalho foram verificados dois poços lacrados no município de Lagoa Real, em virtude de apresentarem teores de urânio acima do limite estabelecido para consumo humano (figura 3).



Figura 3: Poços lacrados no município de Lagoa Real nas localidades de Barbeiro e Brejal, respectivamente.

As análises químicas que envolveram métodos analíticos instrumentais como o ICP-OES foi realizada na CPRM através da Rede de Análises de Água do LAMIM. As determinações dos isótopos de rádio e do radônio foram realizadas no Laboratório de Radioatividade Natural – LRN do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN), uma das Unidades de Pesquisa da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN).

#### Características dos radionuclídeos

A tabela periódica dos elementos é uma disposição sistemática dos elementos químicos ordenados por seus números atômicos, configuração eletrônica e recorrência das propriedades periódicas.

Para o entendimento da distribuição destes nuclídeos em água subterrânea e compreender como ocorre a sua mobilidade, convém determinar quais são os controles destes elementos através da análise dos elementos urânio e tório aos

quais encabeçam as séries radioativas naturais  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ . O elemento químico urânio está localizado no grupo 3B na Tabela Periódica, na série dos actínídeos e apresenta número atômico 92. É elemento instável que possui principalmente dois isótopos naturais  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ , que formam séries ou famílias de decaimento radioativo. O  $^{238}\text{U}$  torna-se estável após 14 transformações, sendo oito do tipo *alfa* e seis do tipo *beta*, até atingir o estável  $^{206}\text{Pb}$  (Bonotto e Silveira, 2006). Já na série do  $^{232}\text{Th}$  torna-se estável a partir de 10 transformações, sendo seis do tipo *alfa* e quatro do tipo *beta*, e gera o elemento estável  $^{208}\text{Pb}$  (figura 4).

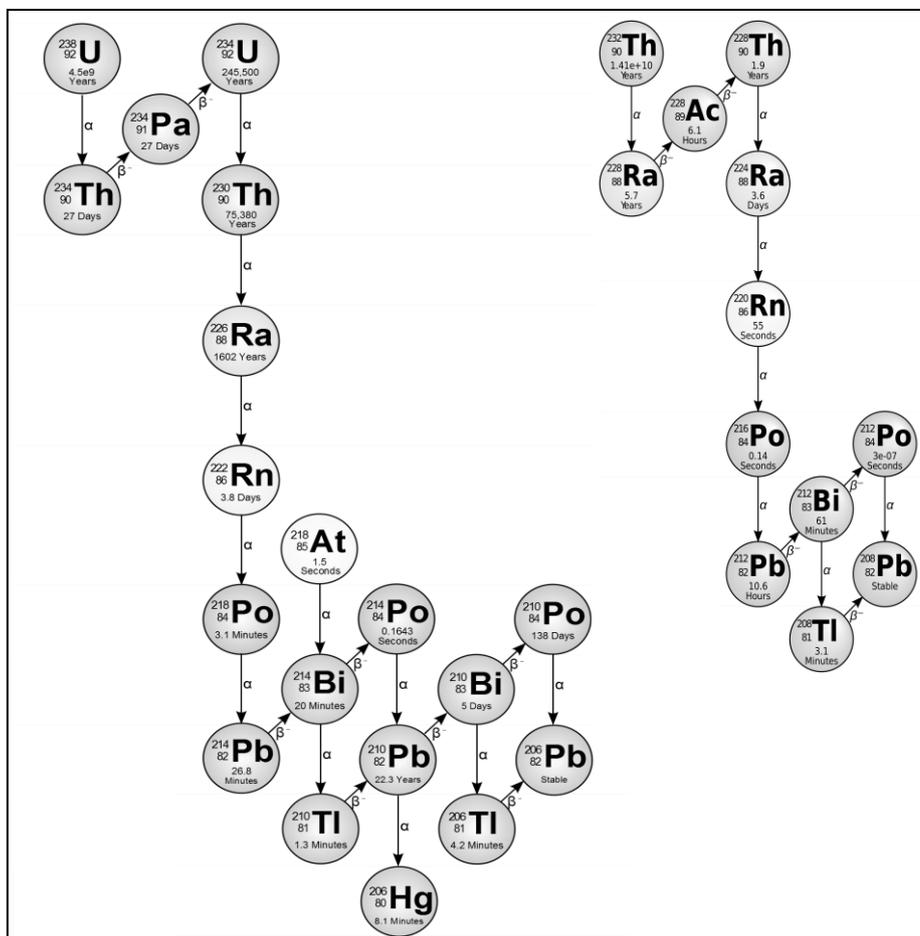


Figura 4: Séries de decaimento  $\alpha$  e  $\beta$  dos elementos  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  até atingir a estabilidade. (Fonte: <https://netnature.wordpress.com/2014/05/22/metodo-de-datacao-a-geologia-enterrando-a-terra-jovem/>, último acesso 11/12/2019).

O elemento químico urânio é um metal e encontra-se nas rochas da crosta terrestre na forma de minerais, por exemplo, a uraninita e a pechblenda. Dentre os

radionuclídeos naturais, ou seja, elementos que emitem radiação de origem terrestre, o  $^{40}\text{K}$  e os constituintes das séries do  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$  entram no corpo humano principalmente por ingestão de alimentos e de água (Silva, 2011).

O urânio está associado com atividades magmáticas que influenciam as suas mobilidades desde a formação da Terra. Segundo Bonotto e Silveira (2006) o urânio ocorre na natureza nos estados de valência 2+, 3+, 4+, 5+ e 6+, sendo com maior constância nos estados 4+ e 6+. Para as medidas do parâmetro pH entre 4 e 9 a uraninita (urânio tetravalente) é insolúvel em águas naturais. Em condições oxidantes o urânio hexavalente forma o íon uranila  $\text{UO}_2^{2+}$ , que é altamente solúvel e formam complexos estáveis com os ânions comuns dissolvidos em águas subterrâneas. Em condições ácidas, os principais complexos de uranila são formados com o fosfato e em condições alcalinas são formados com os carbonatos.

Isótopos de Rádio:  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$

O elemento químico rádio é um cátion alcalino-terroso (família 2A da tabela periódica), com propriedades químicas semelhantes ao cálcio, estrôncio e bário e ocorre principalmente como um dos quatro isótopos:  $^{223}\text{Ra}$ ,  $^{224}\text{Ra}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  (Langmuir e Riese, 1985). Embora esses isótopos sejam quimicamente similares, suas concentrações nas águas subterrâneas diferem nas propriedades químicas dos isótopos precursores das respectivas séries de decaimento. O  $^{226}\text{Ra}$  é o quinto produto de decaimento na série de decaimento  $^{238}\text{U}$ , tem meia-vida de 1620 anos e decai por emissão de partículas *alfa*. O  $^{228}\text{Ra}$  é o primeiro produto de decaimento da série do  $^{232}\text{Th}$ , possui meia-vida de 5,75 anos e decai pela emissão de partículas *beta*.

As concentrações naturais de rádio em águas subterrâneas podem variar numa faixa de valores entre 0,01 e 38 Bq/L (Gascoyne, 1989 apud Lauria, D. C. & Godoy

J. M, 2000), dependendo de fatores tais como: tipo de rocha do aquífero, condições físico-químicas do meio e tempo de contato. Em meios aquosos, o rádio é quimicamente reativo. Estudos laboratoriais têm mostrado que este elemento é facilmente adsorvido por minerais de argila, mas tem um padrão ainda mais forte da adsorção para óxidos hidratados de manganês e ferro (Szabo, 2012).

Radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ):

Pertence à família dos gases nobres, possui número atômico 86, pertence a série radioativa natural do  $^{238}\text{U}$ , sendo proveniente do decaimento direto do  $^{226}\text{Ra}$ . É o sexto produto de decaimento do  $^{238}\text{U}$ , tem meia-vida de 3,8 dias e também decai por emissão de partículas *alfa*.

Como é um gás inerte, o  $^{222}\text{Rn}$  não forma compostos químicos e ao ser formado no retículo cristalino do mineral que compõe o substrato é facilmente removido e mobilizado por difusão e, assim, migra com facilidade através das fissuras nas rochas, porosidade do solo e lençóis freáticos. Este processo é conhecido com *emanação* e é maior com a presença de água e é naturalmente maior com a dissolução das rochas matrizes. Nas áreas vulcânicas e na vizinhança de falhas tectônicas tendem a ter uma concentração mais alta de radônio (Jobbagy, 2016). Sua distribuição na água está relacionada com a litologia, estado geoquímico do meio, extensão da superfície de contato, pressão e temperatura (Sampa, 1978).

As unidades adotadas estão de acordo com o Sistema Internacional (SI) e são mg/L para os elementos químicos analisados, exceto o rádio e o radônio que estão em Bequerel (Bq), que são unidades próprias relacionadas as atividades dos radionuclídeos. Os isótopos de rádio estão em Bq/Kg e o radônio está em kBq/m<sup>3</sup>. Ambas fazem referência com Bq/L, visto que a densidade da água é igual a um e, assim, pode ser relacionado um quilo para um litro.

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde n°. 2914/2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade estabelecem como níveis de triagem os valores máximos de referência de 1 Bq/L para  $^{226}\text{Ra}$  e 0,1 Bq/L para  $^{228}\text{Ra}$ . Para radônio a agência americana USEPA (1999) utiliza como limite 300 pCi/L, ou seja, 11,1 Bq/L. A Organização Mundial da Saúde recomenda um nível de referência para 100 Bq/L (WHO, 2009), limite este adotado no trabalho. O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, tem como atribuições estabelecer normas, critérios e padrões relativos ao controle e à manutenção da qualidade do meio ambiente, com vistas ao uso racional dos recursos ambientais, principalmente os hídricos. Além disso, estabelece os Valores Máximos Permitidos (VMP) de substâncias dissolvidas em águas, tanto em rios quanto em águas subterrâneas. Foram consultadas as resoluções do Conama n°396 de 2008 para os outros elementos químicos analisados.

Esta dissertação é de grande relevância, pois dela provém dois artigos que abordam a questão da caracterização hidrogeoquímica dos radionuclídeos objetos deste estudo e a contaminação dos lençóis freáticos na região da Província Uranífera de Lagoa Real. Grande parte da população rural é abastecida por poços de captação de água subterrânea sem análise ou com análises químicas desatualizadas, embora esteja inserida em uma área que apresenta pontos de anomalias de urânio e que podem afetar a água desses poços, além de outros metais que também afetam a sua potabilidade. Segundo um estudo de Kurttio *et al* (2005), comprovou que a ingestão do urânio através da água potável pode alterar de forma significativa alguns indicadores bioquímicos de modelação óssea em seres humanos, o que caracterizaria a toxicidade do urânio no osso. Além disso, outros

radionuclídeos podem estar presentes na água. O  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  ao serem ingeridos em altas concentrações poderão causar um aumento significativo nos casos de câncer de bexiga, pulmão e tórax e possui comportamento análogo ao cálcio no organismo, fixando-se nos ossos, e assim podem desenvolver processos carcinogênicos (Lima, 1996). Há estudos divulgados que o radônio e seus filhos são a segunda causa de câncer de pulmão. Segundo Correa et. al (2015) o este elemento dissolvido na água é uma fonte de exposição humana, principalmente porque o gás pode ser liberado da água de torneira e chuveiros, sendo incorporado ao corpo humano através das vias respiratórias.

Esses artigos estão no formato de submissão para a Revista Brasileira de Águas Subterrâneas – ABAS. É uma revista de circulação nacional cuja temática é abordada nesta dissertação. Possui conceito CAPES B2, o que atende aos requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós Graduação em Geologia da UFBA. No ANEXO A, estão listadas as diretrizes para autores para a submissão de artigos na revista.

#### Referências

Agência Nacional de Águas, 2013. **Relatório da Conjuntura de Recursos Hídricos no Brasil**,

<[http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite\\_relatorioConjuntura/rojeto/index.html](http://arquivos.ana.gov.br/institucional/spr/conjuntura/webSite_relatorioConjuntura/rojeto/index.html)> último acesso em 16/10/2018.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas\\_par3\\_cap8.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap8.pdf) > ultimo acesso em 16/10/2018.

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.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA Nº 396/2008** - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 07/04/2008, Seção 1, páginas 64-68.

Bonotto, D.M. e Silveira, E.G. 2006 **Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais**. São Paulo: Editora UNESP, 160p, 2006.

Cruz, S.C.P et al. Geologia e arcabouço estrutural do Complexo Lagoa Real, Vale do Paramirim, Centro-Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.37, n.4 - suplemento, p.128-146, 2007.

Correa, J.N. et al. Monitoramento da radioatividade alfa relacionada ao radônio-222 em águas de poços da região metropolitana de Curitiba (PR). **Eng. Sanit.Ambient.** v.20 n.2 p243-250, abril de 2015.

Costa, P.H.O. et al. **Projeto Lagoa Real**: mapeamento geológico 1:25.000. Salvador: CBPM, 1985. 12v. Convênio NUCLEBRÁS - SME - CBPM.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/home.php>> último acesso em 17/10/2018.

Jobbagy, V. et al. A brief overview on radon measurements in drinking water. **Journal of Environmental Radioactivity** p.1-7, 2016.

Kurttio, P. et al. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. **Environmental Health Perspectives**, Durham, USA, v.113, n.1, p. 68–72, 2005

Langmuir, D., Riese, A.C 1985.The thermodynamic properties of radium. **Geochim. Cosmochim. Ac**, 49, pp. 1593-1601.

Lauria, D. C. & Godoy J. M. 2000. Origem e transporte de rádio nas águas subterrâneas de Buena (RJ). **Joint World Congress on Groundwater, I**. Fortaleza, Anais. Fortaleza,

Lima, R. A. Avaliação da dose na população da região urano-fosfática do Nordeste que utiliza os recursos hídricos da região. Tese (Doutorado) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, São Paulo, 1996.

Mapas Geológicos Estaduais: **Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000** - Fonte: GEOSGB/CPRM, último acesso em 19/10/2018.

Oliveira, J.E. Implicações de Radioelementos no Meio Ambiente, Agricultura e Saúde Pública em Lagoa Real, Bahia, Brasil. In: SILVA, C. R. et al. (Ed.) **Geologia Médica no Brasil**: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM; FAPERJ, 2006. p.148-156.

Pedrosa-Soares, A.C. et al. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, Amsterdam, v.1, n.4, p.307-323, 2001.

Sampa, M.H.O, 1978. Estudo e desenvolvimento de métodos analíticos para determinação da radioatividade natural das águas. São Paulo, 1978. Dissertação (Mestrado), **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**.

Silva, L.S. Avaliação da Radioatividade Natural em Águas Potáveis, de Superfície e Subterrâneas da Região de Caetité, BA. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado) - **Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares**, São Paulo, 2011.

Szabo, Z. et al. Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States. **Applied Geochemistry** 27 p.729–752, 2012.

USEPA, 1999. **United States Environmental Protection Agency**: National Primary Drinking Water Regulations; Radon-222 (1999).

Villaça, J.N.; Hashizume, B.K. Distrito uranífero de Lagoa Real: reservas e potencial. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 32, 1982, Salvador. Anais... Salvador: SBG, 1982. v.5, p,2048-2061.

WHO, 2009. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

## CAPÍTULO II

# ARTIGO 1 – CARACTERÍSTICAS HIDROGEOQUÍMICAS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.

---

### RESUMO

As águas subterrâneas apresentam-se com variadas características físico-químicas que são associadas às condições de dissolução das rochas e de circulação em subsuperfície. Na Província Uranífera de Lagoa Real ocorrem importantes mineralizações de urânio, e por essa razão são esperadas águas que contenham este elemento e seus filhos. Durante a etapa de campo foram amostrados 22 poços de água subterrânea. Através das análises de isótopos estáveis  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  observa-se que são águas características de locais que sofreram evaporação. As águas amostradas são classificadas majoritariamente como cloretadas, nos aquíferos inseridos no Complexo Lagoa Real e como bicarbonatada nas amostras situadas no embasamento arqueano. Em média, as concentrações de urânio são de 0,015mg/l, sendo a amostra AC-14 com 0,10 mg/L. Para rádio-226, com concentração média de 0,52 Bq/l, sendo mais concentrado no poço referente a amostra AC-10 com 1,03 Bq/L. Para rádio-228, concentrações em média de 0,91 Bq/L, e o valor máximo detectado na amostra AC-08 com 2,92Bq/L. E por fim, para radônio, como uma concentração média de 184,5 kBq/m<sup>3</sup>, sendo o poço AC-08 com valores superiores ao medidor RAD-07 que é de 1187,2 kBq/m<sup>3</sup>. Isótopos de rádio são continuamente liberados para água subterrânea através do recuo alfa (*alfa recoil*) e sua mobilidade aumenta com a presença de elementos pertencentes à família dos alcalinos terrosos. Por ser um gás, o radônio tem a facilidade de escapar por processo de difusão.

Palavras-chave: Água subterrânea, Hidroquímica, Urânio, Rádio, Radônio.

### ABSTRACT

Groundwater presents several physicochemical characteristics that are associated with the conditions of rock dissolution and water circulation in subsurface. In the area of the Uraniferous Province of Lagoa Real important uranium mineralizations occur, and for this reason water containing this element and its daughter nuclides are expected. During the field stage, 22 wells of groundwater were sampled. In addition, results from uranium analysis from the wells in previous surveys were considered. Through the stable isotope  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta\text{D}$  analyzes, it is observed that they are characteristic waters of sites that have been evaporated. The sampled waters are classified mainly as chlorinated, in the aquifers inserted in the Lagoa Real Complex and as bicarbonated in the samples located in the Archaean basement. On average, uranium concentrations are 0.015 mg/L, with the AC-14 sample being 0.10 mg/L. For radio-226, with an average concentration of 0.52 Bq/L, being more concentrated in the well referring to sample AC-10 with 1.03 Bq/L. For radio-228, mean concentrations of 0.91 Bq/L, and the maximum value detected in the sample AC-08 with 2.92Bq / L. And finally, for radon, as an average concentration of 184.5 kBq/m<sup>3</sup>, the well AC-08 with values higher than the RAD-07 meter is 1187.2 kBq/m<sup>3</sup>. Radio Isotopes are continuously released into groundwater through alpha recoil and their mobility increases with the presence of elements belonging to the family of alkaline earths. Because it is a gas, radon has the facility to escape by diffusion process

Keywords: Groundwater, Hydrochemistry, Uranium, Radium, Radon.

## INTRODUÇÃO

A água subterrânea é muito utilizada como fonte de abastecimento para suprir as necessidades humanas em grande parte do mundo. Com isso, são necessárias pesquisas que informem tanto a quantidade como a qualidade destas águas para consumo. As águas subterrâneas apresentam-se com variadas características físico-químicas que são associadas às condições de dissolução das rochas e de circulação em subsuperfície.

