



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS (UFG)
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO (PRPG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS (PRPG-CIAMB)

REGINA APOLINÁRIA NOGUEIRA

Monitoramento ambiental da radioatividade em águas de abastecimento público de Goiás

GOIÂNIA
2024



UFG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES

E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese

2. Nome completo do autor

Regina Apolinária Nogueira

3. Título do trabalho

Monitoramento ambiental da radioatividade em águas de abastecimento público de Goiás

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Regina Apolinária Nogueira, Discente**, em 09/02/2024, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Sergio Scalize, Professor do Magistério Superior**, em 09/02/2024, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4340284** e o código CRC **CCC674A2**.

REGINA APOLINÁRIA NOGUEIRA

Monitoramento ambiental da radioatividade em águas de abastecimento público de Goiás

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PRPG-CIAMB), Pró-Reitoria de Pós-Graduação da Universidade Federal de Goiás (UFG), como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre.

Área de concentração: Estrutura e Dinâmica Ambiental

Linha de Pesquisa: Monitoramento e análise de recursos naturais

Orientador: Professor Doutor Paulo Sérgio Scalize

GOIÂNIA
2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Nogueira, Regina Apolinária
Monitoramento ambiental da radioatividade em águas de abastecimento público de Goiás [manuscrito] / Regina Apolinária Nogueira. - 2024.
120 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Sérgio Scalize.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Goiás, Pró reitoria de Pós-graduação (PRPG), Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Goiânia, 2024.

Bibliografia. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Radioproteção. 2. potabilidade radiológica. 3. dose efetiva. 4. monitoramento ambiental. I. Scalize, Paulo Sérgio, orient. II. Título.

CDU 502/504



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

GERÊNCIA DE CURSOS E PROGRAMAS INTERDISCIPLINARES

ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 006M/2024 da sessão de Defesa de Dissertação de **Regina Apolinária Nogueira**, que confere o título de Mestra em **Ciências Ambientais**, na área de concentração em **Estrutura e Dinâmica Ambiental**.

Aos **trinta e um dias do mês de janeiro do ano de 2024**, a partir das **14h**, na sala na sala virtual da plataforma **Google Meet**: <https://meet.google.com/feu-cpev-cse>, realizou-se por meio de videoconferência, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**Monitoramento ambiental da radioatividade em águas de abastecimento público de Goiás**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, Professor Doutor **Paulo Sérgio Scalize (EECA/UFG)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professora Doutora **Daniela de Melo e Silva (ICB/UFG)**, membro titular interno; e Professor Doutor **Cláudio Carlos da Silva (UEG/PUC/GO)**, membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido a candidata **aprovada** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor **Paulo Sérgio Scalize**, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **trinta e um dias do mês de janeiro do ano de 2024**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Sergio Scalize, Professor do Magistério Superior**, em 31/01/2024, às 16:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniela De Melo E Silva, Professora do Magistério Superior**, em 31/01/2024, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Apolinária Nogueira, Discente**, em 09/02/2024, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cláudio Carlos da Silva, Usuário Externo**, em 09/02/2024, às 13:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4340226** e o código CRC **8698C4FF**.

Referência: Processo nº 23070.004114/2024-86

SEI nº 4340226

AGRADECIMENTOS

Gostaria de direcionar meus agradecimentos a todos aqueles que ajudaram na concretização desta dissertação.

Sou grata aos meus pais, por sempre me incentivarem a superar os obstáculos da vida na busca das minhas conquistas pessoais.

Agradeço ao meu orientador Dr. Paulo Sérgio Scalize, pela sua disponibilidade na orientação da dissertação e por toda ajuda dada para a elaboração. As suas valiosas indicações foram essenciais para este trabalho.

Sou grata à equipe técnica da SANEAGO S.A., representados pelos queridos Valdson e Keyle. Também prolongo meus agradecimentos pela contribuição das dezenas de colegas da CNEN, representadas pelas estimadas Raquel e Kellen, pois através dos estudos e saberes compreendidos na instituição, foi possível fundamentar o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço a todo corpo docente do CIAMB – UFG, com dedicado carinho aos professores Daniela de Melo e Silva, Karla Maria Silva de Faria e Denilson Teixeira, que contribuíram direta e indiretamente para a conclusão deste trabalho, com palavras de incentivo para prosseguir na pesquisa científica sem esmorecer.

Por fim, agradeço a amizade e paciência dos colegas da pós-graduação e amigos, tornando mais agradável os últimos semestres, enquanto estávamos superando os desafios da pesquisa.

RESUMO

A presença de radionuclídeos naturais nas águas destinadas ao consumo humano é um fenômeno corrente, que requer monitoramento e prevenção. A ingestão prolongada e continuada de água com baixas doses de radiação pode constituir perigo para a saúde pública. Um dos efeitos de longo prazo decorrente da exposição, mesmo por baixas doses de radiação, é a ocorrência de doenças oncológicas na população. O atual contexto legislativo brasileiro, através da Portaria do Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021, estabelece os requisitos de potabilidade da água para a proteção da saúde pública, no que diz respeito às substâncias radioativas presentes na água de consumo humano, estabelecendo os valores paramétricos e métodos aplicáveis para o seu controle. Neste trabalho foram desenvolvidos três artigos derivados de pesquisas específicas sobre o assunto. O primeiro artigo constitui-se de uma revisão sistemática da literatura sobre a radioatividade em água destinada ao consumo humano e o seu monitoramento. No segundo artigo foi realizada a caracterização da radioatividade natural das águas de abastecimento público em municípios do Estado de Goiás, entre 2011 e 2017, onde foi constatado que as águas utilizadas para o consumo humano atendem aos níveis de triagem para potabilidade radiológica ordenados pelas normas vigentes, na maioria das localidades. Esses limites de segurança foram excedidos na água das captações de três municípios no quesito atividade alfa total e em quatro municípios para atividade beta total, para os quais solicita-se que sejam prolongadas as ações de monitoramento radiométrico até adequação. No terceiro artigo, foi apresentado o monitoramento da radioatividade natural em água destinada ao abastecimento público proveniente das captações subterrâneas do município de Goiás-GO. Alguns poços apresentaram água alfa total em teor acima do recomendado, confirmada pela presença de urânio (U-238). Para as regiões cujos mananciais indicaram valores acima do recomendado pela normativa brasileira, não foi necessária a interrupção do fornecimento de água, mas foram sugeridas estratégias adequação e monitoramento ambiental dos radionuclídeos presentes nos recursos naturais.

Palavras-chave: Radioproteção; potabilidade radiológica; dose efetiva; monitoramento ambiental;

ABSTRACT

The presence of natural radionuclides in water intended for human consumption is a common phenomenon that requires monitoring and prevention. Prolonged and continuous ingestion of water containing low doses of radiation can constitute a danger to public health. One of the long-term effects of exposure, even to low doses of radiation, is the occurrence of oncological diseases in the population. The current Brazilian legislative context, through Ministry of Health Ordinance GM/MS No. 888/2021, establishes water potability requirements for the protection of public health, with regard to radioactive substances present in water for human consumption, establishing parametric values and applicable methods for their control. Three articles derived from specific research on the subject were developed in this work. The first article is a systematic review of the literature on radioactivity in water intended for human consumption and its monitoring. The second article characterizes the natural radioactivity of public water supplies in municipalities in the state of Goiás, between 2011 and 2017, where it was found that the water used for human consumption showed results that met the screening levels for radiological potability set by current standards, in most locations. These safety limits were exceeded in the water from the catchments of three municipalities in terms of gross alpha activity and in four municipalities for gross beta activity, for which it is requested that the radiometric monitoring actions be extended until they are adequate. The third article presents the monitoring of natural radioactivity in water intended for public supply from underground abstractions in the municipality of Goiás-GO. Some wells showed a total alpha content above the recommended level, confirmed by the presence of uranium (U-238). For the regions whose springs showed values above those recommended by Brazilian regulations, it was not necessary to interrupt the water supply, but strategies were suggested for environmental monitoring of the radionuclides present in natural resources.

Keywords: Radioprotection; radiological potability; effective dose; environmental monitoring;

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma das etapas de desenvolvimento do estudo	19
Figura 2. Séries de decaimento natural para isótopos de U-238 e Th-232, com destaque para os radionuclídeos monitorados em água potável.	21
Figura 3. Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema	22
Figura 4. Consequências da radiação na molécula de DNA.....	24
Figura 5. Níveis de controle e critérios de monitoramento para radionuclídeos em água potável.....	26
Figura 6. Fases de desenvolvimento da revisão sistemática.....	32
Figura 7. Distribuição dos artigos sobre radioatividade natural em água, por continente de origem, no intervalo de 1986 a 2023.....	35
Figura 8. Distribuição da quantidade de artigos sobre radioatividade natural em água, no intervalo de 1986 e 2023.....	35
Figura 9. Relação das publicações sobre radioatividade natural em água, por ano e categorias, no intervalo de 1986 a 2023	36
Figura 10. Área de conhecimento e palavras-chave em publicações sobre radioatividade natural em água, entre 1986 e 2023.	37
Figura 11. Sistematização de artigos sobre radioatividade em água potável conforme tipo de radionuclídeo, proveniência da amostra, tipo de manancial e classificação territorial ...	38
Figura 12. Prevalência de artigos sobre radioatividade em água potável conforme tipo de tratamento, recomendação de tratamento, conformidade quanto às normas de segurança e tipo de detecção do radionuclídeo.	39
Figura 13. Distribuição dos municípios goianos por mesorregião para a análise das atividades alfa total e beta total em água.	59
Figura 14. Locais de coleta de amostras, manancial superficial (a) e na saída do poço tubular profundo, manancial subterrâneo (b).....	60
Figura 15. Diagrama do procedimento adotado para determinação de análise alfa total e beta total em amostras de água por LSC, seguido da preparação em laboratório	61
Figura 16. Boxplot da radioatividade natural em água de abastecimento público para municípios de Goiás em termos de alfa total (a) e beta total (b).....	66
Figura 17. Gráficos descritivos da radioatividade natural em água de abastecimento público nas mesorregiões de Goiás, em termos de alfa total (a) e beta total (b).	68
Figura 18. Diferença entre as mesorregiões de Goiás quanto radioatividade alfa total.....	70
Figura 19. Frequência de coletas conforme tipo de captação (subterrâneo ou superficial) e ano de coleta.	72