Algumas regiões são propícias a ocorrer contaminação por radionuclídeos, como urânio, rádio e radônio que podem ser de origem antrópicas ou naturais. O urânio está associado a atividades magmáticas e são encontrados nos principais minerais formadores de rochas. Por ser conhecida com umas das maiores províncias uraníferas do mundo, são esperadas águas com teores de urânio e seus elementos filhos acima da média de locais onde não existam essas ocorrências, em virtude da água dos aquíferos possuírem composição associada com as rochas hospedeiras. Quando no substrato geológico ocorre uma rocha cuja capacidade é de servir como depósito e de transmissor de água é denominado aquífero. Na região do Complexo Lagoa Real, por ser uma zona composta por rochas metamórficas, os aquíferos são do tipo fissurais e a recarga está ligada ao sistema de fraturamento (Costa, 2001). Esses aquíferos têm sua porosidade ligada diretamente as suas fissuras e outras descontinuidades, não sendo distribuída de forma homogênea. O armazenamento vai depender de fatores como a orientação e conectividade das falhas e/ou fraturas.

O objetivo principal desta pesquisa é o estudo hidrogeoquímico dos radioisótopos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  e do gás radônio em áreas inseridas na Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia e também a comparação com resultados obtidos em

pesquisas anteriores. Também foi proposto a avaliação da qualidade das águas subterrâneas.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

No contexto geológico regional o Complexo Lagoa Real situa-se na porção mais a norte do orógeno Araçuaí, cujos limites foram recentemente redefinidos baseados nos trabalhos de Cruz (2007). Estão localizadas na porção centro-sul do Estado da Bahia, nas proximidades dos municípios de Lagoa Real e Caetitê. Em sua porção setentrional, onde está inserida a área deste estudo, o arcabouço estrutural do Orógeno Araçuaí é marcado por um conjunto de zonas de cisalhamento a partir da interação entre duas unidades tectônicas: o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí (Cruz 2004, Cruz & Alkmim 2006) (figura 1). O seu substrato é constituído por gnaisses, migmatitos e sequencias vulcanosedimentares de idade arqueana-paleoproterozóica (Bastos Leal et al 1997). Costa et al. (1985) elucidam ainda que o embasamento referido como Complexo Metamórfico-Migmatítico, é composto por granodioritos e tonalitos sendo estes predominantes em relação a dioritos e granitos.

Este Complexo ígneo-metamórfico, constituído por meta-granitóides com idades em torno de 1,7 Ga (Turpin et al. 1988, Cordani et al. 1992), gnaisses e albititos, englobando também as rochas denominadas genericamente de Granitóide São Timóteo e um conjunto de granitoides milonitizados (Cruz et al 2007). Abriga uma importante mineralização de urânio com idade de formação em torno de 960 Ma (Pimentel et al 1994). Esta mineralização está hospedada em corpos lenticulares de albititos que, por sua vez, estão paralelizados com a foliação e lineamentos tectônicos regionais impressos nas rochas gnáissicas e guardam associação genética com os granitóides São Timóteo (Brito et al, 1984; Lobato et al 1990;

Sobrinho et al. 1980 Pimentel et al. 1994). Oliveira (2006) interpretou que o controle das mineralizações é litotectônico e tem uraninita como principal mineral-minério.

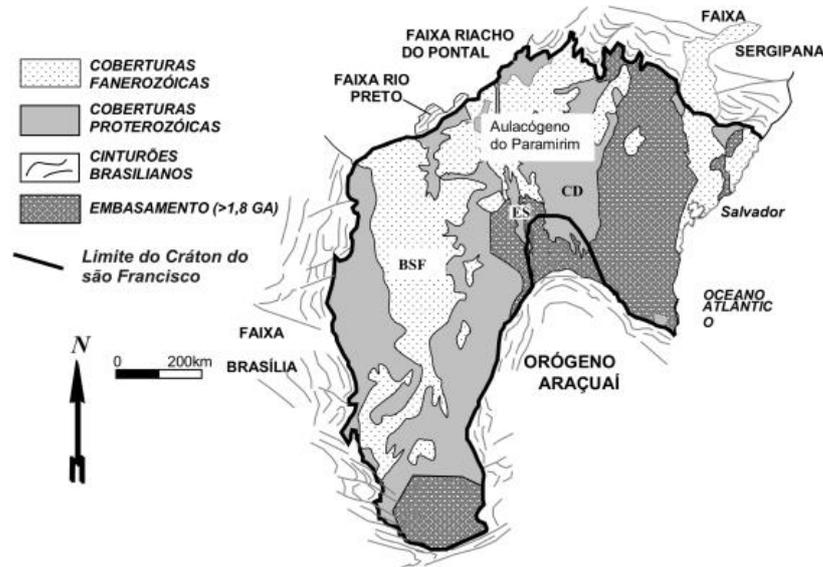


Figura 1: Compartimentos geológicos regionais e suas interações (modificado de Cruz et al. 2007).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa de campo ocorreu no início do mês de agosto de 2017 (estação seca) onde foram definidos 22 pontos de coleta, baseada nos poços implantados pela Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia – CERB e poços em áreas particulares. Principalmente na zona rural é muito comum a locação de poços tubulares para atender as necessidades da população. Resultados de análises de urânio em água subterrânea do banco de dados do projeto PGAGEM (Programa de Geoquímica Ambiental e Geologia Médica) coordenado pela CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais) também foram adicionados para eventuais comparações (Oliveira, 2006).

Uma amostragem criteriosa é fundamental para que os valores sejam representativos. Devido ao intervalo de tempo que existe entre a coleta das amostras e a realização das análises, foram adotados métodos específicos para preservação e armazenamento de amostras com a finalidade de evitar

contaminação e/ou perda de seus constituintes. Para esta pesquisa foram adotados os métodos de filtragem e acidificação química da água. Os parâmetros físico-químicos como temperatura, salinidade, condutividade, pH, oxigênio dissolvido (OD) e sólidos total dissolvidos (STD) foram analisados *in situ* através da sonda multiparâmetros *Horiba U52-G*. A medição destes parâmetros é determinante para estabelecer a qualidade da água.

#### Análise isotópica

Os isótopos são átomos que apresentam o mesmo número atômico e números de massa diferentes, onde cada um tem diferente número de nêutrons e por isso, apresentam massas atômicas diferentes. Os elementos apresentam isótopos estáveis e instáveis, sendo estes últimos os que possuem atividade radioativa. Os estáveis possuem composição ligada a variações de fracionamento, dependente da massa durante processos físicos e químicos (Santos 2013). As amostras da área de estudo foram entregues ao laboratório da Física Nuclear da Universidade Federal da Bahia, onde foram analisadas no espectrômetro da *PICARRO*, modelo *L2120-i*.

Os valores dos  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  correspondentes às precipitações mundiais distribuem-se sobre uma reta conhecida como Linha Meteórica Global (LMG) proposta por Craig (1961). Também foi acrescentado dados provenientes da IAEA (*International Atomic Energy Agency*) que fornecem um banco de dados de análises isotópicas em estações definidas (GNIP – *Global Network Isotopes Precipitation*) para investigações hidrológicas. A partir disso foram acrescentados e comparados com os dados da região de estudo.

#### Espectrometria de massa: ICP/OES;

A Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma (ICP OES) é uma ferramenta utilizada em larga escala e consiste em quantificar elementos (metais, semi-metais e

terras raras) em diversos tipos de amostras. Estas análises químicas foram disponibilizadas pela CPRM através da Rede de Análises de Água do LAMIM, que possuem equipamentos operando em rotina. Todas as análises foram baseadas nos métodos padrão para exames de águas e efluentes (*Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 1998).

Foram analisados os seguintes elementos: Al, As, Ag, B, Ba Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, U, V e Zn; através do equipamento *ICP-OES 7300 da Perkin Elmer*, respeitando as particularidades para análise de cada elemento. Para análise de ânions (fluoreto, cloreto, brometo, nitrato, nitrito, fosfato e sulfato) foi utilizado o Cromatógrafo Iônico *ICS 3000 – DIONEX*.

Os resultados analíticos dos isótopos de rádio e do radônio foram obtidos pelo Laboratório de Radioatividade Natural LRN do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN. Para  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  foi utilizada espectrometria gama com detector HPGe (*High Purity Germanium Detector*). Para determinação do  $^{222}\text{Rn}$  foi utilizado o equipamento Rad-7 da *Durridge Inc* que faz a degasagem em circuito fechado. A partir disso foi medida a concentração de radônio no ar e calculou a concentração de atividade na água através de uma equação de balanço e do coeficiente de partição, também chamado de coeficiente de distribuição. Este método é conhecido como deemanção de radônio.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

### Parâmetros Físico-Químicos

Para o parâmetro da condutividade elétrica foi detectado, em média, 1094,59  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e mediana de 967,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , sendo a maior medida no poço AC-20 com 3340,00  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e é classificada como água salgada. O pH é classificado com neutro

pois marca, em média, 7,07 até no máximo de 7,68. O parâmetro turbidez tem sua mediana marcando 0,0 NTU, já que em mais de 85% dos poços o valor medido foi zero. No entanto, no poço AC-14 foi medido o valor de 37,60 NTU, em razão da maior quantidade de materiais em suspensão neste poço. Para STD os valores de média e mediana são respectivamente 701,36 e 620,00 mg/L. No poço AC-20 foi detectado o valor máximo de 2140,00 mg/L. E por fim, para o OD os valores medidos foram, em média, 5,37 mg/L e sua mediana 5,13 mg/L. No poço AC-14 foi medido o valor máximo de 11,46 mg/L para OD.

### Diagrama de Piper

O Diagrama de Piper é comumente utilizado para classificação e comparação de diversos grupos de águas quanto aos íons dominantes, podendo ser cloretada, cálcica, carbonatada, magnésiana e sulfatada. A tabela 1 foi baseada nos resultados dos cátions e ânions em mg/L e suas respectivas classificações.

Tabela 1: Relação das amostras com os resultados dos elementos maiores e classificação da água. Os marcados com (\*) não possuem análises de alcalinidade, por esta razão não foram classificados no diagrama de Piper.

Amostras	Cátions				Ânions			Tipo de água	Classe da água
	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L	Ca <sup>2+</sup> mg/L	Mg <sup>2+</sup> mg/L	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/L		
AC-01	44,23	25,08	54,10	19,04	179,00	85,47	7,86	Água doce	Mista Bicarbonatada
AC-02	70,55	6,66	47,59	8,74	134,00	96,17	5,15	Água doce	Sódica Cloretada
AC-03	121,96	9,92	130,96	24,41	0,00	271,78	51,50	Água salobra	Mista Cloretada
AC-04	63,89	5,32	37,52	2,30	167,00	36,15	11,33	Água doce	Sódica Bicarbonatada
AC-05	20,90	12,86	18,64	6,46	42,20	53,59	2,91	Água doce	Mista Cloretada
AC-06	13,73	0,88	0,50	0,19	12,80	4,44	3,95	Água doce	Sódica Bicarbonatada
AC-07	49,38	4,45	39,97	2,30	0,00	34,30	12,99	Água doce	Sódica Bicarbonatada
AC-08	20,30	5,01	8,48	1,86	50,10	9,82	1,77	Água doce	Sódica Bicarbonatada
AC-09	95,64	6,97	69,57	2,26	0,00	70,60	72,52	Água salobra	*
AC-10	122,92	13,52	71,91	11,40	193,00	191,82	37,26	Água salobra	Sódica Cloretada
AC-11	147,53	18,83	146,76	33,72	0,00	444,80	53,83	Água salobra	*
AC-12	143,08	35,59	49,69	14,60	0,00	247,83	33,41	Água salobra	*

AC-13	21,97	4,18	20,28	3,55	0,00	14,97	2,36	Água doce	*
AC-14	117,23	18,93	124,98	15,12	275,00	222,86	24,63	Água salobra	Mista Cloretada
AC-15	249,89	15,24	113,89	12,71	0,00	374,48	44,41	Água salobra	*
AC-16	108,55	7,01	88,67	11,26	239,00	161,19	9,82	Água salobra	Mista Cloretada
AC-17	130,57	10,83	42,10	20,45	309,00	74,29	53,81	Água salobra	Sódica Bicarbonatada
AC-18	48,54	9,79	86,28	8,15	153,00	116,12	4,28	Água doce	Cálcica Cloretada
AC-19	108,22	6,83	66,86	4,41	0,00	170,15	16,06	Água salobra	Sódica Cloretada
AC-20	271,16	35,76	238,17	100,67	0,00	856,30	149,66	Água salgada	Mista Cloretada
AC-21	173,62	18,68	112,07	57,68	0,00	260,64	36,90	Água salobra	*
AC-22	247,92	13,77	93,11	80,75	424,00	315,74	204,97	Água salobra	Mista

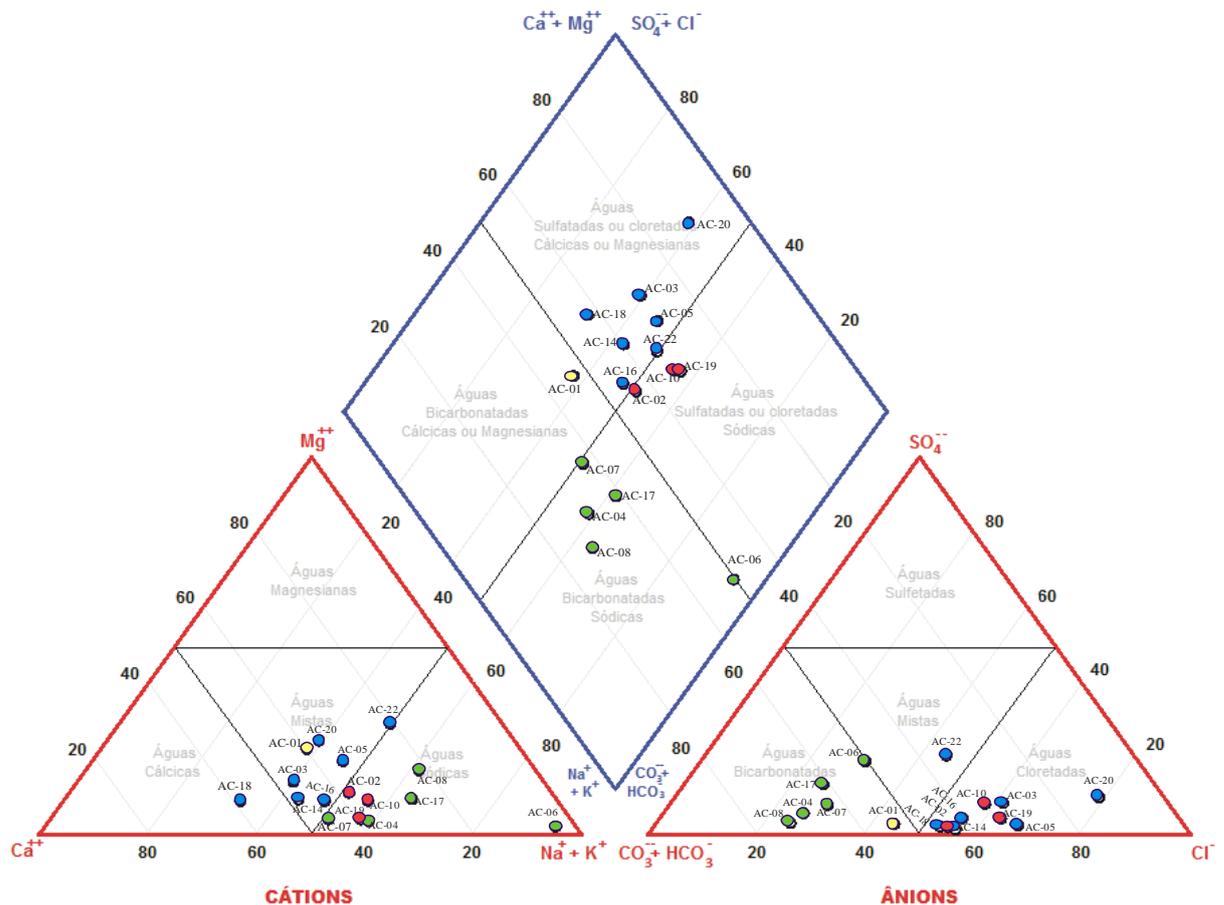


Figura 2: Diagrama de Piper das amostras de água subterrânea inserida na área, sendo representada por: esferas azuis as águas cloretadas; esferas vermelhas as águas sódica cloretadas; esfera amarela classificada como mista bicarbonatadas e as esferas verdes representando as águas sódicas bicarbonatadas.

Nas unidades que representam o embasamento arqueano é classificada, em sua maioria, como água bicarbonatada podendo ser sódica ou mista. Já nas rochas

pertencentes ao Complexo Lagoa Real são, em sua maior parte, águas cloretadas podendo variar de sódica, cálcica ou mista.

#### Análises Isotópicas

O conjunto de amostras possui um padrão semelhante entre elas, porém destacam-se as amostras AC-01 e AC-17 (figura 3a). Em virtude dos resultados encontrados de  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$ , indicam que são águas evaporadas, sendo a amostra AC-17 a água mais evaporada do conjunto. A equação da LMG é  $\delta\text{D} = 8,33 \delta^{18}\text{O} + 10,8$ , enquanto que da LEL é  $\delta\text{D} = 4,38 \delta^{18}\text{O} - 11,2$ . (Figura 3a). O valor de  $\delta^{18}\text{O}$  médio foi igual a -2,10, sendo o valor máximo 1,30 e mínimo de -3,10. O valor de  $\delta\text{D}$  médio foi -20,4, sendo máximo igual a 4,8 e mínimo - 24,0. A linha de evaporação local (LEL) tem um coeficiente angular menor do que a linha meteórica global (LMG) e do banco de dados da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA). Esses dados são provenientes de estações sobre eventos históricos de precipitação em vários locais ao redor do mundo, e foram utilizados os índices da precipitação de Salvador (IEAA, 2018). O posicionamento das amostras no diagrama está abaixo da Linha Meteórica Global, o que condiz com o clima local, de acordo com o padrão de evaporação da área. Este fato já era previsto considerando época da coleta (estação seca) e o lençol freático com influência de evaporação, que é corroborado pelas altas condutividades elétricas.

Uma outra ferramenta é o cálculo do excesso de deutério a partir da LMG. Esse dado fornece informações adicionais sobre o ciclo da água, como distância das fontes evaporativas que deram origem as chuvas. Para o excesso de deutério os resultados são, em média, de  $d = -3,65 \text{ ‰}$ , com valor máximo no ponto AC-18 ( $d = 3,9 \text{ ‰}$ ). O menor valor calculado ( $d = - 15,39 \text{ ‰}$ ) foi no poço AC-17, sendo o local onde ocorre maior perda evaporativa.

A Condutividade Elétrica (CE) está ligada diretamente a quantidade de sais dissolvidos na água. Ao plotar o  $\delta^{18}\text{O}$  versus CE (figura 3b) observa-se que na área não há uma correlação bem definida entre esses parâmetros, porém pode indicar o aquífero sendo influenciado pela evaporação, na maioria das amostras. Porém na AC- 01 e na AC-17, mesmo sendo as águas que mais sofreram evaporação, não influenciam o aumento da salinidade (CE) das águas desses poços.