Figura 20. Gráficos da radioatividade natural em águas de abastecimento de Goiás quanto à origem da captação, em termos de alfa total (a,b) e beta total (c,d).....	73
Figura 21. Estratigrafia do município de Goiás-GO	84
Figura 22. Localização dos pontos de coleta urbanos em Goiás-GO	85
Figura 23. Critério de dose para radionuclídeos em água potável.....	87
Figura 24. Atividade alfa total e beta total em captações no município de Goiás-GO entre 2014 e 2017.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resultados da busca na base de dados Scopus e seleção dos artigos pertinentes	34
Tabela 2. Atividade alfa total e beta total em água apresentadas em publicações no intervalo entre 2002 e 2022.....	40
Tabela 3. Atividade de Rn-222 dissolvido em água, apresentadas em publicações no intervalo entre 2004 e 2023	42
Tabela 4. Radioatividade natural em água de abastecimento público em municípios de Goiás	65
Tabela 5. Radioatividade natural em água potável pelo mundo.....	67
Tabela 6. Radioatividade alfa e beta total em água de abastecimento público por mesorregiões de Goiás.....	68
Tabela 7. Testes estatísticos para determinação da radioatividade alfa total e beta total em águas das mesorregiões de Goiás.....	69
Tabela 8. Relação dos pontos de captação em Goiás com radioatividade natural em água acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira.	71
Tabela 9. Radioatividade das águas de abastecimento de Goiás quanto ao tipo de captação	72
Tabela 10. Testes para análise estatística da radioatividade alfa total e beta total em águas de Goiás, em termos do tipo de captação.....	74
Tabela 11. Pontos de amostragem em captação subterrânea no município de Goiás e distritos adjacentes	85
Tabela 12. Teores de U-238 e Th-232 encontrados em águas subterrâneas do município de Goiás, Goiás – Brasil, e seus limites de segurança.....	88
Tabela 13. Concentração de U-238 e Th-232 em água para diversos países.....	89
Tabela 14. Dose efetiva anual pelo U-238 em águas de poço de abastecimento público do município de Goiás	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Ocorrências de minérios de urânio no Estado de Goiás	71
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIEA	Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)
ANOVA	Análise de variância (teste estatístico)
Bq	Bequerel
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CPS	Contagem por segundo
CRCN-CO	Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste
Cs	Césio
DNA	Ácido desoxirribonucleico
ETA	Estação de tratamento de água
EURATOM	Comunidade Europeia da Energia Atômica
GL	Grau de liberdade
GO	Goiás
HCl	ácido clorídrico
HNO₃	ácido nítrico
HPGe	Detector de Germânio hiperpuro (espectrometria gama)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICP/MS	<i>Inductively coupled plasma mass spectrometry</i> ou espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado
ICRP	International Commission on Radiological Protection - Comissão Internacional de Proteção Radiológica
IRD	Instituto de Radioproteção e Dosimetria
ISO	International Organization for Standardization
J.Kg⁻¹	Joule por quilograma
L	Litro
LRPA	Laboratório de Proteção Radiológica Ambiental

LSC	Liquid Scintillation Counting (Cintilação em meio líquido)
mBq.L⁻¹	mili Bequerel por litro
MS	Ministério da Saúde
ND	Não disponibilizado
OMS	Organização Mundial da Saúde (WHO)
Pb	Chumbo
Po	Polônio
pH	Potencial hidrogeniônico
PNI	Programa Nacional de Intercomparação
Ra	Rádio
Rn	Radônio
s	segundo (unidade de tempo)
SANAB	Amostras de água para análise alfa total e beta total (protocolo)
SANEAGO	Saneamento Goiás S.A.
SI	Sistema Internacional
Sr	Estrôncio
STD	Sólidos totais dissolvidos
Sv	Sievert
Th	Tório
U	Urânio
UFG	Universidade Federal de Goiás
UNSCEAR	<i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i> ou Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
α	Radiação alfa; intervalo de confiança (estatística)
β	Radiação beta
γ	Radiação gama

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	18
CAPÍTULO I.....	20
ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	20
1.1. INTRODUÇÃO GERAL.....	21
1.2. QUESTÃO DE PESQUISA	26
1.3. OBJETIVOS.....	28
1.3.1. Geral.....	28
1.3.2. Específicos.....	28
CAPÍTULO II – ARTIGO 1	29
REVISÃO SISTEMÁTICA: A RADIOATIVIDADE EM ÁGUA POTÁVEL.....	29
2.1. INTRODUÇÃO.....	30
2.2. METODOLOGIA	32
2.3. RESULTADOS.....	34
2.3.1. Distribuição das publicações por tempo e origem	34
2.3.2. Categorização por área de conhecimento e palavras-chave	37
2.3.3. Categorização conforme atributos da amostra	37
2.3.4. Categorização por técnicas e tratamentos empregados.....	38
2.3.5. Categoria alfa total e beta total em água (AB).....	40
2.3.6. Categoria radônio (RN).....	41
2.3.7. Categoria radionuclídeos naturais (RAD).....	42
2.4. CONSIDERAÇÕES.....	43
2.5. CONCLUSÕES.....	44
REFERÊNCIAS	45
CAPÍTULO III – ARTIGO 2	54
CARACTERIZAÇÃO RADIOLÓGICA DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO EM MUNICÍPIOS DE GOIÁS	54
3.1. INTRODUÇÃO.....	55
3.2. METODOLOGIA	57
3.2.1. Área de estudo.....	57
3.2.2. Coleta e preparação das amostras	58
3.2.3. Procedimento experimental.....	60
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES	64
3.3.1. Análise dos resultados conforme o intervalo temporal	65

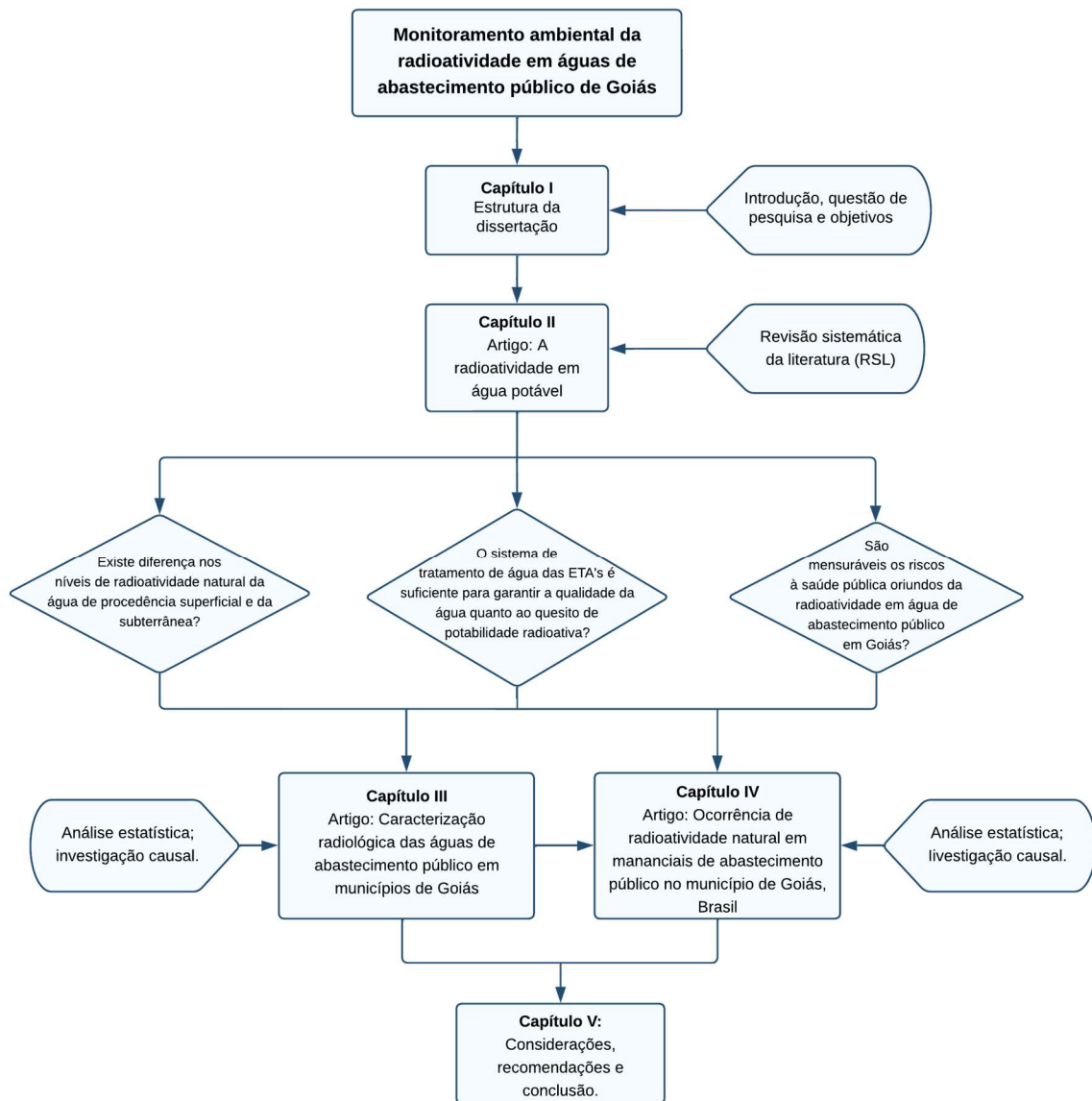
3.3.2. Análise dos resultados conforme região da coleta	67
3.3.3. Análise dos resultados para radioatividade em água acima do limite de triagem	70
3.3.4. Análise dos resultados conforme o tipo de captação da água	71
3.4. CONCLUSÕES	75
3.5. RECOMENDAÇÕES	75
3.6. AGRADECIMENTOS	76
REFERÊNCIAS	76
CAPÍTULO IV – ARTIGO 3	80
OCORRÊNCIA DE RADIOATIVIDADE NATURAL EM MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO NO MUNICÍPIO DE GOIÁS, BRASIL	80
4.1. INTRODUÇÃO	81
4.2. METODOLOGIA	83
4.2.1. Área de estudo	83
4.2.2. Coleta e preparação das amostras	84
4.2.3. Procedimento experimental	86
4.2.4. Determinação da dose efetiva	86
4.3. RESULTADOS	87
4.3.1. Teor de urânio e tório no município de Goiás	87
4.3.2. Dose efetiva devido à ingestão de urânio em água	89
4.4. DISCUSSÃO	90
4.5. CONCLUSÕES	92
4.6. RECOMENDAÇÕES	92
4.7. AGRADECIMENTOS	93
REFERÊNCIAS	94
CAPÍTULO V	99
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS	99
5.2. RECOMENDAÇÕES	100
5.3. CONCLUSÕES GERAIS	101
REFERÊNCIAS	102
Apêndice 1. Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática	104
Apêndice 2. Categorias e critérios delineados em revisão sistemática sobre radioatividade em água potável	112
Apêndice 3. Atividade dos principais radionuclídeos naturais em água, apresentadas em publicações no intervalo entre 1987 e 2022	114
Apêndice 4. Atividade alfa total e beta total em municípios de Goiás	116