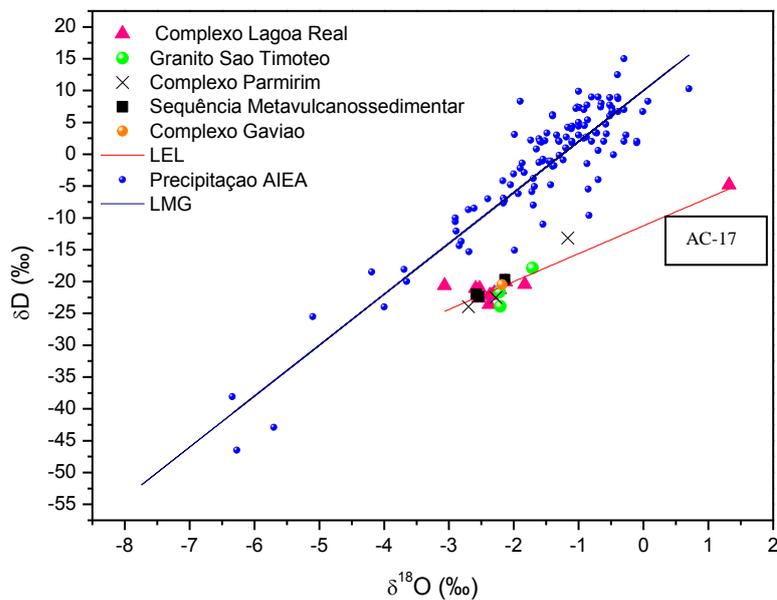


Figura 3a: Relação de  $\delta^{18}\text{O}$  com  $\delta\text{D}$  das amostras da área separadas por unidade geológica e dados históricos de precipitação local (AIEA).

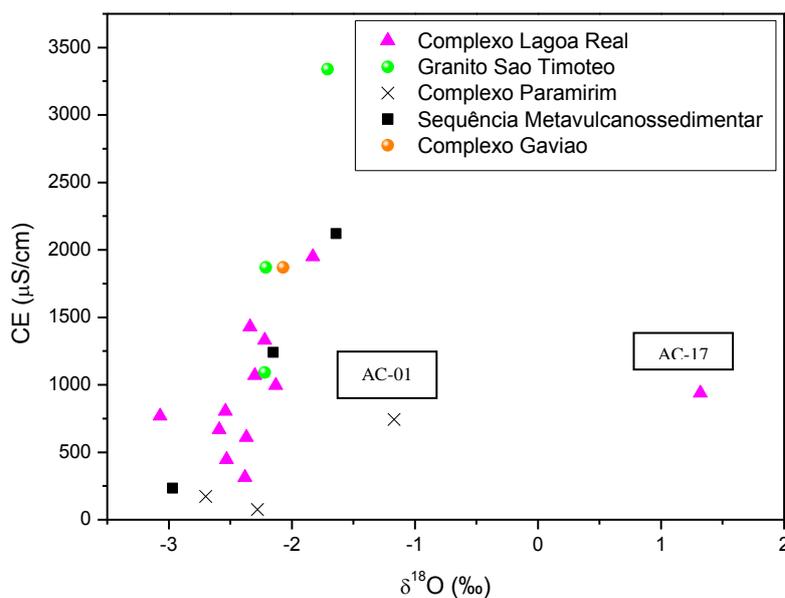


Figura 3b: Relação de  $\delta^{18}\text{O}$  com a Condutividade Elétrica (CE) das amostras da área separadas por unidade geológica.

Discussão dos resultados dos elementos radioativos:

A partir das análises laboratoriais foram organizados e relacionados os valores de parâmetros físico-químicos, isótopos estáveis, e análises químicas dos elementos radioativos das amostras com suas respectivas unidades litológicas no qual estão inseridas (Tabela 2). Essas unidades e as siglas utilizadas são: Complexo Paramirim (A3po), Complexo Gavião (A2gm) e Sequência Metavulcanossedimentar Ibitira-Uibiraçaba (A34iu), representando o embasamento arqueano; Corpo São Timóteo (PP4gamma\_It) e Suíte Intrusiva Lagoa Real (PP4\_gamma\_I1), pertencentes ao Complexo Lagoa Real e idade paleoproterozóica.

Tabela 2: Resultados das amostras provenientes de poços de água subterrânea nos municípios de Caetité e Lagoa Real.

Amostra	Localização		Sigla da unidade litológica	Parâmetros físico-químicos					Isótopos Estáveis			Elementos Radioativos				
	Latitude	Longitude		CE $\mu\text{S/cm}$	pH	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Turbidez	STD (mg/L)	OD (mg/L)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta\text{H}$ (‰)	d (‰)	U (mg/L)	$^{222}\text{Rn}$ ( $\text{kBq/m}^3$ )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)
AC - 01	784848	8472425	A3po	744,00	6,90	24,70	0,00	480,00	6,90	-1,2	-13,2	-3,8	0,01	389,20	0,71	0,86
AC - 02	789857	8472417	PP4_gamma_l1	667,00	6,90	25,90	0,00	430,00	5,17	-2,6	-21,1	-0,4	0,01	222,60	0,44	1,01
AC - 03	798621	8469357	PP4_gamma_l1	1430,00	6,88	27,30	0,00	910,00	4,11	-2,3	-22,1	-3,4	0,01	140,70	0,28	0,94
AC - 04	799883	8464984	PP4_gamma_l1	611,00	7,26	27,64	9,70	390,00	7,60	-2,4	-22,2	-3,2	0,01	64,70	0,70	0,59
AC - 05	789697	8463159	PP4_gamma_l1	314,00	6,30	24,80	0,00	200,00	5,08	-2,4	-23,6	-4,6	0,01	162,00	0,45	0,77
AC - 06	789175	8461853	A3po	76,00	6,20	25,60	0,00	50,00	6,10	-2,3	-22,5	-4,3	0,01	111,60	0,27	1,04
AC - 07	799817	8461784	PP4_gamma_l1	446,00	6,90	24,90	0,00	290,00	3,10	-2,5	-21,1	-0,8	0,01	32,10	0,60	0,32
AC - 08	788684	8458925	A3po	173,00	6,56	24,70	0,00	110,00	4,00	-2,7	-24,0	-2,4	0,01	1187,20	0,96	2,92
AC - 09	796882	8465417	PP4_gamma_l1	805,00	7,50	24,40	0,00	520,00	5,50	-2,5	-22,6	-2,3	0,01	90,50	0,43	0,71
AC - 10	805589	8467366	PP4_gamma_lt	1090,00	7,13	25,86	0,00	700,00	3,67	-2,2	-21,7	-3,9	0,01	91,10	1,03	2,46
AC - 11	810566	8468617	PP4_gamma_lt	1870,00	7,68	28,96	0,00	1190,00	7,56	-2,2	-23,9	-6,2	0,01	57,40	0,18	0,21
AC - 12	801598	8474322	A34iu	1240,00	7,20	28,50	0,00	800,00	5,26	-2,2	-22,0	-4,8	0,01	62,70	0,27	0,83
AC - 13	806910	8464348	A34iu	233,00	6,80	27,40	0,00	150,00	4,16	-3,0	-22,4	1,4	0,01	101,50	0,76	0,89
AC - 14	790926	8440291	PP4_gamma_l1	1330,00	7,39	25,15	37,60	850,00	11,46	-2,2	-21,3	-3,5	0,10	213,20	0,81	0,58
AC - 15	790966	8440209	PP4_gamma_l1	1950,00	7,15	26,47	0,00	1250,00	4,41	-1,8	-20,4	-5,8	0,01	105,40	0,39	0,61
AC - 16	796185	8444126	PP4_gamma_l1	1070,00	7,18	28,38	0,00	680,00	5,36	-2,3	-21,8	-3,4	0,01	103,30	0,74	0,78
AC - 17	797286	8442460	PP4_gamma_l1	939,00	7,45	27,05	0,00	600,00	4,95	1,3	-4,8	-15,4	0,01	83,90	0,47	0,58
AC - 18	793853	8448800	PP4_gamma_l1	768,00	7,12	25,35	0,00	490,00	7,84	-3,1	-20,6	3,9	0,01	108,60	0,23	0,54
AC - 19	797032	8457726	PP4_gamma_l1	995,00	6,99	22,47	3,10	640,00	6,15	-2,1	-20,0	-3,0	0,01	85,00	0,48	1,62
AC - 20	801728	8450628	PP4_gamma_lt	3340,00	7,33	26,67	0,00	2140,00	4,15	-1,7	-17,9	-4,2	0,01	239,60	0,46	0,69
AC - 21	803443	8448002	A2gm	1870,00	7,54	27,74	0,00	1200,00	3,63	-2,1	-20,5	-3,9	0,03	222,10	0,49	0,38
AC - 22	802250	8439352	A34iu	2120,00	7,09	27,37	0,00	1360,00	1,96	-1,6	-19,7	-6,6	0,01	185,20	0,38	0,59

## Urânio

O comportamento geoquímico do urânio vai depender de alguns fatores que afetam a sua distribuição nas águas naturais, sendo eles: teor de urânio na rocha matriz, tempo de residência do urânio no ambiente, variação climática, pH e presença de matéria orgânica (Bonotto & Silveira 2006). O urânio ocorre na natureza, em maior constância, nos estados de valência de 4+ e 6+ e a presença da matéria orgânica produz uma relação importante nas reações de adsorção de urânio. Para as medidas do parâmetro pH entre 4 e 9 a uraninita (urânio tetravalente) é insolúvel em águas naturais. Em condições oxidantes  $U^{6+}$  forma o íon uranila ( $UO_2^{2+}$ ) que é altamente solúvel e forma complexos estáveis com os ânions comuns dissolvidos em águas subterrâneas. Em condições ácidas, os principais complexos de uranila são formados com o fosfato e em condições alcalinas são formados com os carbonatos.

No Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Pela Resolução 396 de 2008 do Conama, o limite aceitável deste elemento para consumo humano é de 0,015 mg/L. Pelo WHO (Organização Mundial da Saúde de 2018) é 0,03 mg/L. Como este último expressam os valores mais recentes na literatura, foi adotado como limítrofe para as amostras analisadas.

Na tabela 2 observa-se que este elemento possui valores baixos sendo próximo ou no limite de detecção informado pelo laboratório. Apesar disso, em duas amostras foram detectados valores mais elevados que o limite aceitável para águas de consumo humano. Apresentam valores médios de 0,015 mg/L com mediana de 0,010 mg/L já que mais 85% dos poços possuem esse valor. Entretanto, o poço AC- 14 localizado na comunidade de Monsenhor Bastos, e que atende a população local como água para

serviços domésticos, foi mensurado 0,10 mg/L. O poço AC-21 possui um ligeiro aumento na concentração de urânio com valor medido de 0,03mg/L, no limite que a legislação permite. Este poço, que na época da amostragem atendia uma pequena plantação, estava lacrado durante a última visita em junho de 2018. Segundo moradora, este poço foi lacrado em virtude da análise realizada pela prefeitura local que afirma que o teor de urânio na água está acima do permitido.

Oito poços de água subterrânea referentes ao programa PGAGEM/CPRM realizado em junho de 2004, e que estão implantados na área de estudo e com dados de teores de urânio foram adicionados ao banco de dados (tabela 3). Esses poços que estão, na maioria, nas imediações da mineração de urânio possuem teores elevados deste elemento, sendo em média 0,13 mg/L e mediana 0,07 mg/L. O menor valor encontrado foi de 0,02 mg/L na Estação-065, que está localizada no embasamento arqueano. O valor máximo foi encontrado na Fazenda Juazeiro (Estação-072), que chega a 0,57 mg/L. Esse valor é cerca de 20 vezes maior que o limite estabelecido. Quando são comparados os resultados do PGAGEM com os resultados deste trabalho é notado uma grande diferença entre esses valores. Isso pode ser explicado porque poços em aquíferos fissurais podem apresentar características diferentes, mesmo sendo próximos em virtude das falhas (ou fraturas) estarem com ou sem comunicação com as áreas adjacentes. Por exemplo, isso ocorre na localidade de São Timóteo e Monsenhor Bastos que possuem resultados analíticos distintos embora bem próximos. Além disso, esses valores mais altos podem ser originados a partir de uma rocha mineralizada em urânio a montante desse poço, que pode estar mobilizando esse elemento para esses determinados poços. Na figura 4 foram plotados os pontos

referentes à amostragem no mapa geológico da área com os teores de urânio especificados.

Tabela 3: Teores de urânio referentes às amostras do PGAGEM.

Estação	Área-alvo	Latitude	Longitude	Urânio (mg/L)
EST-043	Complexo Minerio-Industrial INB	792554	8469283	0,03
EST-047	Complexo Minerio-Industrial INB	796258	8468982	0,16
EST-048	Complexo Minerio-Industrial INB	796349	8468982	0,04
EST-058	Complexo Minerio-Industrial INB	795749	8469438	0,04
EST-072	Fazenda Juazeiro	799705	8465694	0,57
EST-073	Fazenda Juazeiro	799993	8465635	0,11
EST-065	Lagoa Real	809690	8451388	0,02
EST-067	São Timóteo	806517	8467984	0,10

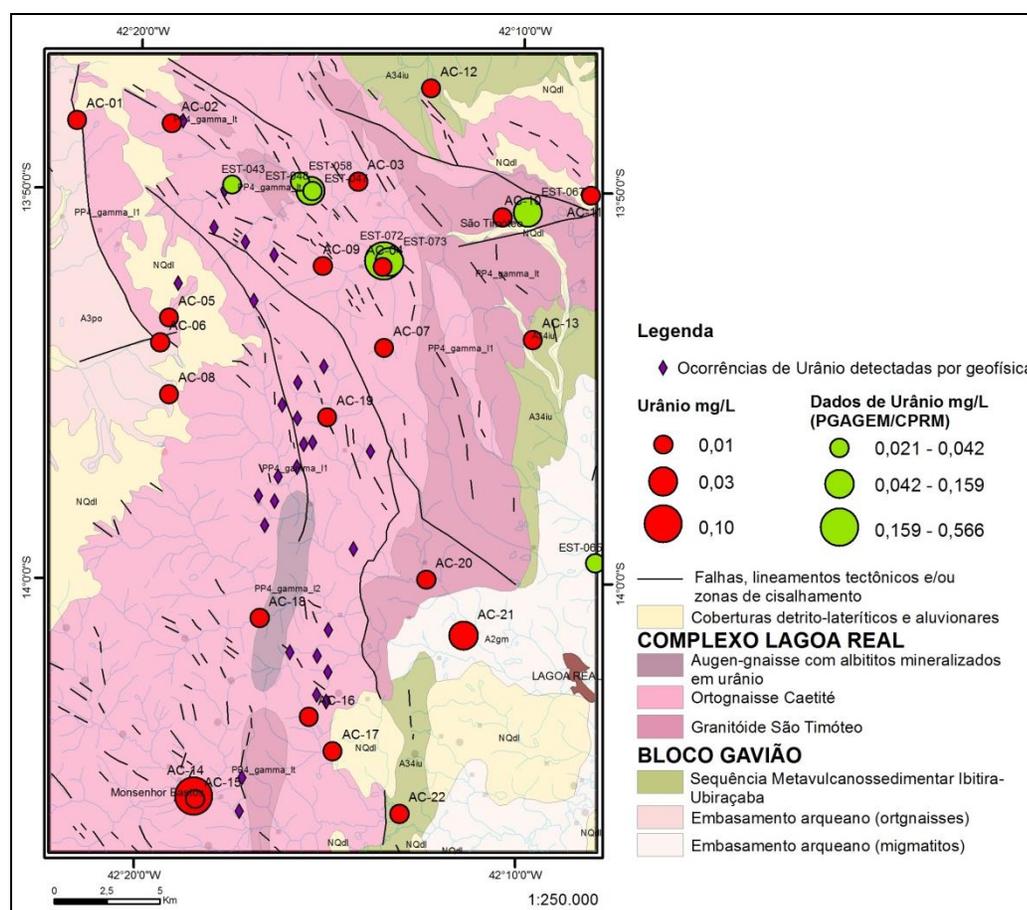


Figura 4: Mapa Geológico simplificado com os teores detectados de urânio e dos dados referentes ao PGAGEM/CPRM e as anomalias de urânio detectadas anteriormente por geofísica (Fonte: Projeto Mapas Geológicos Estaduais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000. GEOSGB/CPRM).

## Isótopos de rádio

As concentrações naturais de rádio em águas subterrâneas estão relacionadas ao tipo de rocha do aquífero, condições físico-químicas do meio e tempo de contato (Bonotto & Silveira 2006). É um metal da família dos alcalinos terrosos e seus isótopos alvos deste estudo possuem meia vida de 1620 anos para  $^{226}\text{Ra}$  e 5,75 anos para  $^{228}\text{Ra}$ .

Na tabela 1 foram descritas as concentrações dos isótopos de rádio, sendo para  $^{226}\text{Ra}$  em média de 0,52Bq e mediana de 0,47 Bq/L, e para  $^{228}\text{Ra}$ , em média de 0,92 Bq/L e mediana de 0,74 Bq/L. De acordo com a legislação para padrões de potabilidade de água para consumo humano, o  $^{226}\text{Ra}$  é aceitável até concentrações de 1,0 Bq/L enquanto o  $^{228}\text{Ra}$  é até 0,1 Bq/L. Sendo assim, todos os poços estão acima do permitido para  $^{228}\text{Ra}$  enquanto apenas o AC-10 ultrapassa o valor máximo permitido para  $^{226}\text{Ra}$ .

Alguns fatores como concentração de matéria orgânica, pH, ânions e outros podem aumentar a mobilidade dos radionuclídeos naturais na água. Segundo Carvalho (2010) ao contrário do urânio, o rádio é mais móvel em águas cloretadas ricas em oxigênio com elevado teor de sólidos totais em solução, que pode ser representado pelas águas que estão no substrato do Complexo Lagoa Real. Foram calculadas as correlações de *Spearman* ( $\rho$ ) em razão da distribuição assimétrica dos resultados das análises. Ao serem correlacionados com os parâmetros físico-químicos, estes radionuclídeos possuem Correlação de *Spearman* negativas e próximas a zero, sendo o valor mais expressivo entre  $^{228}\text{Ra}$  e o pH ( $\rho = - 0,62$ ). Segundo Benes (1984), pode ocorrer uma relação entre o pH e a lixiviação deste elemento, onde o aumento da lixiviação é ocasionado em águas com pHs menores que 4. Quimicamente os radioisótopos reagem de forma semelhante a outros cátions alcalino-terrosos tais como

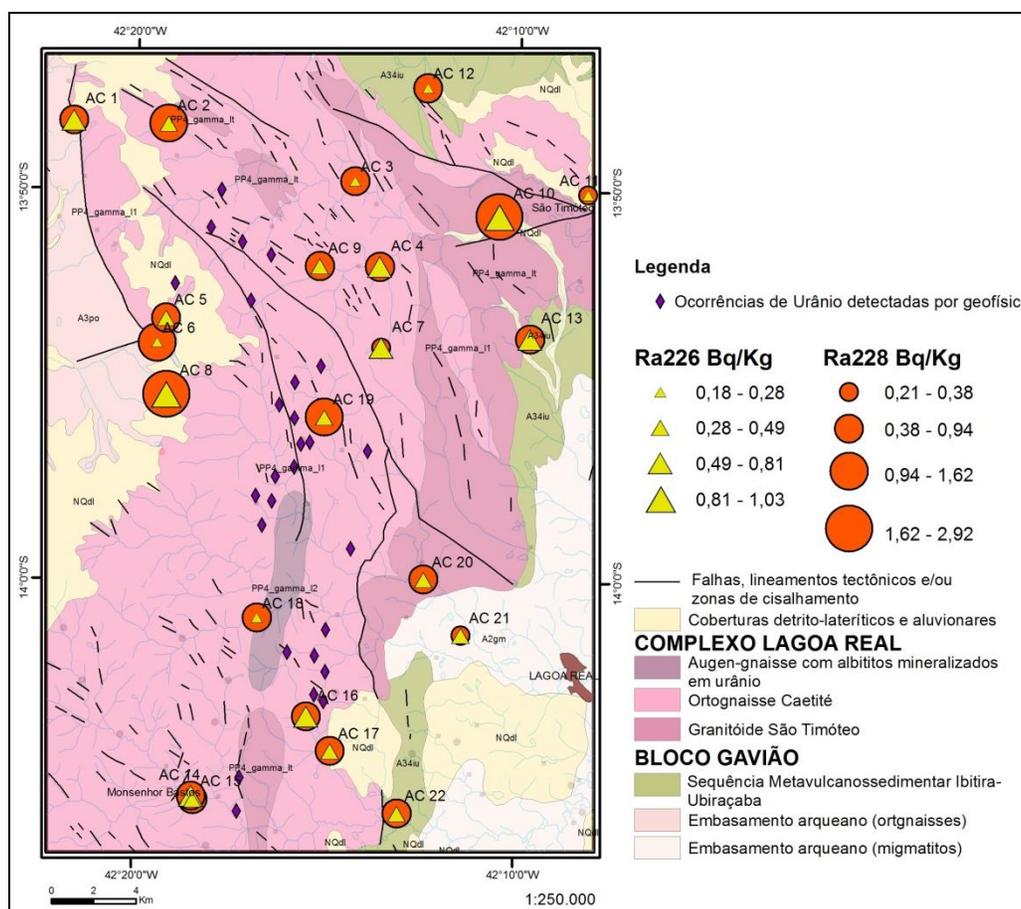
cálcio e estrôncio e é mais semelhante a bário (Szabo, Z. et al, 2012). O aumento da mobilidade deste elemento é favorecido pela troca de íons semelhantes, o chamado efeito "íon competitivo" que ocorre a troca por afinidade química, como pode ser verificado entre os da mesma família na tabela periódica. O valor de  $\rho$  entre o  $^{226}\text{Ra}$  e o estrôncio (Sr) é de  $\rho = -0,2$  e entre o  $^{226}\text{Ra}$  e o magnésio (Mg) é  $\rho = -0,2$ . Entre  $^{228}\text{Ra}$  e estrôncio (Sr) é de  $\rho = -0,2$  e  $^{228}\text{Ra}$  com magnésio (Mg) é de  $\rho = -0,4$ . Ou seja, são correlações negativas que pode estar associado a essa "competição" entre os esses íons da mesma família. O bário e o berílio apresentam concentrações abaixo do limite de detecção do laboratório e foram descartadas para esta análise. As correlações estão dispostas no apêndice deste trabalho.

Quando a água entra em contato com o substrato rochoso ocorrem reações químicas como oxidação e lixiviação que, por intermédio do intemperismo físico e químico, modificam a estrutura dos minerais e resulta no seu fraturamento. No caso dos isótopos radioativos, numa escala de micro-fraturamento, ocorre um tipo de intemperismo físico conhecido como deslocamento de recuo alfa ou *alpha recoil* (Lauria et al, 2007). Este deslocamento aumenta a vulnerabilidade ao ataque químico do radionuclídeo produzido e em consequência disso tem a possibilidade deste ser lixiviado e passar da fase sólida para a fase aquosa.

Outra relação que ocorre entre esses isótopos é que o  $^{228}\text{Ra}$  está mais concentrado na área como um todo. Isto ocorre porque o tório é mais abundante na crosta terrestre do que o elemento urânio, sendo Th: 10 ppm e U: 2 a 3 ppm (Plant et al, 2012). Apesar desta relação, eventuais concentrações de  $^{226}\text{Ra}$  maiores do que o  $^{228}\text{Ra}$ , como ocorre nos poços AC-04, AC-07, AC-14 e AC-21. Isso pode ser explicado por

uma característica geoquímica pontual, onde ocorre concentração maior de urânio em relação ao tório, nas imediações destes poços.

Na figura 5 foram plotados os pontos referentes à amostragem no mapa geológico da área com as classes de concentração dos teores dos isótopos de rádio.



Figuras 5: Mapa Geológico simplificado com os teores dos radioisótopos e as anomalias de urânio detectadas anteriormente por geofísica (Fonte: Projeto Mapas Geológicos Estaduais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000. GEOSGB/CPRM).

### Radônio

As concentrações de atividade do radônio são altamente variáveis não só entre os diferentes tipos de água, mas também dentro do mesmo tipo. Isto pode ser explicado principalmente pela sua origem e litologia do aquífero. Por ser um gás, o radônio tem a facilidade de escapar, porém em águas subterrâneas, uma vez que permanece contato

com formações geológicas ricas em urânio e em um sistema fechado ou quase fechado, o radônio pode acumular e atingir grandes concentrações.

Na tabela 1 estão dispostos os resultados das concentrações de radônio, sendo em média 184,53 kBq/m<sup>3</sup> e mediana de 107,01 kBq/m<sup>3</sup>. Como limite em água potável, é aconselhado segundo a Organização Mundial da Saúde, concentrações de até 100 kBq/m<sup>3</sup> para consumo humano. Na área, as maiores concentrações deste elemento ocorreram na região da falha que limita o embasamento do Complexo Paramirim com o Complexo Lagoa Real, onde foi superior ao limite detectável pelo aparelho, no ponto AC-08 chegando a marcar 1187,2 kBq/m<sup>3</sup>. Em outros pontos, concentrações altas também podem ser correlacionadas com falhas fotointerpretadas e/ou mapeadas previamente.

Segundo Costa (2001), este elemento que tem meia vida de aproximadamente 3,8 dias e emite uma partícula alfa de 5,5 MeV de energia, é um gás nobre que tem a propriedade de difusão através do retículo cristalino dos minerais, imediatamente após o decaimento do seu elemento-pai. Esse processo se chama de emanação, que ocorre a liberação completa a partir do material sólido, e faz com que os teores de <sup>222</sup>Rn sejam muito maiores que o nuclídeo-pai, o <sup>226</sup>Ra. Neste caso, o <sup>222</sup>Rn é dito não suportado pelo <sup>226</sup>Ra, sendo proveniente diretamente dos minerais que compõe as rochas do aquífero. Em meio saturado, como os que ocorrem em lençóis freáticos, o fluxo de radônio é predominantemente lateral e é controlado pelo fluxo de água subterrânea (Rebelo *et al.*, 2003).

Na figura 6 está ilustrado o mapa geológico da área de estudo e suas respostas analíticas para radônio, onde pode ser notado que nas proximidades das falhas e/ou

fraturas a concentração é maior, embora em toda a área as concentrações já são proeminentes.

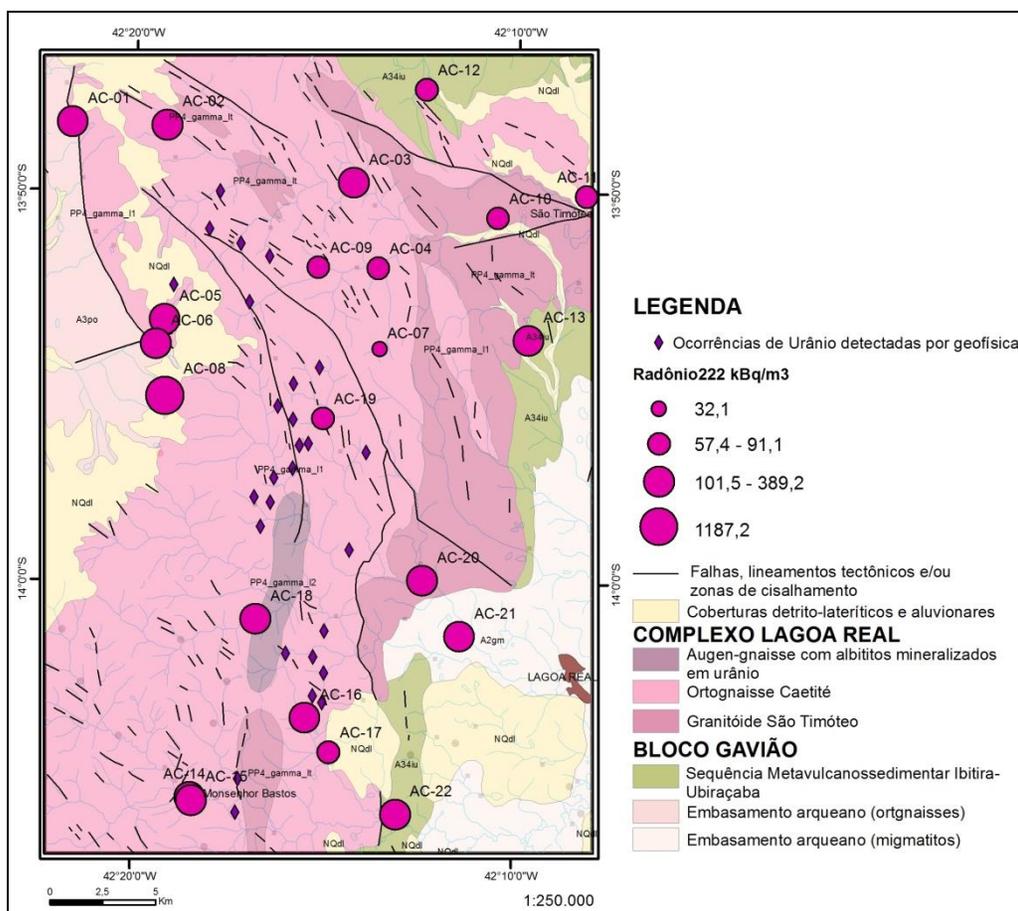


Figura 6: Mapa Geológico simplificado com os teores detectados de radônio e as anomalias de urânio detectadas anteriormente por geofísica. (Fonte: Projeto Mapas Geológicos Estaduais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000. GEOSGB/CPRM).

## CONCLUSÕES

As condições de dissolução das rochas bem como os fatores que promovem sua circulação em subsuperfície imprimem características físico-químicas nas águas subterrâneas. Em regiões que possuem em seu substrato rochas com composição química rica em elementos radioativos podem contaminar de forma natural os lençóis freáticos.

No parâmetro Turbidez, as amostras de águas dos poços AC-04 e AC-14 possuem valores acima de 5,0 NTU, que é o limite aceito. De acordo com a Resolução 396/2008 do CONAMA, os poços AC-11, AC-15, AC-20, AC-21 e AC-22, possuem valores acima de 1000 mg/l para o parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD). Para Condutividade Elétrica, que está ligada a salinidade, somente o poço AC-20 está superior ao aconselhado que é de 3000 $\mu$ mho/cm, sendo, inclusive classificada como água salgada. Ainda baseada na concentração dos cátions e ânions as águas referentes aos pontos: AC-01, AC-02, AC-04, AC-05, AC-06, AC-07, AC-08, AC-13 e AC-18 são águas doces. E, por fim, as águas dos pontos: AC-03, AC-09, AC-10, AC-11, AC-12, AC-14, AC-15, AC-16, AC-17, AC-19, AC-21 e AC-22 são salobras.

Na análise do diagrama de Piper, a maioria das amostras foi classificada como sódicas cloretadas, sendo as unidades que estão inseridas no embasamento arqueano são classificadas como sódica bicarbonatada. Já nas rochas pertencentes ao Complexo Lagoa Real são, em sua maior parte, amostras de águas classificadas como cloretadas podendo variar de sódica, cálcica ou mista.

Com relação aos valores dos isótopos estáveis, conclui-se que são águas similares que sofreram evaporação. As amostras estão posicionadas abaixo da Linha Meteorica Global e dos dados históricos locais da AIEA, o que condiz com o clima local, de acordo com o padrão de evaporação da área, considerando a época da coleta e o lençol freático sendo influenciado pela evaporação. O poço AC-17 demonstra ser o local onde ocorre maior perda evaporativa, apresenta o menor valor para o excesso de deutério, apesar da evaporação não estar afetando a salinidade deste poço.

Para o elemento urânio foi detectado que o poço AC-14, localizado na comunidade de Monsenhor Bastos e que atende a população local como água para serviços domésticos, ocorre a maior concentração, sendo 0,10 mg/L. Com isso, é aconselhado alertar a população que esta água não deve ser ingerida bem como não utilizar em plantações ou criações de animais. Nos resultados provenientes de trabalhos anteriores, o urânio encontra-se acima dos limites permitidos em quase todos os oito poços. Estes poços estão majoritariamente na área do Complexo Lagoa Real e apenas um no embasamento. Embora sendo localizados próximos um ao outro, poços em aquíferos fissurais podem não ter a mesma concentração de elementos químicos em razão de refletir a composição química do substrato que os contém e as falhas e/ou fraturas estarem em comunicação ou não.

A mobilidade de rádio pode ser influenciada pelo pH, deslocamento da partícula alfa e/ou competição com outros cátions divalentes. O radônio, por ser um gás encontra-se mais concentrado nas áreas vizinhas a falhas. Fato este comprovado pela concentração maior no poço situado próximo a falha que limita o embasamento e o Complexo Lagoa Real, o poço AC-08.

Todos os poços estão acima do limite para  $^{228}\text{Ra}$  e em apenas um para  $^{226}\text{Ra}$  que é explicado pela maior concentração de  $^{232}\text{Th}$  na crosta terrestre em relação ao  $^{238}\text{U}$ . Além disso, altas concentrações de radônio ( $^{222}\text{Rn}$ ), sendo a maioria superior ao recomendado pela Organização Mundial da Saúde (WHO) de  $100\text{kBq/m}^3$  ou  $100\text{Bq/L}$ , ocorre através da difusão diretamente do retículo cristalino dos minerais com a liberação completa, imediatamente após o decaimento do seu elemento pai. Esse

processo é chamado de emissão e faz com que os teores de  $^{222}\text{Rn}$  sejam muito maiores que o nuclídeo-pai, o  $^{226}\text{Ra}$ .

## REFERÊNCIAS

Bastos-Leal L.R., Teixeira W., Cunha J.C. & Macambira M.J.B. 1997. Crustal evolution of Gavião block of the São Francisco Craton: A geochronological study with U-Pb, Pb-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and K-Ar. In: **South American Symposium on Isotope Geology**, 2, Extended Abstract, p. 161-162.

Benes P., 1984, "Migration of Radium in the Terrestrial Hydrosphere", The Behaviour of Radium in Waterways and Aquifers, IAEA-TECDOC-301, Vienna, 119:173.

Bonotto, D.M. e Silveira, E.G. 2006 Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais. São Paulo: Editora UNESP, 160p, 2006.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente. Resolução **CONAMA Nº 396/2008** - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 07/04/2008, Seção 1, páginas 64-68.

Brito W., Raposo C. & Matos E.C. 1984. Os albitos uraníferos de Lagoa Real. In: SBG, **Cong. Bras.Geol.**, 33, Anais, p. 1475-1488.

Carvalho 2010. A água e os radionuclídeos das famílias radioativas naturais. **CAPTAR-Ciência e Ambiente para todos**. v2(2) p.: 17-25.

Cordani U.G., Iyer S.S., Taylor P.N., Kawashita K., Sato K. & McCreath I. 1992. Pb-Pb, Rb-Sr, and K-Ar systematic of the Lagoa Real uranium province (south-central Bahia, Brazil) and the Espinhaço Cycle (ca. 1.5-1.0 Ga). **J. South Am. Earth Sci.**, 1:33-46.

Costa, A.B. Radioatividade Alfa e Radiocarbono em águas Subterrâneas em Estado da Bahia. Dissertação de mestrado Pós Graduação em Geofísica, Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2001.

Costa, P.H.O., et al. 1985. Projeto Lagoa Real - Mapeamento Geológico 1:25.000. CBPM/NUCLEBRAS/SME, v.1, 455 p.

Craig, H. Isotope variations in meteoric waters. *Science*. v. 133. p. 1702-1703. 1961.

Cruz S.C.P. 2004. A interação tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, 503 p.

Cruz S.C.P. & Alkmim F.F. 2006. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco Craton region, Eastern Brazil.

Cruz, S.C.P. Geologia e arcabouço estrutural do Complexo Lagoa Real, Vale do Paramirim, Centro-Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.37, n.4 - suplemento, p.128-146, 2007.

IAEA / OMM (2018). Rede Global de Isótopos em Precipitação. O banco de dados GNIP. Acessível em: <https://www.iaea.org/services/networks/gnip>;; último acesso em 20/10/2018.

Lauria, D. C. & Godoy J. M. 2000. Origem e transporte de rádio nas águas subterrâneas de Buena (RJ). **Joint World Congress on Groundwater**, I. Fortaleza, Anais. Fortaleza.

Lobato L. & Fyfe W. 1990. Metamorphism and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brasil. **Econ. Geol.**, 5:968-989.

Mapas Geológicos Estatuais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000 - Fonte: GEOSGB/CPRM, último acesso em 19/10/2018.

Oliveira, J.E. Implicações de Radioelementos no Meio Ambiente, Agricultura e Saúde Pública em Lagoa Real, Bahia, Brasil. In: SILVA, C. R. et al. (Ed.) **Geologia Médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente**. Rio de Janeiro: CPRM; FAPERJ, 2006. p.148-156.

Pimentel M.M., Machado N. & Lobato L.M. 1994. Geocronologia U/Pb de rochas graníticas e gnáissicas da região de Lagoa Real, Bahia, e implicações para a idade da mineralização de urânio. In: SBG, **Cong. Bras.Geol.**, 38, Boletim de Resumos Expandidos, p. 389-390.

Plant, J. et al. Pollutants, human health, and the environment: a risk based approach. 2012.

Rebelo, A. M. A., Bittencourt, A. V. L., Mantovani, L. E. Modelos de exalação de radônio em paisagens tropicais úmidas sobre granitos. **Boletim Paranaense de Geologia**, n. 52, p. 61-76, 2003

Santos, T.H.R. Comparação entre os métodos IRMS e CRDS na determinação das razões isotópicas  $2H=1H$  e  $18O=16O$  em água. Dissertação (Mestrado) – Pós Graduação em Física. Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.101 f.