Apêndice 5. Desempenho analítico para determinação da radioatividade natural em água potável.....	120
---	-----

APRESENTAÇÃO

A água pode ser caracterizada através de diversos parâmetros que representam as suas características físicas, químicas, biológicas e radiológicas, e que são utilizados como indicadores da qualidade da água. Considerando que a água destinada ao consumo humano deve atender a determinados padrões de potabilidade, de forma a garantir a proteção da saúde humana, ela pode conter elementos radioativos naturais e artificiais capazes de causar riscos quando alcançam valores superiores aos parâmetros estabelecidos para um determinado uso. Por isso, o Brasil tem estabelecido normas no intuito de administrar os danos devido à ingestão de água contendo elementos radioativos. Neste estudo foram abordados aspectos da caracterização e monitoramento da radioatividade natural em águas de abastecimento público de Goiás, Brasil. A Figura 1 apresenta as etapas da pesquisa desenvolvida.

Figura 1. Fluxograma das etapas de desenvolvimento do estudo



CAPÍTULO I

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está ordenada em cinco capítulos, com três artigos:

Capítulo I – Introdução geral, questão de pesquisa e objetivos.

Capítulo II – Artigo 1: “Revisão sistemática: A radioatividade em água potável”.

Capítulo III – Artigo 2: “Caracterização radiológica das águas de abastecimento público em municípios de Goiás”.

Capítulo IV – Artigo 3: “Ocorrência da radioatividade natural em mananciais de abastecimento público no município de Goiás, Brasil”.

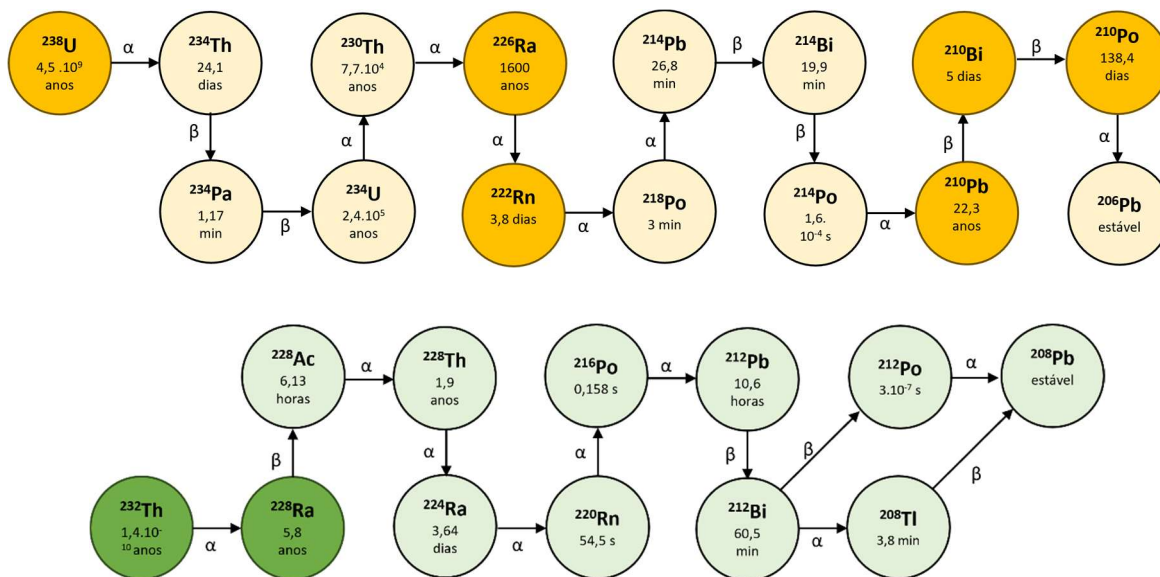
Capítulo V – Considerações finais, conclusões, referências e apêndice.

1.1. INTRODUÇÃO GERAL

A radioatividade manifesta-se na biosfera continuamente enquanto o planeta é exposto à radiação natural cósmica proveniente do espaço, e pela radiação de origem terrena, disseminada nas rochas, solo, água e biota. Os seres vivos estão suscetíveis às radiações ionizantes¹ dos elementos radioativos, sejam naturais ou artificiais, incorporados ao ecossistema através de processos naturais ou por ação antrópica. Cerca de 66% da radiação natural média recebida pela população mundial ocorre internamente através da ingestão de água, alimentos ou pelo ar. Outros 19,6% correspondem à exposição por diagnóstico médico e cerca de 0,4% se refere à exposição dos acidentes e reatores nucleares (OMS, 2022; OLIVEIRA, 1998).

Os elementos radioativos naturais são normalmente detectados em água de abastecimento público. São elementos primordiais, isto é, presentes desde a formação da Terra, abundantes na crosta terrestre, e estão associados aos compartimentos contíguos aos mananciais (LAURIA et al., 2014). A ocorrência de tais radioelementos é consequência do decaimento natural das séries radioativas do urânio (U-238) e do tório (Th-232) principalmente (Figura 2).

Figura 2. Séries de decaimento natural para isótopos de U-238 e Th-232, com destaque para os radionuclídeos monitorados em água potável.

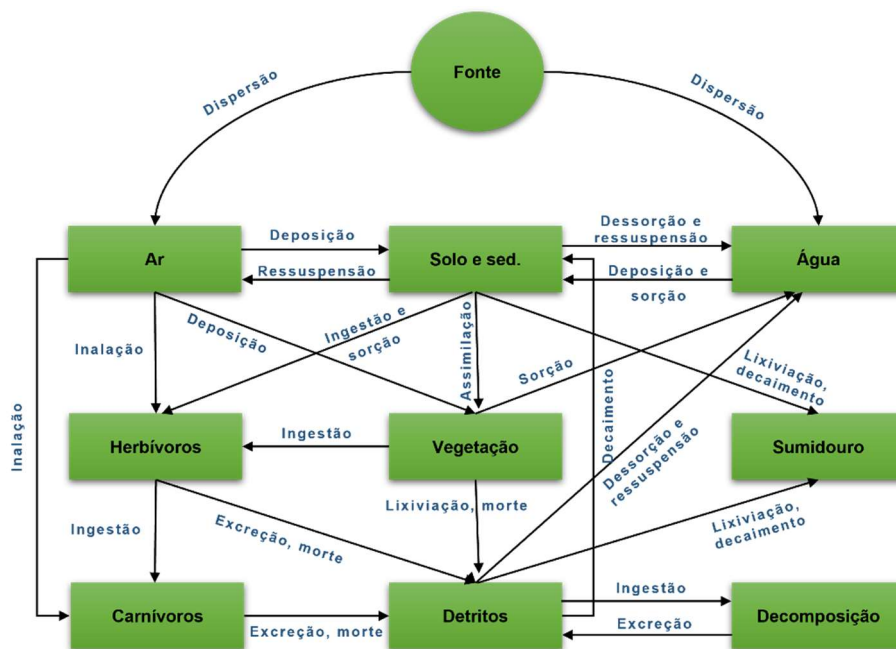


Fonte: IVANOVICH E HARMON, 1992

¹ A radiação ionizante é um fenômeno natural, característico de elementos químicos designados como instáveis, os radionuclídeos. São átomos que emitem fótons e/ou partículas durante um determinado período (decaimento), até que a estabilidade energética seja alcançada. A taxa de decaimento de um radioelemento é designada Atividade (A). Pelo sistema internacional (SI) a unidade de atividade radioativa é o Becquerel (Bq), que representa a desintegração de um núcleo a cada segundo (TAUHATA et al., 2014; LAURIA et al., 2014).