Sobrinho E.G., Raposo C., Alves J.V., Brito W. & Vasconcelos T.G. 1980. O distrito uranífero de Lagoa Real, Bahia. In: SBG, **Cong. Bras. Geol.**, 31, Anais., p. 1499-1512

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, 20th ed.,1998.

Szabo, Z. et al. Occurrence and geochemistry of radium in water from principal drinking-water aquifer systems of the United States. **Applied Geochemistry** 27 p.729–752, 2012.

Turpin L., Maruèjol P. & Cuney M. 1988. U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd chronology of granitic basement, hydrothermal albitites and uranium mineralization, Lagoa Real, South Bahia, Brazil. **Contrib. Mineral. Petrol.** 98:139-147.

WHO, 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum: Switzerland: WHO press, 2017

## CAPÍTULO III

# ARTIGO 2 – A QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA COM ÊNFASE NA TOXICIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.

---

### RESUMO

Elementos químicos, mesmo que ocorram naturalmente no meio ambiente, podem produzir efeitos adversos à saúde quando são ingeridos em altas concentrações. A área está situada na Província Uranífera de Lagoa Real, onde ocorrem importantes mineralizações de urânio, e por essa razão são esperadas águas que contenham altas concentrações deste elemento e seus filhos. Durante a etapa de campo nos municípios Caetitê e Lagoa Real, foram amostrados 22 poços de água. Para os resultados de urânio, as amostras AC-14 e o AC-21 apresentam concentração de 0,10 mg/L e 0,03 mg/L, respectivamente e ultrapassam os valores máximos permitidos pelo CONAMA 396/2008 que é de 0,03mg/L. Para rádio-226, a amostra AC-10 com 1,03 Bq/L, ultrapassa o limite estabelecido pelo CONAMA para potabilidade de água. Para rádio-228, com concentrações em média de 0,91 Bq/L, e o valor máximo detectado na amostra AC-08 com 2,92Bq/L, sendo acima do limite em todos os poços amostrados. E por fim, para radônio, como uma concentração média de 184,5 kBq/m<sup>3</sup> que é acima do aconselhado pela Organização Mundial da Saúde, sendo o poço AC-08 com valores superiores a 1187,2 kBq/m<sup>3</sup>. Além disso, o ferro, manganês, sódio, nitrato e flúor também estão acima dos teores permitidos e afetam a qualidade da água para consumo humano. Os radionuclídeos estudados são potencialmente prejudiciais à saúde humana, principalmente por serem carcinogênicos.

Palavras-chave: Água subterrânea, Isótopos de Rádio, Radônio, Toxicidade.

### ABSTRACT

Chemical elements, even if they occur naturally in the environment, can produce adverse health effects when ingested in high concentrations. The area is located in the Uraniferous Province of Lagoa Real, important uranium mineralizations occur, and for this reason, water containing this element and its daughter nuclides are expected. During the field stage in Caetitê and Lagoa Real municipalities, 22 water wells were sampled. For the uranium results, the wells represented by acronyms AC-14 and AC-21 have a concentration of 0.10 mg/L and 0.03 mg/L respectively and exceed the maximum values allowed by CONAMA 396/2008 which is of 0.03mg/L. For radio-226, the AC-10 well with 1.03 Bq/L, exceeds the limit established by CONAMA for water potability. For radio-228, mean concentrations of 0.91 Bq/L, and the maximum value detected in the sample AC-08 with 2.92Bq/L, being above the limit in all wells sampled. And finally, for radon, as an average concentration of 184.5 kBq/m<sup>3</sup> that is above that recommended by the World Health Organization, being the well AC-08 with values higher than the RAD-07 meter that is 1187.2 kBq/m<sup>3</sup>. In addition, iron, manganese, sodium, nitrate and fluorine are also above permitted levels and affect the quality of water for human consumption. The radionuclides studied are potentially harmful to human health, mainly because they are carcinogenic.

Keywords: Groundwater, Radioisotopes, Radon, Toxicity

## INTRODUÇÃO

No substrato geológico podem ocorrer rochas com minerais radioativos em sua composição e, em contato com a água subterrânea, são mobilizados e podem contaminar aquíferos com radionuclídeos. Elementos radioativos de ocorrência natural são menos passíveis de controle e podem oferecer maiores riscos à população pelo referido desconhecimento. (Silva, 2011).

O estudo dos fatores que controlam a distribuição dos elementos químicos rádio, radônio e urânio em aquíferos têm como objetivo a compreensão de como ocorrem a mobilização destes elementos em água subterrânea. Estes elementos são potencialmente prejudiciais à saúde humana e, ao entrar em contato com o organismo através da ingestão de água contaminada, podem desenvolver alguns tipos de câncer devido às formas absorção e toxicidades relacionadas. Além disso, no local também ocorrem outros elementos e compostos químicos que podem ocasionar problemas à saúde ao serem ingeridos.

## ASPECTOS GEOLÓGICOS REGIONAIS

No contexto geológico regional o Complexo Lagoa Real está envolvido pelo Aulacógeno do Paramirim (Pedrosa-Soares et al. 2000) e cuja evolução tectônica é marcada por um conjunto de deformações compressivas e distensivas, representadas por extensas zonas de cisalhamento e falhamentos superpostos, cuja evolução teria se iniciado no Paleoproterozóico e evoluído até o Neoproterozóico (Cruz et al 2007). O seu embasamento é constituído por rochas ortognáissicas-migmatíticas e sequências vulcanossedimentares arqueanas e paleoproterozóicas com idades superiores a 1,8 Ga (Bastos Leal et al. 1997).

As rochas que compõe o Complexo Lagoa Real estão localizadas na porção centro-sul do Estado da Bahia, nas proximidades dos municípios de Lagoa Real e Caetité (Figura 1). Este Complexo ígneo-metamórfico, constituído por meta-granitóides com idades em torno de 1,7 Ga (Turpin et al. 1988, Cordani et al. 1992), gnaisses e albitos, englobando também as rochas denominadas genericamente de Granitóide São Timóteo e um conjunto de granitóides milonitizados (Cruz et al 2007). Abriga uma importante mineralização de urânio com idade de formação em torno de 960 Ma (Pimentel et al 1994) que está hospedada em corpos lenticulares de albitos que, por sua vez, estão paralelizados com a foliação e lineamentos tectônicos regionais.

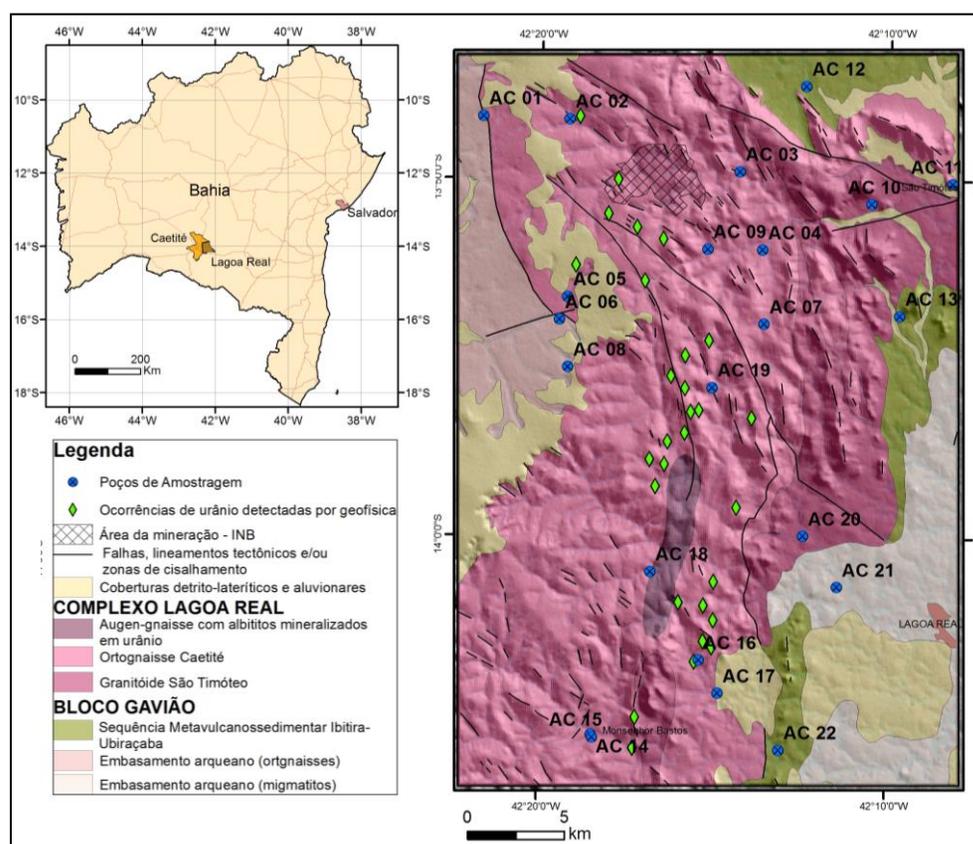


Figura 1: Mapa Geológico da área com indicação dos poços amostrados e as anomalias de urânio. (Fonte: Projeto Mapas Geológicos Estatuais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000. GEOSGB/CPRM).

A exploração de águas subterrâneas na região está associada a sistemas de fraturamentos formados a partir de múltiplas fases de deformação superimpostas nas rochas durante a evolução do Aulacógeno Paramirim, no Neoproterozóico (Cruz et al. 2007). As estruturas tectônicas regionais também estão associadas a processos deformacionais dúcteis que produziram zonas de cisalhamento e sistemas de falhamentos regionais, que em profundidade que facilitam a mobilidade e fluxo dos radioisótopos através da interação da água com minerais radioativos presentes nas rochas da região.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A etapa de campo ocorreu no início do mês de agosto de 2017, durante a estação seca onde foram definidos 22 pontos de coleta de água (figura 1). Para a escolha dos pontos de amostragens foram levados em conta os dados provenientes da CERB (Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia) e também foram coletadas amostras em poços em áreas de propriedades particulares. Na etapa de campo, à medida que foram coletadas as amostras, determinou-se *in loco* os parâmetros físico-químicos como condutividade elétrica (CE), turbidez, sólidos totais dissolvidos (STD), oxigênio dissolvido (OD), além da temperatura e pH.

Como uma ferramenta para corroborar os dados de campo, foi utilizada a integração dos resultados geoquímicos com mapas geofísicos. No Projeto realizado pela Companhia Baiana de Pesquisa Mineral – CBPM em convênio de cooperação e apoio técnico-científico com a CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) intitulado “*Levantamento Aerogeofísico da Área Campo Alegre de Lourdes/Mortugaba*”, foram realizados perfis aeromagnéticos e aerogamaespectrométricos de alta resolução

no estado da Bahia (LASA, 2006). A partir da disponibilização destes dados, mapas de gamaespectrometria foram utilizados para validar os resultados analíticos dos isótopos de rádio, radônio e urânio.

As análises químicas que envolveram métodos analíticos instrumentais como o ICP-OES (do inglês: *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*) foram realizadas pela CPRM através da Rede de Análises de Água do laboratório LAMIM. Assim, foram analisados por ICP-OES os seguintes elementos: Al, As, Ag, B, Be, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Sb, Se, Si, Sn, Sr, Ti, U, V e Zn. A esse pacote foram adicionados os ânions  $F^-$ ,  $Cl^-$ ,  $NO_2^-$ ,  $Br^-$ ,  $NO_3^-$ ,  $PO_4^{-3}$  e  $SO_4^{-2}$ , analisados por Cromatografia iônica. Todas as análises foram baseadas em métodos padrão para exame de águas e efluentes (Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 1998). Os equipamentos utilizados foram o ICP-OES 7300 da *Perkin Elmer* e para os ânions foi utilizado o cromatógrafo ICS 3000 – *DIONEX*.

Os resultados analíticos dos isótopos de rádio e do radônio foram obtidos pelo Laboratório de Radioatividade Natural LRN do Centro de Desenvolvimento de Tecnologia Nuclear – CDTN/CNEN. Para  $^{226}Ra$  e  $^{228}Ra$  foi utilizada espectrometria gama com detector HPGe (*High Purity Germanium Detector*). Para determinação do  $^{222}Rn$  foi utilizado o equipamento Rad-7 da *Durridge Inc* que faz a degasagem em circuito fechado, onde foi medida a concentração de radônio no ar e calculou a concentração de atividade na água através de uma equação de balanço e do coeficiente de partição, também chamado de coeficiente de distribuição. Este método é conhecido como deemanação de radônio.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises dos parâmetros físico-químicos foram realizadas durante o período da coleta. Para condutividade elétrica apresentam valores médios de 1094,59  $\mu\text{S/cm}$ , mediana de 967,00  $\mu\text{S/cm}$ , sendo a maior medida no poço AC-20 com 3340,00  $\mu\text{S/cm}$ . O pH é classificado como neutro pois marca, em média, 7,07 até no máximo de 7,68. O parâmetro turbidez tem sua mediana marcando 0,0 NTU, já que em mais de 85% dos poços o valor medido foi zero. No entanto, no poço AC-14 foi medido o valor de 37,60 NTU. Para STD os valores de média e mediana são respectivamente 701,36 e 620,00 mg/L. No poço AC-20 foi detectado o valor máximo de 2140,00 mg/L. E por fim, para o OD os valores são, em média, 5,37 mg/L e sua mediana 5,13 mg/L. No poço AC-14 foi medido o valor máximo de 11,46 mg/L. Em relação ao padrão de potabilidade das águas subterrâneas, pela Portaria N.º 1469, DE 29 De Dezembro de 2000 do Ministério da Saúde, indica que para STD o valor máximo permitido é de 1000 mg/L e é ultrapassado nos poços AC-11, AC-15, AC-20, AC-21 e AC-22 e para Turbidez o VMP é de 5 UT, sendo acima do limite no poço AC-04 e AC-14. Na tabela 1 encontram-se os valores dos parâmetros físico-químicos com os resultados dos radionuclídeos.

Tabela 1: Resultados das análises dos parâmetros físico-químicos e dos radionuclídeos.

Amostras	Latitude	Longitude	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	pH	Turbidez (NTU)	STD (mg/L)	OD (mg/L)	U (mg/L)	$^{222}\text{Rn}$ (kBq/m <sup>3</sup> )	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)
AC - 01	784848	8472425	744	6,9	0,0	480	6,90	0,01	389,2	0,71	0,86
AC - 02	789857	8472417	667	6,9	0,0	430	5,17	0,01	222,6	0,44	1,01
AC - 03	798621	8469357	1430	6,8	0,0	910	4,11	0,01	140,7	0,28	0,94
AC - 04	799883	8464984	611	7,2	9,7	390	7,60	0,01	64,7	0,70	0,59
AC - 05	789697	8463159	314	6,3	0,0	200	5,08	0,01	162,0	0,45	0,77
AC - 06	789175	8461853	76	6,2	0,0	50	6,10	0,01	111,6	0,27	1,04
AC - 07	799817	8461784	446	6,9	0,0	290	3,10	0,01	32,1	0,60	0,32
AC - 08	788684	8458925	173	6,5	0,0	110	4,00	0,01	1187,2	0,96	2,92
AC - 09	796882	8465417	805	7,5	0,0	520	5,50	0,01	90,5	0,43	0,71
AC - 10	805589	8467366	1090	7,1	0,0	700	3,67	0,01	91,1	1,03	2,46

AC - 11	810566	8468617	1870	7,6	0,0	1190	7,56	0,01	57,4	0,18	0,21
AC - 12	801598	8474322	1240	7,2	0,0	800	5,26	0,01	62,7	0,27	0,83
AC - 13	806910	8464348	233	6,8	0,0	150	4,16	0,01	101,5	0,76	0,89
AC - 14	790926	8440291	1330	7,3	37,6	850	11,46	0,10	213,2	0,81	0,58
AC - 15	790966	8440209	1950	7,1	0,0	1250	4,41	0,01	105,4	0,39	0,61
AC - 16	796185	8444126	1070	7,1	0,0	680	5,36	0,01	103,3	0,74	0,78
AC - 17	797286	8442460	939	7,4	0,0	600	4,95	0,01	83,9	0,47	0,58
AC - 18	793853	8448800	768	7,1	0,0	490	7,84	0,01	108,6	0,23	0,54
AC - 19	797032	8457726	995	6,9	3,1	640	6,15	0,01	85,0	0,48	1,62
AC - 20	801728	8450628	3340	7,3	0	2140	4,15	0,01	239,6	0,46	0,69
AC - 21	803443	8448002	1870	7,5	0	1200	3,63	0,03	222,1	0,49	0,38
AC - 22	802250	8439352	2120	7,0	0	1360	1,96	0,01	185,2	0,38	0,59

Mapas de gamaespectrometria foram utilizados para corroborar os resultados analíticos de urânio, rádio e radônio. No mapa abaixo (figura 2) foi utilizado uma escala regional (1:1.000.000) com o intuito de evidenciar as diferenças de assinatura gamaespectrométrica na porção referente ao Complexo Lagoa Real e nos locais adjacentes.

Na figura 3 e 4 estão representados dois mapas com uma escala maior (1:250.000), adequada à área de trabalho. Nesses mapas estão relacionados com os seus respectivos elementos progenitores, sendo eles: mapa de gamaespectrometria de urânio como seus filhos rádio-226 e radônio (figura 3); e gamaespectrometria de tório com seu filho rádio-228 (figura 4). Com isso é certificado que em áreas que possuem maior quantidade do nuclídeo filho tem a tendência a teores mais elevados dos seus elementos pais.

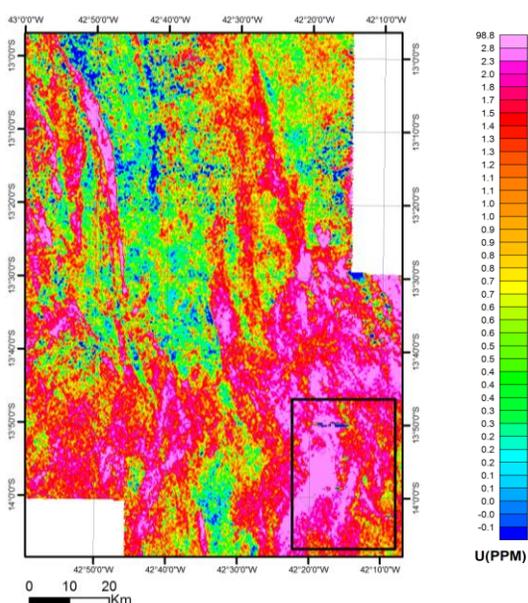


Figura 2: Mapa de gamaespectrometria de urânio (U), com detalhe a área de estudo. (Fonte Projeto: *Levantamento Aerogeofísico da Área Campo Alegre de Lourdes/Mortugaba*, CBPM em convênio com CPRM).

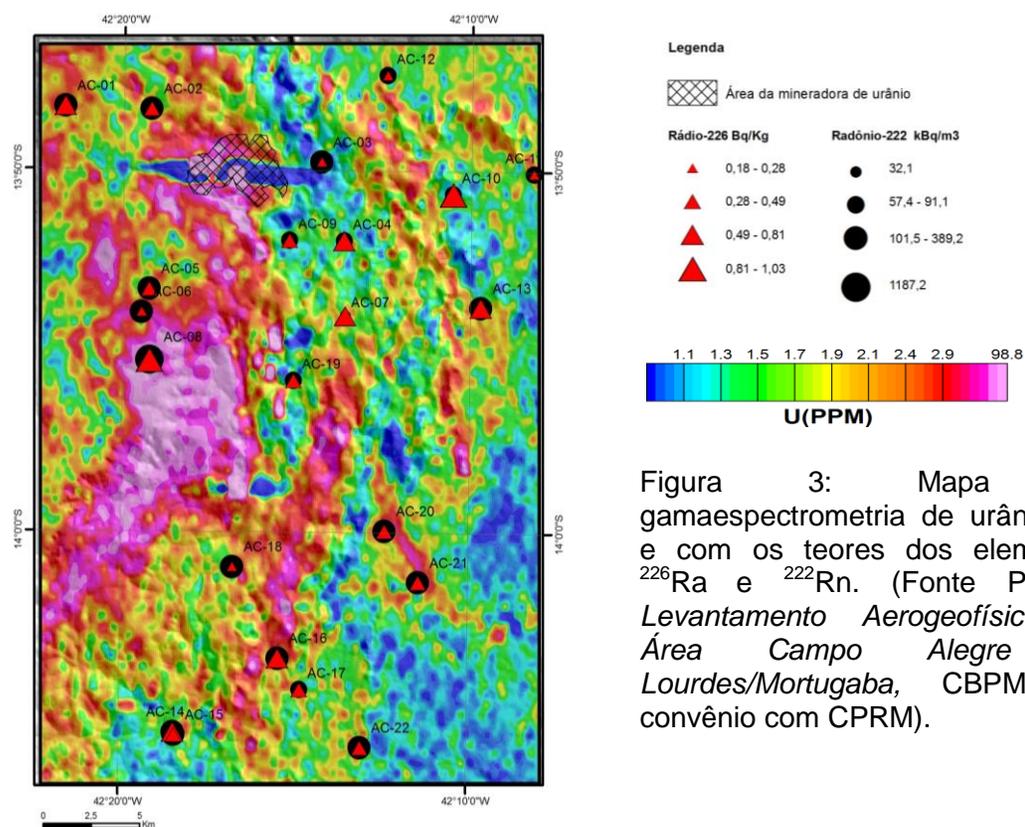


Figura 3: Mapa de gamaespectrometria de urânio (U) e com os teores dos elementos  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{222}\text{Rn}$ . (Fonte Projeto: *Levantamento Aerogeofísico da Área Campo Alegre de Lourdes/Mortugaba*, CBPM em convênio com CPRM).

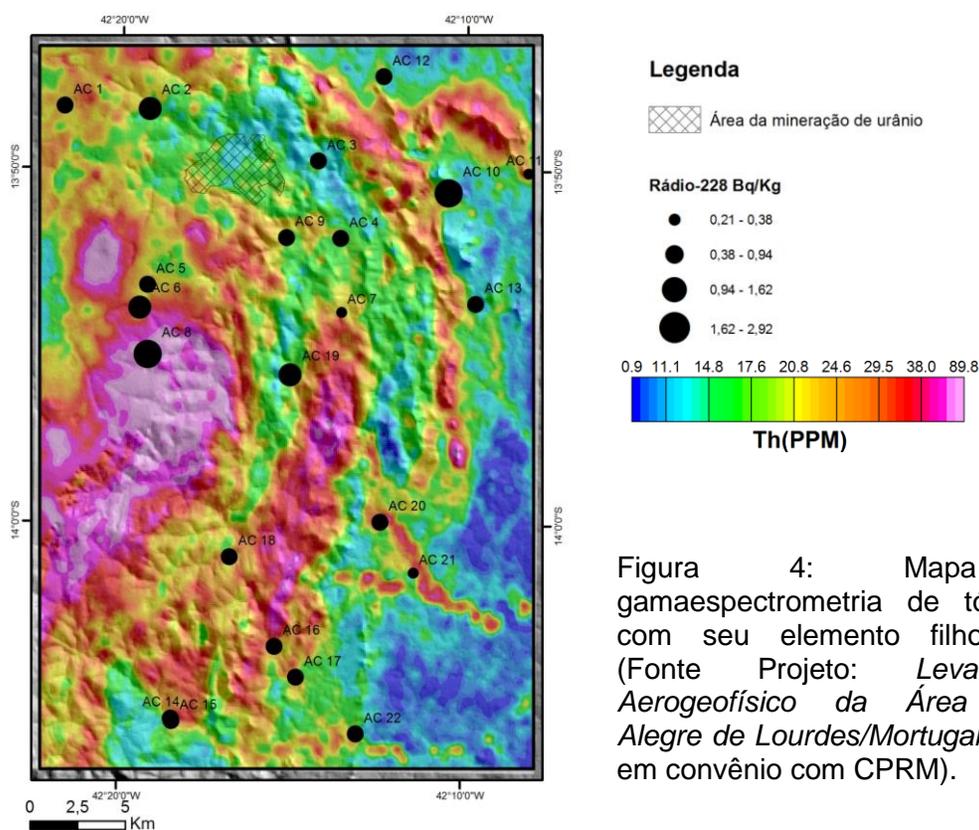


Figura 4: Mapa de gamaespectrometria de tório (Th) com seu elemento filho:  $^{228}\text{Ra}$ . (Fonte Projeto: *Levantamento Aerogeofísico da Área Campo Alegre de Lourdes/Mortugaba, CBPM em convênio com CPRM*).

#### Toxicidade dos elementos químicos

A partir de Resoluções do Conama (nº 396/2008) consultada e as diretrizes para consumo da Organização Mundial da Saúde (WHO), foram encontrados resultados que são inapropriados para consumo humano. As análises de Ag, Al, As, B, Ba, Be, Br, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, F, Li, Mo, Ni,  $\text{NO}_2$ , Pb,  $\text{PO}_4$ , Sb, Sc, Se,  $\text{SO}_4$ , V e Zn possuem valores dentro das normas da resolução utilizada para potabilidade de água, exceto o bromo que não dispõe de legislação para controle. A partir disso, foram suprimidos os elementos B, Sb, Sn, Pb, Cd, Ni, Ti, Ag, Be, As, Al,  $\text{PO}_4$ , Co, Cr, Cu, Mo, Se e V por apresentarem valores abaixo do limite de detecção informado pelo laboratório. Na tabela 2 encontram-se os valores estatísticos da concentração dos elementos químicos analisados (exceto os radioativos) que estão acima do permitido pela legislação.

Tabela 2: Valores estatísticos dos íons com teores elevados em mg/L com os respectivos Valores Máximos Permitidos (VMP) pelo CONAMA 396/2008.

	Ferro	Manganês	Sódio	Nitrato	Cloreto	Flúor
VMP	0,03	0,1	200	10	250	1,5
Mínimo	0,01	0,01	13,73	0,01	4,44	0,2
Máximo	1,32	0,64	271,16	112,82	856,3	3,78
Média	0,09	0,13	112,69	24,97	189,72	1,49
Mediana	0,01	0,02	108,55	15	161,19	1,39

Os teores de ferro estão ligados à lixiviação de minerais constituídos por este e estão ligados aos teores de manganês. O  $\text{Fe}^{+2}$  é mais solúvel do que o  $\text{Fe}^{+3}$  e também mais frequente. O teor máximo encontrado foi de 1,32 mg/L, que é 44 vezes maior que o VMP (0,03 mg/L) estabelecido pelo CONAMA 396/2008, no poço AC-20. O ferro, apesar de não constituir um elemento tóxico, traz diversos problemas para o abastecimento público de água, porque imprime cor e sabor bem característicos e pode provocar manchas em roupas e utensílios sanitários (WHO, 2011).

Valores de manganês alto estão ligados a substituições em biotita e hornblenda, principalmente, na rodocrosita. O comportamento deste nas águas é muito semelhante ao do ferro, porém em menor ocorrência. O manganês desenvolve coloração escura na água, e se apresenta nos estados de oxidação  $\text{Mn}^{+2}$  (forma mais solúvel) e  $\text{Mn}^{+4}$  (forma menos solúvel). Concentrações acima 0,10 mg/L terão efeito adverso na potabilidade da água. O valor máximo detectado de 0,64 mg/L no poço AC-22, ou seja, 6 vezes maior do que o limite estabelecido pelo CONAMA 396/2008. Por via oral, o manganês é frequentemente considerado como um dos elementos menos tóxicos, entretanto, recentemente estudos de Chen P. *et al* (2015) e Kwakye *et al* (2015) associam o excesso de exposição de Mn, através da ingestão podem ocasionar problemas neurológicos, principalmente o Mal de Parkinson.

O sódio é um dos constituintes maiores das rochas ígneas, e ocorre em plagioclásios e é liberado durante o intemperismo destes silicatos, e são elementos maiores essenciais à saúde humana (macronutrientes). Entretanto, quando ingerido em água, com altos teores e longos períodos podem desenvolver problemas na saúde humana, embora não sendo considerados tóxicos visto que são excretados pelos rins. Não podem ser tiradas conclusões explícitas sobre a possível associação entre sódio na água potável e a ocorrência de hipertensão (WHO, 2017). No entanto, concentrações superiores a 200mg/L afetam o sabor, tornando desagradável para consumo. Apenas três poços possuem valores acima do permitido, chegando ao valor máximo de 271,16 mg/L no poço AC-20.

Em relação ao nitrato, os valores detectados estão na maioria dos poços altos ou muito altos. O poço AC-21 chega ao alarmante valor de 112,82 mg/L, que supera mais de 10 vezes o limite permitido. Isto pode ser originado, principalmente, a partir de quatro fontes: aplicação de fertilizantes nitrogenados inorgânicos ou proveniente de esterco animal, deposição atmosférica, esgoto doméstico e também por lixiviação de áreas agrícolas e lixões (Biguelini e Gumy, 2012). Altas concentrações deste elemento apresentam um grande risco para a saúde pública e animal, embora não apresente toxicidade para os adultos, por ser rapidamente excretado pelos rins. Entretanto, concentrações maiores que 10 mg/L pode ser fatal para crianças com idades inferiores a seis meses, podendo causar a síndrome do bebê azul, devido a conversão de nitrato em nitrito e que se combina com a hemoglobina do sangue (Queiroz, 2004).

A presença de cloreto em águas subterrâneas pode ser atribuída à dissolução de depósitos salinos, descargas de efluentes de indústrias químicas, intrusões salinas,

etc., e são altamente móveis. Em sete poços ultrapassaram este limite chegando ao máximo no poço AC-20 com 856,30 mg/L. Seu impacto na ingestão contínua vai depender dos cátions associados e não há diretrizes baseadas em saúde para excesso de cloreto na água potável. A toxicidade de cloretos não foi observada em humanos, exceto no caso especial de pacientes com metabolismo de cloreto de sódio e em casos de insuficiência cardíaca congestiva (WHO, 2017).

Na área de estudo, dez poços apresentaram valores mais altos que a resolução regulamentadora que é de 1,5 mg/L para o flúor. O poço AC-15 marca o valor mais alto dentre os poços, sendo 3,78 mg/L, ou seja, mais que o dobro do permitido. Apesar de serem benéficos à saúde, fazendo parte dos elementos traços essenciais à saúde humana (micronutrientes), a assimilação contínua de teores acima do máximo permitido pode provocar doenças como a fluorose dentária e fluorose esquelética. (Velásquez et al, 2006)

Toxicidade dos elementos químicos urânio, rádio e radônio.

O comportamento geoquímico do urânio vai depender de alguns fatores que afetam a sua distribuição nas águas naturais, sendo eles: teor de urânio na rocha matriz, tempo de residência do urânio no ambiente, variação climática, pH e presença de matéria orgânica (Bonoto & Silveira 2006). O urânio ocorre na natureza, em maior constância, nos estados de valência de 4+ e 6+, e a presença da matéria orgânica produz uma relação importante nas reações de adsorção de urânio. Em condições oxidantes  $U^{6+}$  forma o íon uranila ( $UO_2^{2+}$ ) que é altamente solúvel e forma complexos estáveis com os ânions comuns dissolvidos em águas subterrâneas. Em condições

ácidas, os principais complexos de uranila são formados com o fosfato e em condições alcalinas são formados com os carbonatos.

Pela Resolução do CONAMA nº396 de 2008, o limite em água subterrânea é de 0,015 mg/L e pela Portaria do Ministério da Saúde nº. 2914/2011 e pelo WHO (2017) é 0,03 mg/L. Como estes expressam os valores mais recentes na comunidade científica, foi adotado como limítrofe para as amostras analisadas.

Na área foram detectados dois poços acima do limite da legislação que corresponde aos pontos AC-14 e o AC-21. No poço AC-14 foi medido o valor de 0,10 mg/L e está instalado na comunidade de Monsenhor Bastos no município de Lagoa Real, e atende a população como água para serviços domésticos. No poço AC-21, na localidade de Canabrava do mesmo município, foi detectado o valor de 0,03 mg/L. É um poço em área particular, que atendia uma pequena plantação e estava lacrado durante a última visita de campo, em razão de medidas realizadas pela prefeitura que constatou altos teores de urânio.

Segundo Silva (2011), a absorção do urânio a partir do trato gastrointestinal depende de fatores como a solubilidade do composto deste elemento. Os rins são considerados o principal órgão alvo da toxicidade química do urânio em seres humanos, sendo o esqueleto o principal local de acumulação dentro do organismo. Num estudo realizado por Kurttio et al (2005) foi comprovado que a ingestão do urânio através da água pode alterar de forma significativa alguns indicadores bioquímicos de modelação óssea em seres humanos, o que caracteriza a toxicidade do urânio no osso. Este elemento é liberado da superfície óssea de forma mais lenta que o cálcio. O acúmulo de urânio no osso é reflexo de uma exposição em longo prazo, enquanto que na urina

reflete exposição recente. Destaca-se também o estudo de Prado et al (2007), onde foi analisado dentes humanos como bioindicadores da contaminação, e que comprovou através da ingestão da água contaminada, concentrações de U amostrados no local corresponde cerca de 100 vezes a concentração média mundial. Já existem alguns métodos que podem ser aplicados com a finalidade de remover grande parte do urânio da água como a filtração (ou coagulação), osmose reversa e troca aniônica que pode chegar a remover 100% do urânio da água (WHO 2, 2011).

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde n°. 2914/2011 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade estabelecem como níveis de triagem os valores máximos de referência de 1 Bq/L para  $^{226}\text{Ra}$  e 0,1 Bq/L para  $^{228}\text{Ra}$ .

As concentrações naturais de rádio em águas subterrâneas estão relacionadas ao tipo de rocha do aquífero, condições físico-químicas do meio e tempo de contato (Bonoto & Silveira 2006). Quimicamente esses radioisótopos reagem de forma semelhante a outros cátions alcalino-terrosos tais como cálcio e estrôncio e é mais semelhante a bário. A solubilidade do elemento não varia entre os isótopos, sendo controlada pela adsorção superficial. Segundo Vinson (2009) a mobilidade do rádio ou a eficácia da adsorção podem variar em função dos parâmetros químicos incluindo o pH, salinidade, ambientes redutores, supersaturação de barita, redução microbiana de sulfato afetando a estabilidade da barita e redução de óxido de ferro microbiano. Também ocorre uma forte afinidade por partículas sólidas, como argilas e óxidos hidratados. Os óxidos hidratados de  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Mn}^{4+}$  possuem alta capacidade de sorção para íons de metal bivalente (Hanslik, E. e Mansfeld, A., 1990).

Na área apresenta, em média, a concentração de 0,52 Bq/L e mediana de 0,47 para  $^{226}\text{Ra}$ . Esse valor é abaixo do limite utilizado, porém o valor máximo é de 1,03 Bq/L no poço AC-10, sendo este o único poço que ultrapassa esse limite. Já para o isótopo  $^{228}\text{Ra}$ , com o valor médio de 0,91 Bq/L e mediana de 0,74 Bq/L, estão acima do limite em todos os poços amostrados; o valor máximo de 2,92 Bq/L foi obtido no poço AC-08.

Fazendo uma relação entre os dois isótopos, observa-se que o  $^{228}\text{Ra}$  possui teores maiores na área como um todo. Isto ocorre porque, em geral, o tório é mais abundante na crosta terrestre do que o elemento urânio, sendo que a média crustal para o Th: 10 ppm e para o U: 2 a 3 ppm (Plant et al, 2012). Nos poços AC-04, AC-07, AC-14 e AC-21 há um enriquecimento relativo do  $^{226}\text{Ra}$  em relação ao  $^{228}\text{Ra}$ , que pode ocorrer devido uma concentração localmente maior do urânio em relação ao tório.

O rádio, que possui comportamento análogo ao cálcio no organismo, fixa-se nos ossos, e assim podem desenvolver processos carcinogênicos. Segundo Lima (1996), estes ao serem ingeridos em altas concentrações poderão causar um aumento significativo nos casos de câncer de bexiga, pulmão e tórax.

Em geral, para minorar a exposição, o tratamento para diminuição de rádio na água combina coagulação com sedimentação ou filtragem com troca iônica que pode ser eficaz na remoção de radionuclídeos variando de cerca de 30% a 100%, e tipicamente cerca de 70% para os principais radionuclídeos naturais, como rádio e urânio (WHO).

O radônio dissolvido nas águas subterrâneas pode migrar por longas distâncias através de fraturas e cavernas dependendo da velocidade do fluxo do fluido. Dados de uma pesquisa internacional (UNSCEAR, 2000) concluíram que, em média, 90% da

dose que se atribui ao radônio na água potável são provenientes de inalação em vez de ingestão. Este elemento dissolvido na água pode ser liberado do ar quando são utilizados em atividades associadas com a água aquecida ou agitada como a ebulição, chuveiros e descargas no banheiro. A agência americana USEPA (1999) utiliza como limite para potabilidade de água, 300 pCi/L, ou seja, 11,1 Bq/L de radônio dissolvido. A Organização Mundial da Saúde recomenda um nível de referência para 100 kBq/m<sup>3</sup> ou 100 Bq/L (WHO, 2009).

Na área foi detectada uma grande amplitude de resultados. A concentração em média é de 184,5 Bq/L e mediana de 107,0 Bq/L. No poço AC-07 foi medido 32,1 Bq/L, que é o menor valor encontrado, enquanto que no AC-08 tem o exorbitante valor de 1187,2 Bq/L. Esses valores já ultrapassam os valores utilizados pela Organização Mundial da Saúde para potabilidade de água. Como foi visto anteriormente no mapa de gamaespetrometria (figura 3), o radônio está mais concentrado nos poços situados onde assinatura de tório é maior, contribuindo também à proximidade das zonas tectonizadas principais, como falhas e fraturas regionais. É o caso do ponto AC-08, que está situado nas imediações da falha que separa duas unidades litológicas importantes: o embasamento arqueano e o Complexo Lagoa Real de idade paleoproterozóica. O <sup>222</sup>Rn não forma compostos químicos e ao ser formado no retículo cristalino é facilmente removido e mobilizado por difusão através da emanção, faz com que os teores de <sup>222</sup>Rn muito maiores que o nuclídeo-pai, o <sup>226</sup>Ra.