Compreender a o comportamento dos elementos radioativos em um compartimento ambiental (Figura 3) é necessário para avaliar a dose de radiação recebida pela população que se serve daquele recurso e determinar se existem riscos inerentes. Nos recursos hídricos, os teores de radionuclídeos com maior concentração têm sido encontrados em águas subterrâneas, quando comparados às águas superficiais. Os radioelementos presentes nas rochas interagem por reações químicas com o ar e a água, lixiviam e oxidam minerais ali presentes, alterando a composição radioquímica da água percolante àquela estrutura. (LAURIA et al., 2014). Deste modo, em estudos sobre determinação da radioatividade em água, será relevante considerar o teor do radionuclídeo nas rochas, o tipo de formação geológica da área, a geoquímica da água subterrânea e as propriedades de cada elemento radioativo (OMS, 2018).

Figura 3. Comportamento dos radionuclídeos no ecossistema



Fonte: FARIA, 2013; CAMARGO, 1994;

A radioatividade pode ser geralmente caracterizada pelo tipo de radiação que o átomo emite: alfa, beta, gama. A radiação alfa (α) ocorre quando o núcleo de um átomo emite partículas constituídas de dois nêutrons e dois prótons (equivalente a um núcleo de Hélio) e uma grande quantidade de energia. A radiação beta (β) corresponde aos elétrons ou pósitrons provenientes do núcleo, sendo que β^- ocorre em núcleos que convertem nêutron em próton e liberam um elétron (e^-), e β^+ ocorre em núcleos quando um próton que se converte em nêutron e libera um pósitron (e^+). A radiação gama (γ) consiste na emissão da energia nuclear excedente pelo decaimento alfa ou beta de um núcleo, para que o equilíbrio de energia seja estabelecido (TAUHATA et al., 2014; LAURIA et al., 2014).

O contato dos seres vivos à contaminantes radioativos ocorre principalmente através da ingestão de água, ou por alimentos constituídos de água contaminadas (irrigação, peixes, dentre outros), resultando em dose para o organismo. Essa interação com a radiação ionizante ocorre em reações muito rápidas, pela absorção de energia a partir de partículas alfa ou beta, induzindo na formação de radicais ou íons em soluções aquosas intracelulares. A ionização e formação de radicais pode ocorrer na matéria orgânica, nas moléculas de água (radiólise), e em outras substâncias que compõem o sistema biológico do ser humano, como o DNA (NOUAILHETAS, 2012).

A quebra das cadeias e ligações moleculares causam alterações intracelulares complexas que, caso não haja reparo correto, podem resultar na morte celular, e se ampliada, na morte do organismo (OLIVEIRA, 1998; NOUAILHETAS, 2012). Por ação direta das radiações (ionização) ou indireta (através do ataque de radicais livres) a molécula de DNA estará susceptível a danos por mutações gênicas ou quebras. Em doses não-letais, apesar do dano celular aparentar ter sido contido (reparo errôneo), mutações e tumores poderão surgir como alterações futuras (OMS; 2022; UNSCEAR, 2020; ICRP, 2007).

Os elementos radioativos podem ser absorvidos pelos intestinos e então distribuídos pelo corpo através da corrente sanguínea. Dependendo do radioisótopo e de sua interação com metabolismo do ser vivo, parte do que foi absorvido pode ser excretado pelos rins ou ser acumulado nos tecidos e órgãos. Fatores como volume de água ingerido anualmente, tipo de tecido do corporal (vísceras, músculos), idade e tipo de radionuclídeo são as variáveis dependentes que influenciam na dose recebida pelo indivíduo, como indicado na Equação 1 (SINGLA et al., 2022; FARIA, 2013; UNSCEAR, 2012):

$$D_e = T_i \cdot C_R \cdot F_c \quad \text{(Equação 1)}$$

Onde: D_e : Dose efetiva anual (mSv/ano); T_i : Taxa de ingestão anual de água do indivíduo por ano (L); C_R : Concentração do radionuclídeo determinado na água (Bq/L); F_c : Taxa de conversão específica (mSv/Bq).

A concentração de radionuclídeo é a relação de uma quantidade de núcleos radioativos num estado de energia particular, através de transições nucleares espontâneas deste estado de energia em um intervalo de tempo ($Bq = s^{-1}$). A dose efetiva anual refere-se à medida do nível de radiação, expressa em termos de milisievert por ano, onde a unidade Sievert ($Sv = J.Kg^{-1}$) representa uma relação entre energia e quilograma de matéria (TAUHATA et al., 2014).

Qualquer dose absorvida proveniente de radiações ionizantes tem a probabilidade de induzir ao câncer ou causar a morte celular, pois pode inibir a mitose e causar alterações cromossômicas, em intervalo de tempo compreendido entre minutos a anos de exposição. Por doses letais, podem resultar na morte e, em doses baixas, o dano celular pode ser

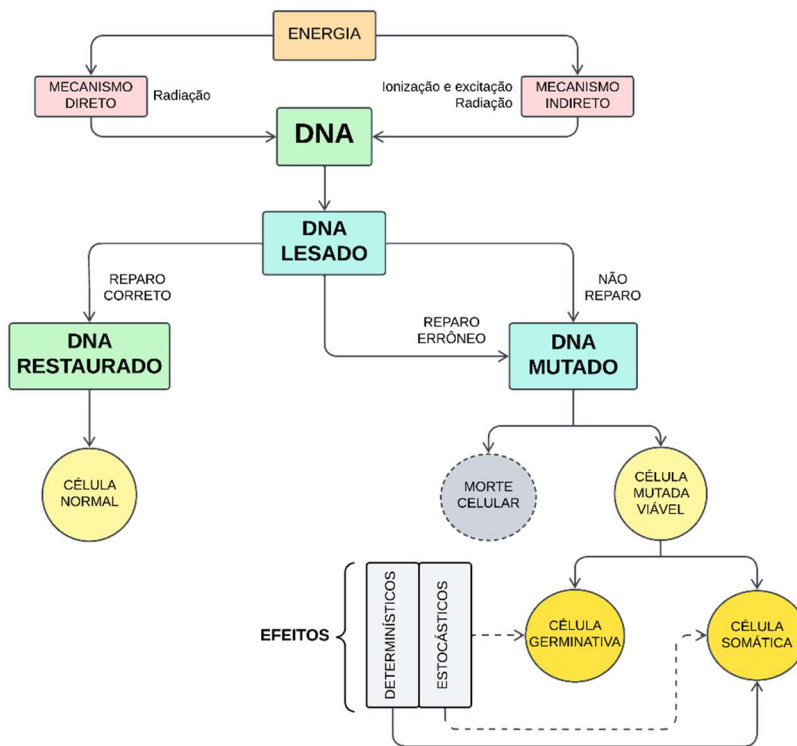
reparado parcialmente ou não.

As consequências da radiação absorvida em um organismo (Figura 4) dependem da taxa de exposição (aguda ou crônica), da dose absorvida (alta ou baixa) e da forma que o ser vivo foi exposto. Os efeitos podem ser classificados em função do tempo de manifestação (imediate ou tardio), do nível de dano (hereditário ou somático), pela dose e forma de resposta:

Efeitos determinísticos ou reações teciduais: resultantes de altas doses e surgem quando um determinado nível (limiar) é ultrapassado. Estão relacionados ao tipo de radiação e ao tecido irradiado, podendo causar a morte celular com repercussão ao organismo. Quanto maior a dose absorvida, mais grave será o efeito, provocando danos imediatos (queimaduras) ou tardios (catarata, doenças vasculares cerebral e cardíaca).

Efeitos estocásticos: decorrentes de alterações em células normais, podem ser induzidos por qualquer nível de radiação, inclusive por radiação natural. A gravidade desses efeitos para o organismo não depende da dose, entretanto a probabilidade de sua ocorrência está a ela relacionada. De repercussão tardia, esses efeitos podem resultar em câncer e, por afetar as células sexuais, podem ser repassadas aos descendentes. (TAUHATA et al., 2014; OKUNO, 2013; NOUAILHETAS, 2012).

Figura 4. Consequências da radiação na molécula de DNA



Fonte: adaptado de NOUAILHETAS, 2012.

Organismos internacionais preconizam sobre o controle dos radionuclídeos presentes

na água, para que o nível de risco seja extremamente baixo e não cause efeitos adversos à saúde. A Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2014), através das Normas Internacionais de Segurança Básica, sugere um valor de referência de dose para a radiação devido ao consumo de água potável de $1,0 \text{ mSv.ano}^{-1}$, abaixo do qual são recomendadas ações de otimização e planejamento para redução das doses e para valores acima da dose indicada, é conseqüentemente potencializado o aumento dos riscos à saúde pela exposição à radiação. Essa dose é definida a partir das diretrizes da Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP, 2007 e 1999), que propõe os limites para situações de exposição prolongada do público à radiação, e estabelecem para a dose individual anual da ingestão de água potável o valor de $0,1 \text{ mSv.ano}^{-1}$.

Nos conceitos de radioproteção, o monitoramento ou monitoração radiológica fundamenta-se em acompanhar, através de instrumentos e procedimentos operacionais, a presença e concentração de radionuclídeos nos seres vivos, em um determinado compartimento ou em materiais específicos com o objetivo de controlar a contaminação ou a avaliar a exposição à radiação (CNEN, 2020b). Por conseguinte, o monitoramento radiológico ambiental tem a finalidade de analisar, caracterizar e controlar a presença de radionuclídeos no meio ambiente e no indivíduo do público. Consiste na coleta de dados, acompanhamentos contínuos das matrizes ambientais, e realização de medidas de taxas de dose que possam interferir na exposição à radiação ionizante. (GONÇALVES et al., 2021; LAURIA et al., 2014).

A Organização Mundial da Saúde e outras instituições reguladoras, recomendam que o monitoramento da água potável seja realizado a partir do critério de dose individual ou dose efetiva anual. Esse limite de dose adotado pela OMS demonstra a extrema cautela pelos riscos da radiação em água, não apenas por ser inferior em relação à dose de referência da AIEA ($1,0 \text{ mSv.ano}^{-1}$), mas também por indicar a reduzida contribuição da dose em água na dose efetiva global, de $3,0 \text{ mSv.ano}^{-1}$. E essa dose global que é a somatória das doses proveniente mais diversas fontes de radiação terrestre e cósmica, a que os seres humanos são expostos (GÓMEZ, 2023; USCEAR, 2008).

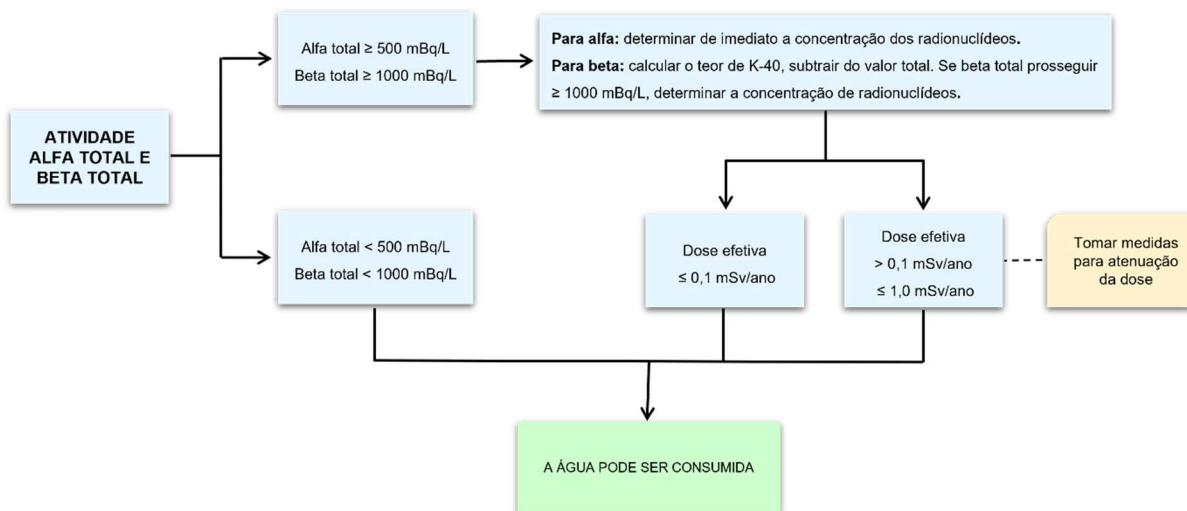
A identificação individual do radionuclídeo em água potável para a determinação da dose individual demanda procedimentos laboratoriais caros e demorados. Porém, ao proceder-se a análise preliminar de alfa total e beta total em amostras de água, é possível determinar se o limite da dose foi excedido antes de se determinar o radionuclídeo emissor. Então, para uma triagem em monitoramento de água potável, são recomendados os valores limite de 500 mBq. L^{-1} para alfa total e 1000 mBq. L^{-1} para beta total (OMS, 2022).

A OMS também orienta que se os limites de alfa total e beta total não forem excedidos, a dose efetiva anual não foi excedida para aquela amostra, portanto não é necessário realizar

outros procedimentos de monitoramento. Se qualquer dos dois limites for excedido, uma análise radiotópica é requerida, utilizando-se de técnicas nucleares específicas para cada tipo de radionuclídeo, conforme as características de origem da água, da pedologia e da geoquímica da região amostrada. Os níveis dos radionuclídeos presentes, nesse caso, são avaliados comparativamente com relatórios, artigos e guias para definição de estratégias (OMS, 2022).

A Figura 5 apresenta o fluxograma com orientações para controle da radioatividade da água potável, como sugestão para órgãos internacionais de radioproteção, conforme os limites estabelecidos pela OMS e IAEA.

Figura 5. Níveis de controle e critérios de monitoramento para radionuclídeos em água potável



Fonte: OMS, 2018; IAEA, 2014.

O monitoramento da radioatividade em água também pode ser recomendado para cenários que envolvam atividades antrópicas com material radioativo no meio ambiente (mineração, fertilizantes, indústria), pois essas práticas geralmente são contribuidoras para o despejo de radionuclídeos nos recursos naturais, como por exemplo, nos mananciais que servem ao abastecimento público (LAURIA et al., 2014).

1.2. QUESTÃO DE PESQUISA

As atividades humanas e suas consequências ao meio ambiente podem influenciar diretamente a qualidade da água, inserindo nela radionuclídeos naturais e/ou artificiais. Esses elementos radioativos podem emitir radiações de curto alcance, expondo o ser humano ao ingerir água com tais substâncias dissolvidas (SANG et al., 2020; UNSCEAR, 2020).

A água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene

peçoal, deve atender a determinados padrões de potabilidade de forma a garantir a proteção da saúde humana no quesito radiológico. Em termos de avaliação de risco são necessários dados do monitoramento da segurança radiológica para a água de consumo. E para cada estação de abastecimento de água a monitorar, existirão diferentes interferentes ambientais que devem ser considerados. Portanto, a importância em obter o conhecimento das concentrações de radionuclídeos em águas é de grande relevância ambiental, porque estas aparecem como um dos principais veículos de entrada de radionuclídeos naturais no corpo humano (KÜÇÜKÖMEROĞLU et al., 2021; OMS, 2018;TAHIR e ALAAMER, 2009).

A partir de relatórios da Comissão Nacional de Energia Nuclear sobre radioatividade em água potável para determinados municípios goianos, percebeu-se a necessidade em estabelecer uma pesquisa sobre a caracterização da radioatividade das águas de abastecimento público no estado.

A representação de dados categorizados dos níveis de radiação da água potável em Goiás atuará como instrumento de vigilância e controle para estações de tratamento em condições normais de operação e, ainda, poderá ser utilizado como documento de referência da radioatividade dos mananciais da região, em oportunidades que excedam a conformidade das normativas.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Geral

Monitorar a radioatividade natural em águas de abastecimento público em municípios de Goiás.

1.3.2. Específicos

- Apresentar um estudo abrangente sobre a radioatividade natural em água potável e os aspectos notáveis do monitoramento deste quesito através de revisão sistemática da literatura (Artigo 1).
- Caracterizar a radioatividade da água de abastecimento público em municípios de Goiás e, a partir dos dados analisados, oferecer informações atualizadas que contribuam para a investigação dos níveis de radiação associados à ingestão da água (Artigo 2).
- Monitorar a radioatividade natural em água destinada ao abastecimento público proveniente das captações subterrâneas do município de Goiás-GO, analisando as possíveis ocorrências quanto ao risco para a saúde dos seres vivos (Artigo 3).

CAPÍTULO II – ARTIGO 1

REVISÃO SISTEMÁTICA: A RADIOATIVIDADE EM ÁGUA POTÁVEL

Nogueira, R.A.; Scalize, P. S.

RESUMO

O meio ambiente está constantemente exposto à radioatividade natural, seja de origem cósmica ou terrestre. Esse fenômeno está presente nos recursos da natureza e pode ser disseminado, através dos radionuclídeos pelo ar, solo e águas e um dos principais expedientes de transporte desses elementos radioativos aos seres vivos é a água. A partir de conhecimentos em monitoramento ambiental, este estudo buscou catalogar e avaliar quais os parâmetros e variáveis relativos à radioatividade em água potável são frequentes e relevantes nos tratados da literatura científica. As informações obtidas desta revisão tiveram a finalidade de contribuir para a formação de um panorama objetivo sobre a radioatividade natural em água, apresentando a correlação das diversas características desse parâmetro com meio ambiente e oferecendo dados atualizados. Em 2023 foi realizado um inventário de publicações sobre radioatividade natural em água, das quais desenvolveu-se uma revisão sistemática pela base de dados Scopus, e, empregando palavras-chave e filtros descritores, foram obtidas 695 publicações, das quais 191 eram relevantes ao tema. E a partir dessas pesquisas, foi aplicada a tabulação de categorias: local da pesquisa, tipos de manancial, do radionuclídeo e sua proveniência, métodos de detecção, conformidade quanto aos níveis de referência e tratamento. O estudo demonstrou que em 59% das publicações, as concentrações radioativas da água potável estavam em conformidade com os limites permitidos, em 16% solicitaram que fossem realizadas monitorações continuadas, principalmente nos mananciais subterrâneos. Por fim, as considerações levantadas poderão ser utilizadas em recursos de pesquisa, para que expedientes socioambientais sobre potabilidade radiológica da água sejam promovidos.