Há estudos divulgados que o radônio e seus filhos são a segunda causa de câncer de pulmão. Segundo Correa *et. al* (2015) o <sup>222</sup>Rn dissolvido na água é uma fonte de

exposição humana, principalmente quando o gás é liberado no interior das residências, e incorporado no corpo humano através das vias respiratórias.

Na figura 5 foi confeccionado um gráfico que demonstra a concentração dos radionuclídeos com relação aos limites para consumo humano. Os teores dos isótopos de rádio foram somados para ficar mais evidente a relação do elemento rádio com o radônio. Com isso, pode ser notado que o padrão de concentração do radônio é acompanhado pelos isótopos de rádio. O ponto AC-08 perfaz a maior concentração dos radionuclídeos, em virtude de estar localizado nas imediações da falha que limita o embasamento arqueano com o Complexo Lagoa Real, onde pode ter ocorrido uma maior interferência de fluidos que dão origem a mineralização, além de estar numa área de movimentação tectônica, no qual imprime suas características na água subterrânea local. É importante salientar que para o parâmetro  $Ra^{2228}$  todos os poços estão acima do limite para consumo humano.

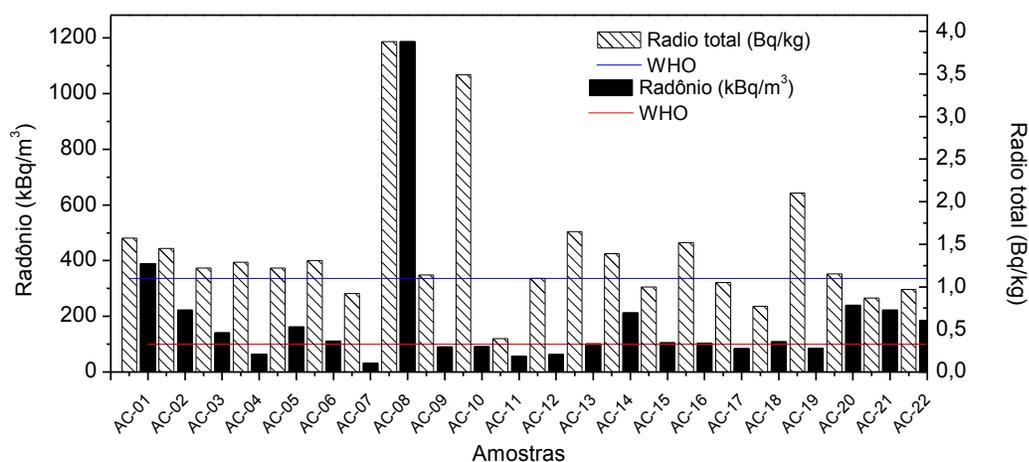


Figura 5: Resultados agrupados de radônio ( $\text{kBq/m}^3$ ) e rádio total ( $\text{Bq/L}$ ) e seus respectivos limites para potabilidade de água para consumo humano.

## CONCLUSÕES

A área de estudo, situada na Província Uranífera de Lagoa Real, é uma das maiores do mundo e, por conseguinte, imprime características peculiares ao seu substrato cristalino. Elementos químicos, mesmo que ocorram naturalmente no meio ambiente, podem produzir efeitos adversos à saúde quando são ingeridos em altas concentrações.

Em relação ao padrão de potabilidade das águas subterrâneas, pela Portaria N.º 1469/2000 do Ministério da Saúde, indica que para STD o valor máximo permitido é de 1000 mg/L e é ultrapassado nos poços AC-11, AC-15, AC-20, AC-21 e AC-22 e para Turbidez o VMP é de 5,0 NTU, sendo acima do limite no poço AC-04 e AC-14.

Dentre os elementos radioativos, o  $^{228}\text{Ra}$  apresenta-se em concentrações maiores que o limites estabelecido pela Portaria 2914/2011 em todos os poços. Isso pode ser explicado pela concentração maior do seu progenitor, o tório, que é três vezes mais abundante na crosta terrestre do que o urânio. Através dos mapas de gamaespectrometria podem ser comprovados que essa área é abundante nos elementos pais do rádio e radônio, representando a Província Uranífera de Lagoa Real. O radônio encontra-se dissolvido nas águas subterrâneas e pode migrar por longas distâncias através de estruturas tectonizadas (falhas e fraturas) e dependendo da velocidade do fluxo do fluido e pelo processo de difusão diretamente do mineral. Isto ocorre logo após o decaimento do seu elemento-pai e faz com que os teores de  $^{222}\text{Rn}$  sejam muito maiores que o  $^{226}\text{Ra}$ . Na área, as concentrações de radônio variaram amplamente, sendo que registros acima do limite estabelecido pela Organização

Mundial da Saúde foram detectados em quatorze dos vinte e dois poços, na sua maioria, situados nas proximidades de falhas e fraturas regionais.

Os radionuclídeos estudados são potencialmente prejudiciais à saúde humana, principalmente por serem carcinogênicos. O urânio pode alterar de forma significativa alguns indicadores bioquímicos de modelação óssea em seres humanos, o que caracterizaria a toxicidade do urânio no osso. Além disso, outros radionuclídeos podem estar presentes na água. O  $^{226}\text{Ra}$  e  $^{228}\text{Ra}$  ao serem ingeridos em altas concentrações poderão causar um aumento significativo nos casos de câncer de bexiga, pulmão e tórax em virtude do seu comportamento análogo ao cálcio no organismo, fixando-se nos ossos. Há estudos divulgados que o radônio é a segunda causa de câncer de pulmão, principalmente porque o gás ao ser liberado da água de torneira e chuveiros pode ser incorporado ao corpo humano através das vias respiratórias.

No entanto, outros elementos também estão acima do permitido e, assim, podem ocasionar problemas ao serem ingeridos. É o caso do ferro, manganês e cloreto que são micronutrientes essenciais à vida humana, e que estão acima do aceitável em quatro poços para o ferro, e em sete poços para o manganês e cloreto. O sódio, que também é essencial, ocorre também com teores acima em três poços. O flúor e o nitrato ocorrem em dez e em treze poços respectivamente, e são os mais preocupantes no tocante aos danos à saúde humana. O flúor em excesso pode ocasionar fluorose dentária e esquelética e o nitrato que pode ser fatal para crianças de até seis meses de idade. Recomenda-se fazer análises de isótopos de nitrogênio para ter certeza da fonte da contaminação do nitrato.

A utilização de filtros que combina coagulação com sedimentação ou filtração com troca iônica pode ser eficaz, visando mitigar a exposição aos teores de rádio na água. O rádio possui alto teor de adsorção com partículas de argila e óxidos hidratados. Devido a meia-vida curta do radônio de 3,8 dias, ações mitigatórias são simples e não envolvem custos altos, como por exemplo, a não utilização da água imediatamente e o armazenamento em caixa d'água externas, e assim, o gás é liberado para a atmosfera e se dissipa.

## REFERÊNCIAS

Bastos-Leal L.R., Teixeira W, Cunha J.C. & Macambira M.J.B. 1997. Crustal evolution of Gavião block of the São Francisco Craton: A geochronological study with U-Pb, Pb-Pb, Sm-Nd, Rb-Sr and K-Ar. In: **South American Symposium on Isotope Geology**, 2, Extended Abstract, p. 161-162.

Biguelini, C.P., Gummy, M.P. Saúde Ambiental: Índices de nitrato em águas subterrâneas de poços profundos na região sudoeste do Paraná. V(14) nº 20. Jul/Dez 2012, pp. 153-175.

Bonotto, D.M. e Silveira, E.G. Geoquímica do urânio aplicada a águas minerais. São Paulo: Editora UNESP, 160p, 2006.

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.

Brasil, Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA Nº 396/2008 - Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Publicada no DOU nº 66, de 07/04/2008, Seção 1, páginas 64-68.

Chen P. et al. 2015. Manganese homeostasis in the nervous system, International Society for Neurochemistry, doi: 10.1111/jnc.13170, **Journal of Neurochemistry**. (2015), 134, 601-610.

Cordani U.G., Iyer S.S., Taylor P.N., Kawashita K., Sato K. & Mcreath I. 1992. Pb-Pb, Rb-Sr, and K-Ar systematic of the Lagoa Real uranium province (south-central Bahia, Brazil) and the Espinhaço Cycle (ca. 1.5-1.0 Ga). **J. South Am. Earth Sci.**, 1:33-46.

Corrêa, J.N. et al. Monitoramento da radioatividade alfa relacionada ao radônio-222 em águas de poços da região metropolitana de Curitiba (PR). **Eng. Sanit.Ambient.** v.20 n.2 p243-250, abril de 2015.

Cruz, S.C.P et al. Geologia e arcabouço estrutural do Complexo Lagoa Real, Vale do Paramirim, Centro-Oeste da Bahia. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.37, n.4 - suplemento, p.128-146, 2007

Hanslik, E. e Mansfeld, A. Removal of radium of drinking water. In: "The Environmental Behavior of Radium" IAEA Technical Report Series 310 (2 vols). International Atomic Energy Agency, Vienna, 1990.

Kurtio, P. et al. Bone as a possible target of chemical toxicity of natural uranium in drinking water. **Environmental Health Perspectives**, Durham, USA, v.113, n.1, p. 68–72, 2005.

Kwakyé, G.F. *et al*, 2015. Manganese-Induced Parkinsonism and Parkinson's Disease: Shared and Distinguishable Features. **Int. J. Res. Public Health**, 12, 7519-7540, doi: 10.3390/ijrph120707519.

LASA ENGENHARIA E PROSPECÇÃO S. A. **Projeto Levantamento Aerogeofísico da área Campo Alegre de Lourdes / Mortugaba**: relatório final de aquisição e processamento de dados. Rio de Janeiro, 2006. v. 1. Convênio de Cooperação Técnica com a CBPM - Companhia Baiana de Pesquisa Mineral e CPRM - Serviço Geológico do Brasil.

Lima, R. A. Avaliação da dose na população da região urano-fosfática do nordeste que utiliza os recursos hídricos da região. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 1996.

Mapas Geológicos Estatuais: Mapa Geológico do Estado da Bahia 1:1.000.000 - Fonte: GEOSGB/CPRM, último acesso em 19/10/2018.

Oliveira, J.E. Implicações de Radioelementos no Meio Ambiente, Agricultura e Saúde Pública em Lagoa Real, Bahia, Brasil. In: SILVA, C. R. et al. (Ed.) **Geologia Médica no Brasil**: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente. Rio de Janeiro: CPRM; FAPERJ, 2006. p.148-156.

Pedrosa-Soares, A.C. et al. The Araçuaí-West-Congo Orogen in Brazil: an overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. **Precambrian Research**, Amsterdam, v.1, n.4, p.307-323, 2001.

Pimentel M.M., Machado N. & Lobato L.M. 1994. Geocronologia U/Pb de rochas graníticas e gnáissicas da região de Lagoa Real, Bahia, e implicações para a idade da mineralização de urânio. In: SBG, **Cong. Bras.Geol.**, 38, Boletim de Resumos Expandidos, p. 389-390

Plant, J. et al. Pollutants, human health, and the environment: a risk based approach. 2012.

Prado, G.R. Estudo de contaminação ambiental por urânio no município de Caetité-Ba, utilizando dentes de humanos como bioindicadores. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente, Universidade Estadual de Santa Cruz, Ilhéus, 182f. 2007

Queiroz, E.T. Diagnóstico de águas minerais e potáveis de mesa do Brasil. In: Anais...Congresso Brasileiro De Águas Subterrâneas, 13., Cuiabá, 2004. Cuiabá: ABAS, 2004.

Silva, L.S. Avaliação da Radioatividade Natural em Águas Potáveis, de Superfície e Subterrâneas da Região de Caetité, BA. 2011. 114f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2011.

Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, APHA, 20th ed.,1998.

Turpin L., Maruèjol P. & Cuney M. 1988. U-Pb, Rb-Sr and Sm-Nd chronology of granitic basement, hydrothermal albitites and uranium mineralization, Lagoa Real, South Bahia, Brazil. **Contrib. Mineral. Petrol.** 98:139-147.

Velásquez L.N.M., Fantinel L.M., Ferreira E.F.E., Castilho L.S., Uhlein A., Vargas A.M.D., Aranha P.R.A. 2006. Fluorose dentária e anomalias de flúor na água subterrânea no município de São Francisco, Minas Gerais. In: **Geologia Médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente.** Rio de Janeiro: CPRM; FAPERJ, 2006. p110-117.

UNITED SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION UNSCEAR. The 2000 Report to the General Assembly with scientific Annexes. New York: United Nations, 2000.

USEPA, 1999. **United States Environmental Protection Agency: National Primary Drinking Water Regulations; Radon-222 (1999).**

Vinson, D.S et al. Relationships between radium and radon occurrence and hydrochemistry in fresh groundwater from fractured crystalline rocks, North Carolina (USA). **Chemical Geology** 260 (2009) 159–171

WHO, 2009. World Health Organization. Handbook on Indoor Radon. A Public Health Perspective, Switzerland: WHO press, 2009.

WHO, 2011. Guidelines for drinking-water quality - 4th ed. Switzerland: WHO press, 2011.

WHO, 2017. Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum: Switzerland: WHO press, 2017.

WHO (2), 2011: Uranium in Drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Switzerland: WHO press, 2011.

## **CAPÍTULO IV**

### **CONCLUSÕES**

---

A área, situada na Província Uranífera de Lagoa Real é uma das maiores do mundo e, por conseguinte, imprime características peculiares ao seu substrato. Elementos químicos, mesmo que ocorram naturalmente no meio ambiente podem produzir efeitos adversos à saúde quando são ingeridos em concentrações acima de limites máximos recomendados. As condições de dissolução das rochas bem como os fatores que promovem sua circulação em subsuperfície fornecem características físico-químicas nas águas subterrâneas.

Os poços de água subterrânea que estão inseridas nas unidades que representam o embasamento arqueano da área em estudo são classificadas, em sua maioria, como água sódica bicarbonatada. Já nas rochas pertencentes ao Complexo Lagoa Real são, em sua maior parte, águas cloretadas podendo variar de sódica, cálcica ou mista.

Através da análise dos parâmetros físico-químicos, que alguns poços possuem resultados superiores aos valores máximos permitidos informados pela Resolução do Conama 396/2008. No parâmetro Turbidez, as amostras dos poços AC-04 e AC-14 possuem valores acima de 5 NTU, que é o limite aceito. Ainda de acordo com essa Resolução, os poços AC-11, AC-15, AC-20, AC-21 e AC-22, possuem valores acima de 1000 mg/l para o parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD). Para Condutividade Elétrica, que está ligada a salinidade, somente o poço AC-20 está superior ao aconselhado para o consumo humano, que é de 3000 $\mu$ mho/cm, sendo classificada como água salgada.

Com relação aos valores dos isótopos estáveis, conclui-se que são águas similares que sofreram evaporação. As amostras estão posicionadas abaixo da Linha Meteórica Global e dos dados históricos locais da AIEA, o que condiz com o clima local, de acordo com o padrão de evaporação da área, considerando a época da coleta e o lençol freático sendo influenciado pela evaporação. O poço AC-17 demonstra ser o local onde ocorre maior perda evaporativa, apresenta o menor valor para o excesso de deutério, apesar da evaporação não estar afetando a salinidade deste poço.

Para o urânio foi detectado no poço AC- 14, localizado na comunidade de Monsenhor Bastos e que atende a população local como água para serviços domésticos, a maior concentração deste elemento que é de 0,10 mg/L. Em razão disso, é aconselhado alertar a população que esta água não deve ser ingerida bem como não utilizar em plantações ou criações de animais. Nos resultados de trabalhos anteriores que foram adicionados a este estudo, o urânio encontra-se acima dos limites em quase todos os oito poços analisados. Estes poços estão majoritariamente na área do Complexo Lagoa Real e apenas um no embasamento. Embora localizados próximos um ao outro, poços em aquíferos fissurais podem não ter a mesma concentração de elementos químicos em razão de refletir a composição química do substrato e a conexão entre as falhas e fraturas no seu substrato.

Através dos mapas de gamaespectrometria podem ser comprovados que essa área é abundante nos elementos pais do rádio e radônio, representando a Província Uranífera de Lagoa Real. Todos os poços estão acima do limite para  $^{228}\text{Ra}$  e em apenas um poço para  $^{226}\text{Ra}$  que é explicado pela maior concentração de  $^{232}\text{Th}$  na crosta terrestre em relação ao  $^{238}\text{U}$ . A mobilidade de rádio pode ser influenciada pelo pH,

deslocamento da partícula alfa (*alpha recoil*) e/ou competição com outros cátions divalentes.

O radônio, por ser um gás encontra-se mais concentrado nas áreas vizinhas a falhas. Fato este comprovado pela concentração maior no poço situado próximo a falha que limita o embasamento e o Complexo Lagoa Real, o poço AC-08. Este elemento é transferido para a água, sendo mobilizado por difusão diretamente do retículo cristalino dos minerais, imediatamente após o decaimento do seu elemento-pai. Esse processo se chama de *emanação*, e quando ocorre e há a liberação completa a partir do material sólido, acarretando teores de  $^{222}\text{Rn}$  muito maiores que o nuclídeo-pai, o  $^{226}\text{Ra}$ .

Os radionuclídeos estudados são potencialmente prejudiciais à saúde humana, principalmente por serem carcinogênicos. No entanto, outros elementos também ocorrem acima do permitido e, assim, podem ocasionar problemas ao serem ingeridos. É o caso do ferro, manganês e cloreto que são micronutrientes essenciais à vida humana, e que estão acima do permitido em quatro poços para o ferro, e em sete poços para o manganês e cloreto. O sódio, que também é um elemento essencial, ocorre com teores que superam o permitido em três poços. O flúor e o nitrato, que são superiores ao estabelecido para consumo humano em dez e em treze poços respectivamente, e são os mais preocupantes no tocante aos danos à saúde humana. O flúor em excesso pode ocasionar fluorose dentária e esquelética e o nitrato que pode ser fatal para crianças de até seis meses de idade. No caso do nitrato é recomendado fazer análises de isótopos de nitrato para ter certeza da fonte desta contaminação.

Os principais órgãos alvo da toxicidade química do urânio em seres humanos são os rins e o esqueleto o principal local de acumulação do urânio no nosso corpo. O

acúmulo de urânio no osso é reflexo de uma exposição em longo prazo enquanto que na urina reflete exposição recente. Da mesma forma o rádio, que possui comportamento análogo ao cálcio no organismo, fixa-se nos ossos e assim podem desenvolver processos carcinogênicos. Ao serem ingeridos em altas concentrações poderão causar um aumento significativo nos casos de câncer de bexiga, pulmão e tórax. Há estudos divulgados que o radônio e seus filhos são a segunda causa de câncer de pulmão, em virtude de serem incorporados através das vias respiratórias principalmente porque o gás é liberado da água de torneira e chuveiros, no interior das residências.

Existem métodos que podem ser aplicados com a finalidade de remover grande parte do urânio da água como a filtração (ou coagulação), osmose reversa e troca aniônica que pode chegar a remover 100% do urânio da água. A utilização de filtros com troca iônica combinados com a coagulação é eficaz para mitigar a exposição do rádio, e pode ser aplicada como forma de diminuição destes em água, em virtude do rádio possuir alto teor de adsorção com partículas de argila e óxidos hidratados. Na área ocorre uma grande amplitude de concentração de radônio, sendo acima do limite em quatorze poços. No entanto, devido sua meia-vida curta de 3,8 dias, ações mitigatórias são simples e não envolvem altos custos, como por exemplo, a não utilização da água imediatamente e sua disposição em caixa d'água externas para o gás ser dissipado na atmosfera, o que ocorre com maior eficiência se a água for borrifada ou aspergida ao entrar no reservatório.

## **APÊNDICE A – JUSTIFICATIVA DA PARTICIPAÇÃO DOS CO-AUTORES**

---

Co-orientadora: Dr<sup>a</sup>. Maria do Rosário Zucchi: participação efetiva durante toda a dissertação, com ênfase nas análises isotópicas no laboratório de Física Nuclear e na discussão de resultados.

Ms. Zildete Rocha: participou da amostragem durante a etapa de campo bem como acompanhou as análises de rádio no laboratório do CDTN. Além disso, contribuiu bastante na discussão dos resultados.

## APÊNDICE B - TABELAS DE CORRELAÇÃO

Tabela 1: Matriz de correlação linear de *Spearman* dos elementos radioativos com os parâmetros físico-químicos.

Variáveis	CE $\mu\text{S/cm}$	pH	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	Turbidez	STD (mg/L)	OD mg/L	U mg/L	$^{222}\text{Rn}$ Kbg/m <sup>3</sup>	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)
CE $\mu\text{S/cm}$	<b>1</b>									
pH	0,630	<b>1</b>								
T ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,431	0,405	<b>1</b>							
Turbidez	-0,003	0,194	-0,166	<b>1</b>						
STD (g/L)	1,000	0,629	0,429	-0,003	<b>1</b>					
OD mg/L	-0,176	0,210	-0,122	0,519	-0,185	<b>1</b>				
U mg/L	0,355	0,446	-0,045	0,236	0,364	-0,050	<b>1</b>			
$^{222}\text{Rn}$ KBq/m <sup>3</sup>	0,037	-0,306	-0,265	-0,135	0,046	-0,160	0,233	<b>1</b>		
$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	-0,255	-0,079	-0,229	0,315	-0,248	-0,177	0,077	0,189	<b>1</b>	
$^{228}\text{Ra}$ (Bq/L)	-0,363	<b>-0,620</b>	-0,324	-0,059	-0,362	-0,106	-0,363	0,286	0,263	<b>1</b>

Tabela 2: Matriz de correlação (*Spearman*) entre os elementos químicos analisados. Nota-se que alguns elementos químicos do pacote total de análises foram suprimidos, em virtude de apresentarem concentrações mais baixas que o limite detectável pelo laboratório.

Variáveis	U mg/L	<sup>222</sup> Rn kBq/m3	<sup>226</sup> Ra (Bq/L)	<sup>228</sup> Ra (Bq/L)	Na mg/L	K mg/L	Ca mg/L	Mg mg/L	Fe mg/L	Mn mg/L	Ba mg/L	Sr mg/L	Li mg/L	Si mg/L	CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> mg/L	F <sup>-</sup> mg/L	Cl mg/L	Br <sup>-</sup> mg/L	NO <sup>3-</sup> mg/L	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> mg/L
U mg/L	<b>1,00</b>																			
<sup>222</sup> Rn kBq/m3	0,23	<b>1,00</b>																		
<sup>226</sup> Ra (Bq/L)	0,08	0,19	<b>1,00</b>																	
<sup>228</sup> Ra (Bq/L)	-0,36	0,29	0,26	<b>1,00</b>																
Na mg/L	0,29	-0,10	-0,23	-0,39	<b>1,00</b>															
K mg/L	0,26	0,20	-0,16	-0,32	0,69	<b>1,00</b>														
Ca mg/L	0,34	0,11	-0,23	-0,39	0,79	0,68	<b>1,00</b>													
Mg mg/L	0,24	0,23	-0,19	-0,38	0,80	0,83	0,76	<b>1,00</b>												
Fe mg/L	-0,03	-0,13	-0,09	-0,37	0,14	0,09	0,08	0,16	<b>1,00</b>											
Mn mg/L	0,43	0,19	-0,23	-0,05	0,47	0,22	0,43	0,47	0,42	<b>1,00</b>										
Ba mg/L	-0,01	0,05	0,02	-0,11	0,02	0,30	0,23	0,16	-0,24	-0,28	<b>1,00</b>									
Sr mg/L	0,18	-0,02	-0,22	-0,25	0,65	0,73	0,83	0,62	0,04	0,30	0,23	<b>1,00</b>								
Li mg/L	0,50	0,01	0,07	-0,15	0,54	0,23	0,59	0,20	-0,16	0,30	0,11	0,49	<b>1,00</b>							
Si mg/L	-0,09	-0,02	0,17	-0,14	0,06	0,17	-0,22	0,14	-0,35	-0,49	0,23	-0,25	-0,32	<b>1,00</b>						
CO <sub>3</sub> + HCO <sub>3</sub> mg/L	0,13	0,23	0,33	0,00	-0,10	0,04	-0,11	0,10	0,00	0,15	0,06	-0,25	-0,13	0,14	<b>1,00</b>					
F <sup>-</sup> mg/L	0,10	-0,18	0,36	0,01	-0,01	-0,24	0,04	-0,37	-0,25	-0,26	0,18	0,08	0,55	-0,14	-0,04	<b>1,00</b>				
Cl mg/L	0,22	0,07	-0,33	-0,30	0,90	0,78	0,92	0,85	0,02	0,39	0,22	0,76	0,53	-0,05	-0,14	-0,10	<b>1,00</b>			
Br <sup>-</sup> mg/L	0,37	0,02	-0,20	-0,36	0,94	0,81	0,88	0,85	0,10	0,45	0,15	0,74	0,54	-0,01	-0,05	-0,08	0,95	<b>1,00</b>		
NO <sup>3-</sup> mg/L	0,04	0,14	-0,20	-0,09	0,09	0,05	0,12	0,13	-0,45	-0,32	0,39	-0,01	0,07	0,37	-0,02	0,21	0,16	0,04	<b>1,00</b>	
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> mg/L	0,38	-0,22	-0,31	-0,39	0,86	0,56	0,71	0,66	0,25	0,68	-0,14	0,69	0,50	-0,20	-0,10	-0,01	0,73	0,80	-0,13	<b>1,00</b>

# ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

---

## Diretrizes para Autores

### Cadastro

Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/>  
 Clicar em “CADASTRO” e preencher o formulário. Não esquecer de ativar as caixas de “LEITOR” e “AUTOR”

### Submissão

1. Entrar na página da revista: <http://aguassubterraneas.abas.org/> e clicar em “PÁGINA DO USUÁRIO”
2. Clicar em “AUTOR”
3. Na página “SUBMISSÕES ATIVAS”, clicar em “Clique aqui para iniciar o processo de Submissão” (final da página) ou em “NOVA SUBMISSÃO” (coluna à direita).
4. Na página seguinte: “PASSO 1. INICIAR SUBMISSÃO”, ativar a caixa “DECLARAÇÃO DE DIREITO AUTORAL” e escolher a seção apropriada para a submissão (= “ARTIGOS”).
5. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
6. Na página seguinte: “PASSO 2. METADADOS DA SUBMISSÃO (INDEXAÇÃO)”, incluir os nomes dos autores e seus respectivos e-mails.
7. Complete o resto do formulário com os dados do artigo: Título, resumo, abstract, indexação e agência de fomento.
8. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
9. Na página seguinte: “PASSO 3. TRANSFERÊNCIA DO MANUSCRITO”, leia os itens 1 a 5 e, principalmente, o texto vinculado ao link “Assegurando uma Avaliação Cega segura”
10. Para transferir o arquivo, clicar em “PROCURAR”. Na janela “PROCURAR ARQUIVO” selecionar o arquivo e clicar em “ABRIR”. O nome do arquivo aparecerá ao lado do botão Browse. Clicar em “TRANSFERIR”.
11. Sob o título “DOCUMENTO DE SUBMISSÃO”, aparecerão os dados do arquivo. Por exemplo:
 

Nome do documento:	9588-29437-1-SM.doc
Nome original do Documento:	Drumond.doc
Tamanho do Documento:	19KB
Data de transferência:	2007/10/19 11:48 AM
12. Conferir os dados e clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
13. Na página seguinte: “PASSO 4. TRANSFERÊNCIA DE DOCUMENTOS SUPLEMENTARES”, repetir os passos do item “TRANSFERÊNCIA DE ARQUIVOS”, caso tenha algum documento suplementar a ser enviado.
14. Clicar em “SALVAR E CONTINUAR”
15. Na página seguinte: “PASSO 5. CONFIRMAÇÃO DA SUBMISSÃO”. Conferir os dados informados em “RESUMO DE DOCUMENTOS” e clicar em “CONCLUIR SUBMISSÃO”
16. [Visualização do Andamento da Submissão](#)

1. O autor poderá acompanhar o andamento da avaliação. Para isso, basta acessar o sistema, localizar o nome do artigo submetido e clicar no link da coluna "SITUAÇÃO", por exemplo: "Em fila para Avaliação"
2. Os arquivos com os comentários dos revisores estarão disponíveis para leitura ou para baixar no computador, em "POR PARES". Basta clicar no nome do "DOCUMENTO TRANSFERIDO", que surgirá a opção para abrir ou baixar o arquivo.

## Orientações para Preparação de Artigo Científico

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 deverá ser apresentado 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 seqüencialmente 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 seqüencialmente. 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.

### Orientações para Preparação de Estudo de Caso e Notas Técnicas

Para submissão na seção ECNT, o manuscrito deve ser formatado conforme **este template**. Os artigos submetidos nessa seção terão o número DOI, mas não serão formatados pela equipe editorial da Revista Águas Subterrâneas. O número máximo de páginas para essa seção é de 30 páginas. 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.

### Informações Adicionais

Ao submeter o artigo à Revista Águas Subterrâneas, os autores declaram conjuntamente que consentem com a publicação do trabalho, com aceitação das recomendações dos relatores e a confirmação de não publicação em nenhum outro veículo enquanto estiver sendo avaliado pelos membros do Corpo Consultivo da revista.

**A avaliação dos manuscritos é duplamente cega, isto é, tanto os avaliadores quanto os autores não tem acesso às identidades uns dos outros.** O trabalho será submetido a pelo menos 3 (três) avaliadores, os quais emitirão pareceres independentes recomendando ou não sua publicação, havendo ou não a necessidade de revisão do texto. Em caso de trabalho não aceito, será feito um comunicado aos autores informando, sucintamente, o motivo da recusa para publicação.

Após a adaptação do texto às recomendações dos avaliadores e editores, os autores enviarão ao Comitê Editorial uma cópia em meio digital para a análise final do trabalho. Os editores reservam-se o direito de fazer adaptações na forma do texto para manter a uniformidade da revista.

Antes da impressão da revista, os editores disponibilizarão no próprio sistema uma prova do trabalho para verificação e correção de possíveis erros de digitação e/ou diagramação. Nesta etapa, não serão admitidas quaisquer alterações no conteúdo do texto. Os autores deverão se manifestar sobre a aceitação da prova no prazo de 5 (cinco) dias. Excedido esse prazo, o artigo será considerado pronto para impressão.

## Condições para submissão

Como parte do processo de submissão, os autores são obrigados a verificar a conformidade da submissão em relação a todos os itens listados a seguir. As submissões que não estiverem de acordo com as normas serão devolvidas aos autores.

1. Este documento submetido para a Revista Águas Subterrâneas é original, não tendo sido publicado no todo ou em parte em outro periódico ou anais de evento

## Declaração de Direito Autoral

Direitos Autorais para artigos publicados nesta revista são do autor, com direitos de primeira publicação para a revista. Em virtude de aparecerem nesta revista de acesso público, os artigos são de uso gratuito, com atribuições próprias, em aplicações educacionais e não-comerciais.

## Política de Privacidade

Os nomes e endereços de email neste site serão usados exclusivamente para os propósitos da revista, não estando disponíveis para outros fins.

## ANEXO B – COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

#29272 Sinopse

- [RESUMO](#)
- [AVALIAÇÃO](#)
- [EDICÃO](#)

### Submissão

Autores	Aline da Costa Nogueira, Luiz Rogério Bastos Leal, Maria do Rosário Zucchi, Zildete Rocha	
Título	A QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA COM ÊNFASE NA TOXICIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.	
Documento original	<a href="#">29272-108052-1-SM.DOC</a>	11-12-2018
Docs. sup.	Nenhum(a)	<a href="#">INCLUIR DOCUMENTO SUPLEMENTAR</a>
Submetido por	Srta Aline da Costa Nogueira 	
Data de submissão	11 de dezembro de 2018 - 11:59	
Seção	Artigos	
Editor	Nenhum(a) designado(a)	

### Situação

Situação	Aguardando designação
Iniciado	11-12-2018
Última alteração	11-12-2018

### Metadados da submissão

[EDITAR METADADOS](#)

---

#### Autores

Nome	Aline da Costa Nogueira 
ORCID iD	<a href="https://orcid.org/0000-0003-3800-7032">https://orcid.org/0000-0003-3800-7032</a>
Instituição/Afiliação	Universidade Federal da Bahia
País	Brasil
Resumo da	Departamento de Geologia

## Biografia

Contato principal para correspondência.

Nome	Luiz Rogério Bastos Leal 
Instituição/Afiliação	Universidade Federal da Bahia
País	Brasil
Resumo da Biografia	Departamento de Geologia
Nome	Maria do Rosário Zucchi 
Instituição/Afiliação	Universidade Federal da Bahia
País	Brasil
Resumo da Biografia	Instituto de Física - Departamento Física Terra Meio Ambiente
Nome	Zildete Rocha 
Instituição/Afiliação	Comissão Nacional de Energia Nuclear
País	Brasil
Resumo da Biografia	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

---

### *Título e Resumo*

Título	A QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA COM ÊNFASE NA TOXICIDADE DOS RADIONUCLÍDEOS NA REGIÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL, BAHIA.
Resumo	Elementos químicos, mesmo que ocorram naturalmente no meio ambiente, podem produzir efeitos adversos à saúde quando são ingeridos em altas concentrações. A área está situada na Província Uranífera de Lagoa Real, onde ocorrem importantes mineralizações de urânio, e por essa razão são esperadas águas que contenham altas concentrações deste elemento e seus filhos. Durante a etapa de campo nos municípios Caetitê e Lagoa Real, foram amostrados 22 poços de água. Para os resultados de urânio, as amostras AC-14 e o AC-21 apresentam concentração de 0,10 mg/L e 0,03 mg/L, respectivamente e ultrapassam os valores máximos permitidos pelo CONAMA 396/2008 que é de 0,03mg/L. Para rádio-226, a amostra AC-10 com 1,03 Bq/L, ultrapassa o limite estabelecido pelo CONAMA para potabilidade de água. Para rádio-228, com concentrações em média de 0,91 Bq/L, e o valor máximo detectado na amostra AC-08 com 2,92Bq/L, sendo acima do limite em todos os poços amostrados. E por fim, para radônio, como uma concentração média de 184,5 kBq/m <sup>3</sup> que é acima do aconselhado pela Organização Mundial da Saúde, sendo o poço AC-08 com valores superiores a 1187,2 kBq/m <sup>3</sup> . Além disso, o ferro, manganês, sódio, nitrato e flúor também estão acima dos teores permitidos e afetam a qualidade da água para consumo humano. Os radionuclídeos estudados são potencialmente prejudiciais à saúde humana, principalmente por serem carcinogênicos.

---

## Indexação

Palavras-chave      Água subterrânea; Isótopos de Rádio; Radônio; Toxicidade

Idioma                      pt

---

## Agências de fomento

Agências                      NEHMA: Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente; CPRM: Serviço Geológico do Brasil

---

A revista *Águas Subterrâneas* é uma publicação da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas - ABAS - para divulgação de artigos científicos (originais e inéditos) sobre Hidrogeologia e outros temas pertinentes. Os artigos aceitos e finalizados são publicados em forma contínua e organizados sob a numeração de um Volume anual subdividido em vários Números com até 10 artigos cada um.

A Revista *Águas Subterrâneas* é um periódico com classificação QUALIS Nacional e Internacional.

A Revista *Águas Subterrâneas* não cobra dos autores quaisquer taxas para submissão ou publicação.

**DISCLAIMER:** Os *Suplementos de Anais* (congressos e encontros técnicos) aqui presentes são publicados na Revista *Águas Subterrâneas* exclusivamente por um ato de gentileza dos editores. De forma semelhante, os *Estudos de Caso e Notas Técnicas* são publicados com a intenção de prover um espaço para divulgação de dados e estudos de interesse local, sem obrigação de ter uma contribuição científica. Seus artigos NÃO PODEM e NÃO DEVEM ser considerados como publicações deste periódico. NÃO foram submetidos a revisão pelos avaliadores da revista. NÃO são contemplados na avaliação da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES). O objetivo é tão somente o de ampliar a divulgação destes anais, estudos de caso e notas técnicas. Além disso, nestes documentos não é necessária e não será apresentada a numeração sequencial de páginas, como é feito para os artigos científicos. Os anais de eventos devem ser citados como tal, sem referência a este periódico. A Revista *Águas Subterrâneas* não se responsabiliza pelo conteúdo publicado nessas seções.

**É de LIVRE acesso a todos os interessados, gratuitamente.**

ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, São Paulo, Brasil  
eISSN 2179-9784 (eletrônico)  
ISSN 0101-7004 (impresso)

Filiada:



Revista [Águas Subterrâneas](#) está licenciada com uma Licença [Creative Commons - Atribuição 4.0 Internacional](#).

Todos aqueles que se cadastram na Revista Águas Subterrâneas tornam-se *filiados* da ABAS gratuitamente, podendo usufruir de descontos em eventos e material técnico. Por extensão, tornam-se também associados do Capítulo Brasileiro da Associação Internacional de Hidrogeólogos\*, podendo também usufruir de descontos em eventos internacionais da IAH e outras ofertas. O acesso à revista é livre e independente do cadastramento.

\*Clique [aqui](#) para saber maiores detalhes e limitações dos filiados.