Palavras-chave: potabilidade radiológica; radionuclídeos; abastecimento público; radioproteção; monitoramento;

2.1. INTRODUÇÃO

A radioatividade é um fenômeno físico existente a partir da liberação de determinada energia nos recursos naturais e seres vivos e pode ser proveniente de partículas de radiação cósmica, de elementos radioativos distribuídos na natureza, ou de substâncias oriundas da ação humana, como por exemplo na mineração de fosfato, na indústria de fertilizante, na medicina diagnóstica e no uso bélico. As substâncias radioativas, denominadas radionuclídeos, emitem radiação conforme seu decaimento, por muitos séculos ou frações de segundos e as radiações ionizantes mais habituais são as partículas alfa, partículas beta e radiação gama (OMS, 2022 e 2018). Esses elementos podem ocorrer variavelmente distribuídos no ambiente em rochas, solo, ar, água e nos seres vivos (ABOJASSIM et al., 2022).

A exposição a qualquer radiação envolve algum grau de risco aos seres vivos, conforme as premissas da radioproteção. Os efeitos da radiação podem ser determinísticos, quando resultam na morte célula pela ionização, mutações e rearranjo do DNA. O efeito será estocástico quando há gravidade do tecido celular proporcionalmente à quantidade de radiação recebida, da qual existe um limite quando não causa efeito ao organismo (CRAWFORD-BROWN, 2011). Essa quantidade de radiação recebida nas células é definida como dose e é uma grandeza da dosimetria ambiental utilizada pelas instituições internacionais para monitorar os riscos e limites de radiação nos recursos naturais, e assim, nas fontes de água potável para o consumo humano (USCEAR, 2012).

A água potável, até que chegue ao destino para o consumidor, pode ter contato com radionuclídeos naturais, principalmente se for de origem subterrânea, devido ao contato das fontes e aquíferos com as rochas e solos (OMS, 2022; IAEA, 2014). Dentre os radionuclídeos naturais presentes, caracterizam especial importância pelo predomínio nas monitorações os elementos da série de decaimento do urânio e tório, como o Pb-210, Po-210, Ra-226, Ra-228, Rn-222, dentre outros. Os isótopos resultantes do decaimento são emissores de partículas alfa ou beta e contribuem para a concentração da radioatividade em águas. Além disso, como os elementos naturais, as reservas de água potável podem ser contaminadas por traços de elementos radioativos produzidos artificialmente (Sr-90, Cs-137, I-131, H-3), e que, por algum processo natural ou acidental, foram dispersos para o meio ambiente (NUCETELLI, 2012).

Estudos recentes reúnem os aspectos ambientais da radioatividade natural em água através de análises nos diversos tipos de mananciais hídricos e neles, da concentração de variados radionuclídeos e as prováveis correlações com fatores ambientais (VENGOSH et al., 2022; BALARAM et al., 2022; ADEBIYI et al., 2021; BJØRKLUND et al., 2020; NUCETELLI et

al., 2012). A abordagem dessa temática pode ser acrescida com informações a partir de alguns tópicos que sejam relevantes em pesquisa. Por exemplo, interações dos mananciais subterrâneos para o consumo com a concentração radioativa, ou do monitoramento radiológico da água potável em localidades com indisponibilidade de saneamento hídrico. Nesse ínterim, torna-se fundamental discorrer sobre a dinâmica das políticas para regulamentação dos riscos da radioatividade em água pelas organizações competentes (COSTA DANTAS, 2019).

A radioatividade monitorada em água, designada atividade (Bq.L^{-1}), pode ser avaliada conforme as diretrizes da Organização Mundial da Saúde, da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) e de organismos nacionais e internacionais, conforme a legislação local. No Brasil o monitoramento radioambiental da água é orientado pelo Ministério da Saúde, pela Portaria n.º 888/2021 em seu Anexo XX. A Normativa estabelece os padrões de potabilidade radiológica e apresenta os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano nesse quesito. Essa diretriz segue as orientações da OMS (OMS 2018, 2022) e está também fundamentada na Posição Regulatória 3.01/012:2020, da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2020a), que estabelece tecnicamente os níveis de investigação e vigilância da água de consumo.

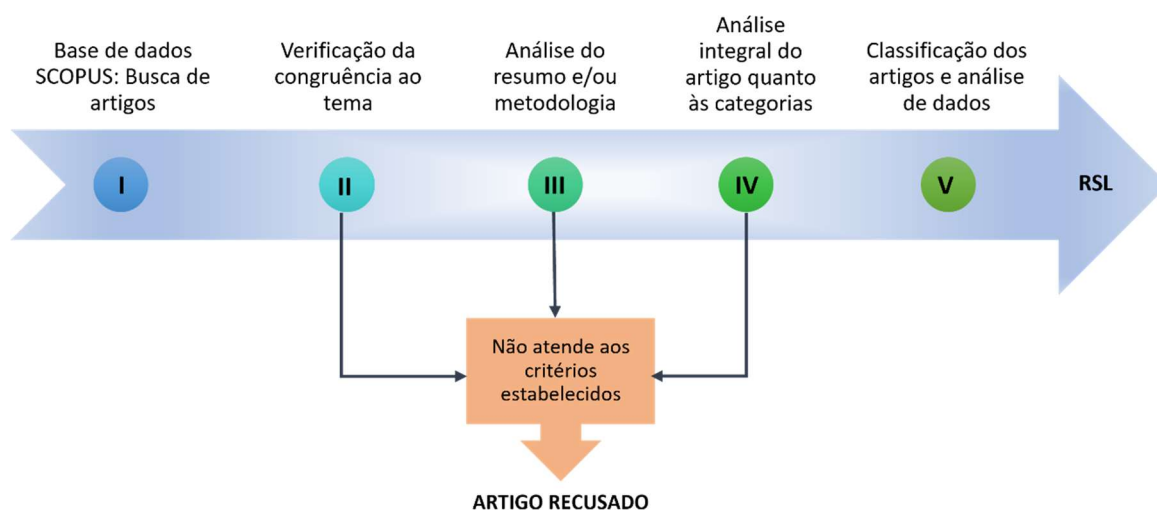
Para avaliar a efetividade e eficácia dos estudos da literatura sobre a radioatividade natural em água potável e dar suporte à tomada de decisões dos organismos reguladores, a revisão sistemática é uma ferramenta que realiza uma síntese crítica de dados históricos e com evidência disponível na atualidade, sobre questões específicas da potabilidade em água no quesito radioatividade (OKOLI, 2019). Em uma revisão sistemática poderão ser identificadas lacunas que, por questões específicas, como indisponibilidade de tecnologia na época do estudo, por exemplo, ainda não foram respondidas (MS:BRASIL, 2021). E através de métodos científicos confiáveis, os dados estatísticos da revisão podem ser avaliados para acrescentar mais informações de interesse para o assunto.

Pelo pressuposto sobre as ocorrências de radioatividade natural no meio ambiente portanto, nas águas, e de que podem ser mensuradas diferentes concentrações de radionuclídeos dissolvidos nesse recurso, conforme características específicas (FERREIRA et al., 2022; OKUNOLA et al., 2020; COSTA DANTAS et al., 2019; TURHAN et al., 2013; DINH CHAU, et al., 2011), este trabalho teve como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a radioatividade natural em água potável e seu monitoramento no Brasil e no mundo, associada à caracterização das suas abordagens em prevalência.

2.2. METODOLOGIA

Este estudo foi elaborado a partir de uma revisão sistemática que envolveu cinco fases (Figura 6), a partir de levantamento na base de dados *Scopus* da *Elsevier*, em um intervalo de busca aberto. Foram preconizados os conhecimentos sobre radioatividade natural em água potável que apresentassem metodologias simples, aplicáveis em regiões remotas e de fácil reprodutibilidade, por se tratar de um monitoramento dispendioso e pouco frequente nos países em desenvolvimento (OMS, 2022).

Figura 6. Fases de desenvolvimento da revisão sistemática



Fonte: os autores

As palavras-chave utilizadas no levantamento, traduzidas do inglês, foram: “água potável” e “radioatividade natural”, associadas à combinação de descritores com a finalidade de refinar a pesquisa: água para consumo, radioatividade artificial, água subterrânea, água superficial, abastecimento de água, nascente, água mineral, água engarrafada, água de torneira, estação de tratamento de água, monitoramento, avaliação, detecção, determinação, dose, atividade, concentração, medição, alfa, beta, gama, dosimetria ambiental. A aplicação dessa combinação, com os conectores AND e OR na base de dados Scopus foi relacionada por: ("drinking water" OR "water for consumption" OR "potable water" OR "water supply") AND ("natural radioactivity" OR "artificial radioactivity") AND (groundwater OR "surface water") OR ("water springs" OR "mineral water" OR "bottled water" OR "tap water" OR "water station") AND (monitoring OR evaluation OR detection OR determination OR measurement) AND (dose OR activity OR concentration) AND (alpha OR beta OR gamma) AND dosimetry AND environmental AND (LIMIT-TO (LANGUAGE , "English")) AND (EXCLUDE (DOCTYPE , "cp") OR EXCLUDE (DOCTYPE , "no") OR EXCLUDE (DOCTYPE , "bk")). Os autores optaram pela exclusão de documentos de conferências e notas, além da

exclusividade do idioma na língua inglesa.

Após a busca na Base Scopus (fase I), foi realizada a delimitação das produções conforme congruência ao tema proposto, sendo classificados entre “sim” ou “não” (fase II). A análise dos resumos dos artigos selecionados foi feita na fase III, excluindo aqueles as inadequados a este estudo. Iniciou-se na fase IV a extração de dados nas publicações selecionadas, para formar as categorias de meta-análise que possibilitassem a sistematização de resultados (OKOLI, 2019).

Em seguida, os dados foram classificados quanto ao ano de publicação, país de origem, palavra-chave, país de origem, autoria, periódico, dentre outros termos editoriais. Também foram aplicadas as categorias relacionadas ao escopo desta pesquisa: origem (natural ou antrópico), proveniência das águas (água engarrafada, poço, torneira, mananciais da superfície e estação de tratamento de água), região (zona urbana ou rural), tipo de captação (superficial ou subterrânea), técnicas de detecção (espectrometria alfa, LSC, contador proporcional e outros); radionuclídeo monitorado e sua atividade (alfa e beta total, urânio, tório, radônio, rádio, potássio, chumbo, polônio), conformidade quanto às normativas do país de origem (sim ou não), recomendação de monitoramento (sim ou não), recomendação de tratamento (sim ou não).

Na tabulação da fase V, os resultados foram quantificados para que a análise sistemática pudesse ser desenvolvida a partir de correlações das categorias, e enfim possibilitar avanços na compreensão do assunto. Os artigos foram posteriormente organizados conforme a frequência com que as seguintes categorias foram mencionadas: AB: alfa total e beta total, RAD: radionuclídeos diversos, RN: radônio e REF: artigos de referências e revisão. Foram rejeitados artigos que apresentaram duplicidade de resultados (mesmo ano, região e manancial).

Para a categoria “AB” foram catalogados artigos conforme as fontes de água, o número de amostras, as concentrações obtidas de alfa total e beta total (mBq.L^{-1}) e as respectivas regiões de pesquisa. foi priorizada. As diretrizes sobre os níveis de segurança para alfa total (500 mBq.L^{-1}) e beta total (1000 mBq.L^{-1}) em água potável sugeridas pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2018), foram empregadas para simplificação das diversas normativas internacionais e devido à similaridade com a norma brasileira (CNEN, 2020).

A categoria “RN”, sobre o radônio-222, considera parâmetros específicos de segurança para potabilidade radiológica da água. Por se tratar de um gás inerte presente nas rochas e subsolo, esse elemento radioativo além de dissolver em água, pode se dissipar na atmosfera, conforme alcança a superfície. Por isso a interação dos seres vivos com o Rn-222 poderá ser pela ingestão da água ou por inalação. Além disso, o radônio se desintegra (decai) em outro

radionuclídeo, também emissor de radiação, o Rádio-226, que também deve ser considerado (RAVIKUMAR et al., 2021). Assim, para a concentração de Rn-222 em água, foram consideradas as recomendações da OMS (OMS, 2018), com limite de até 100 Bq.L⁻¹, da Europa (EURATOM, 2001) no intervalo de 100 a 1000 Bq.L⁻¹ e dos Estados Unidos (USEPA, 2022), com faixa de 11,1 – 70 Bq.L⁻¹. A legislação brasileira não faz referência ao gás radônio, pois apenas estabelece critérios para triagem alfa e beta total e dose efetiva (CNEN, 2020).

Para a categoria “RAD”, foram coletadas os dados sobre as concentrações dos radionuclídeos naturais de maior disponibilidade em água, resultantes dos decaimentos do urânio e tório (Ra-226, Ra-228, Po-210, Pb-210, K-40). Foram comparadas às orientações das normativas da OMS, Estados Unidos e União Europeia. A legislação brasileira não faz referência de limites para a concentração de elementos radioativos específicos, mas traz o enfoque para a dose efetiva, a qual não foi mensurada neste ensaio (CNEN, 2020). O nível de segurança para o K-40 não é regulamentado devido a sua natureza essencial para os seres vivos, porém sua concentração foi mensurada porque é um emissor de partícula beta em abundância nos recursos hídricos, podendo interferir na medição de beta total (CNEN, 2020; IAEA, 2016).

2.3. RESULTADOS

A partir dessa revisão sistemática, para o intervalo encontrado de 1986 e 2023, foram lidos 191 artigos integralmente, resultando em 27,48% artigos buscados na base digital (Tabela 1). Os detalhes do levantamento foram apresentados por dados da publicação e discriminação por autor (Apêndice 1) e por categorização dos atributos (Apêndice 2).

Tabela 1. Resultados da busca na base de dados Scopus e seleção dos artigos pertinentes

AÇÃO	FASE I	FASE II	FASE III	FASE IV	FASE V
	LEVANTAMENTO	ANÁLISE DE TÍTULOS	ANÁLISE DE RESUMOS	CATEGORIZAÇÃO	LEITURA INTEGRAL
Nº DE ARTIGOS	695		235	191	

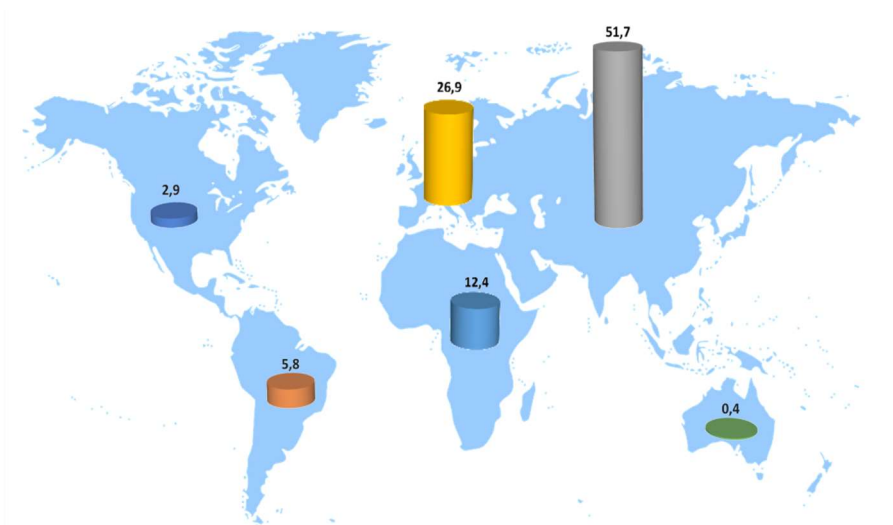
2.3.1. Distribuição das publicações por tempo e origem

A incidência de publicações foi distribuída em 242 países, que foram organizados por: América do norte e central, América do Sul, Ásia, Europa e Oceania (Figura 7). O continente asiático apresentou maior porcentagem de estudos sobre o tema discutido (51,7%), seguido da Europa (26,9%). São duas regiões com alta demandas de monitoramento da radiação ambiental, provavelmente devido a desastres nucleares de grandes proporções, como em

Chernobyl (1986) e Fukushima (2011) (OKUNO, 2013), e pela concentração elevada de reatores (DAVIDSON, 2022). Do Brasil foram obtidas 13 artigos com as especificações selecionadas para esse estudo. O maior quantitativo de publicações foi obtido dos países: Turquia (36), Índia (18) e Nigéria (14).

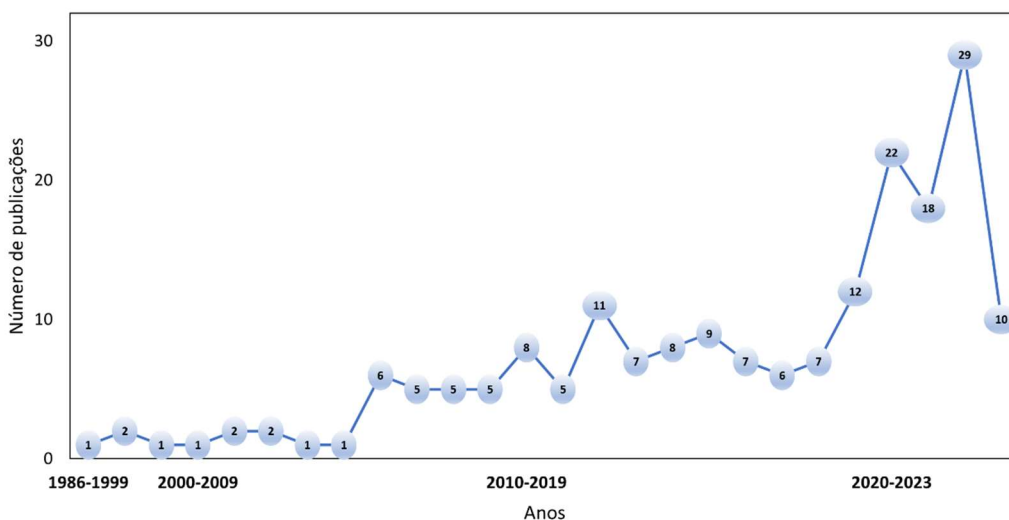
Foi observado um aumento de publicações a partir de 2012 (Figuras 8 e 9), provavelmente pela repercussão do acidente radioativo no Japão, em 2011 (DAVIDSON, 2022).

Figura 7. Distribuição dos artigos sobre radioatividade natural em água, por continente de origem, no intervalo de 1986 a 2023



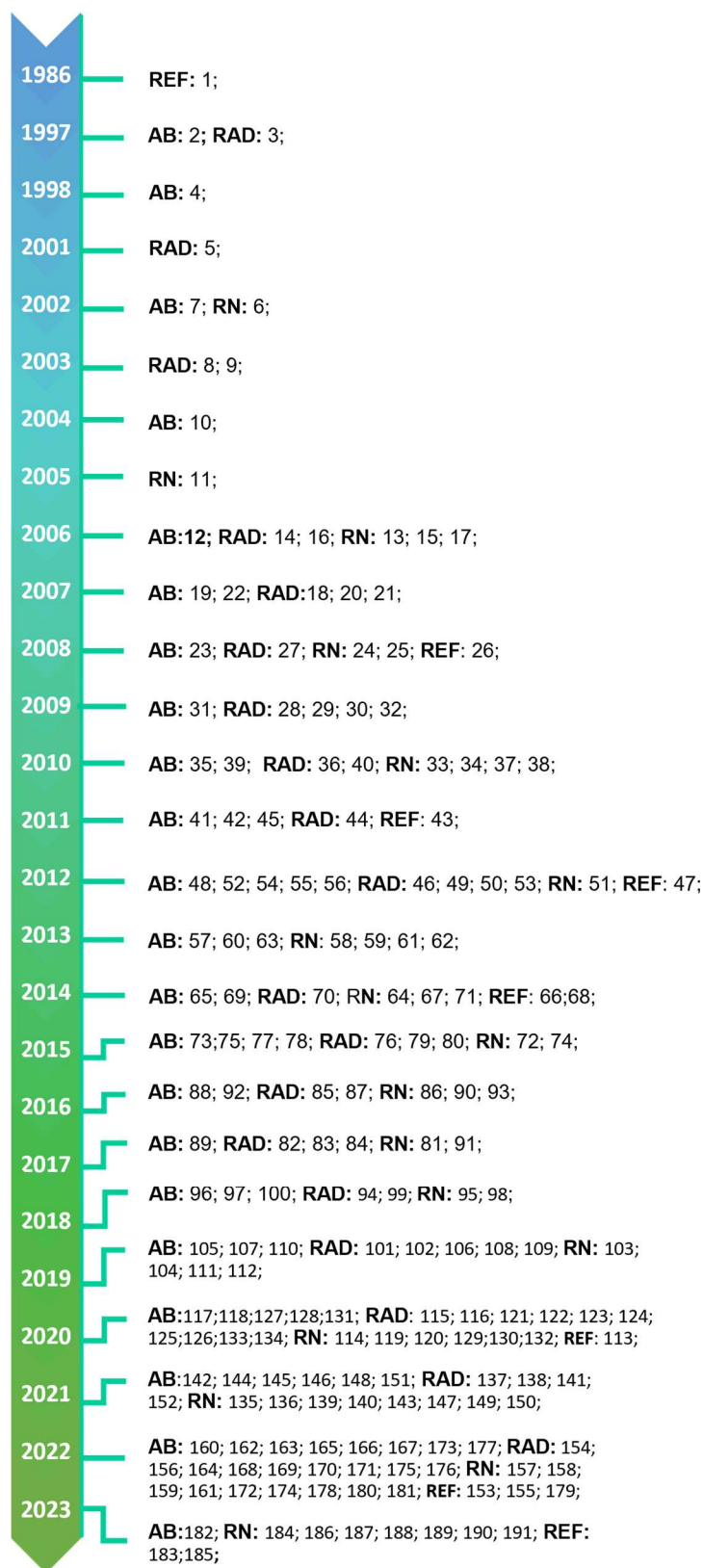
Fonte: os autores

Figura 8. Distribuição da quantidade de artigos sobre radioatividade natural em água, no intervalo de 1986 e 2023



Fonte: os autores

Figura 9. Relação das publicações sobre radioatividade natural em água, por ano e categorias, no intervalo de 1986 a 2023

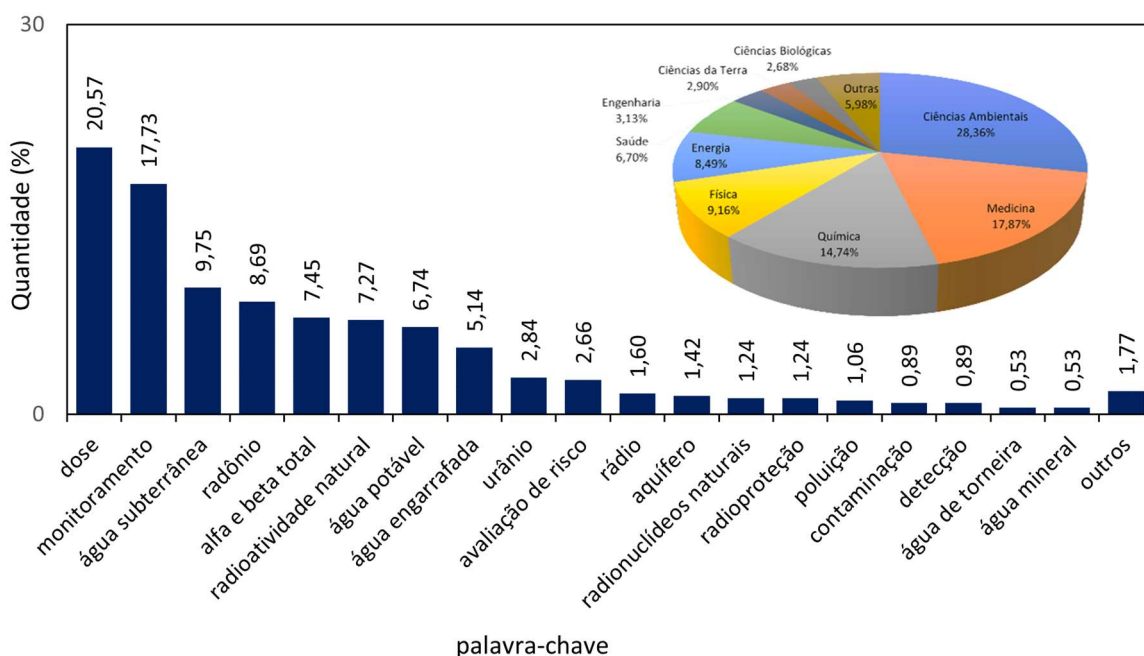


Nota: AB: alfa total e beta total, RAD: radionuclídeos diversos, RN: radônio e REF: artigos de referências. Relação numérica dos autores no Apêndice1. Fonte: os autores

2.3.2. Categorização por área de conhecimento e palavras-chave

Na categoria “área de conhecimento”, as áreas não eram exclusivas para cada artigo. As menções indexadas às publicações foram apresentadas na Figura 10. O alcance para as áreas “ciências ambientais” (28,48%) e “medicina” (17,94%), sugere a importância que a radioproteção ambiental tem atingido além das áreas de física e química, evidenciando o risco radiológico à saúde humana como fator predominante para se propor um estudo de monitoramento da água. As palavras-chaves “dose” e “monitoramento”, mais frequentemente aplicadas, corroboram essa evidência (Figura10).

Figura 10. Área de conhecimento e palavras-chave em publicações sobre radioatividade natural em água, entre 1986 e 2023.



Fonte: os autores

2.3.3. Categorização conforme atributos da amostra

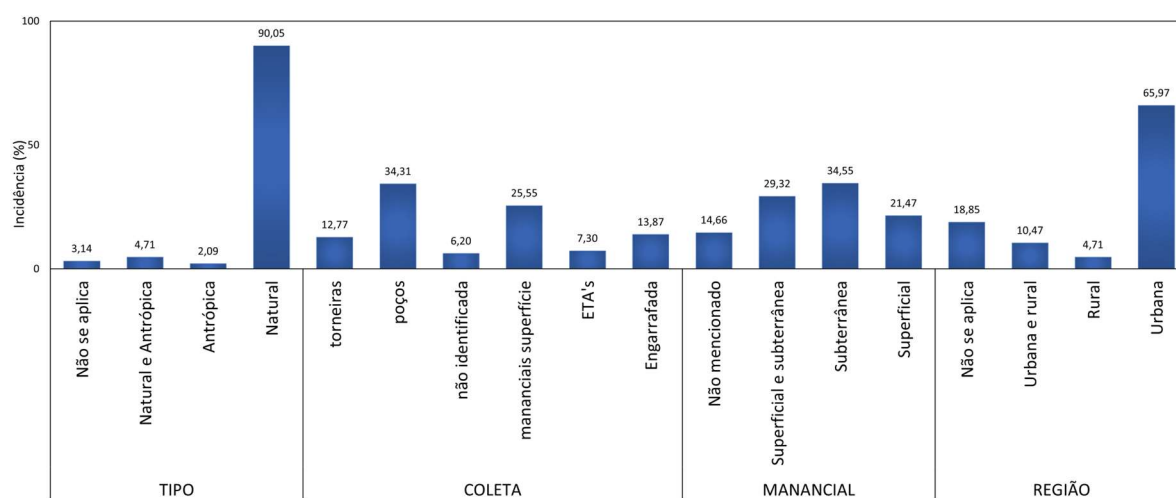
A categorização conforme os atributos das amostras de água foram apresentados na Figura 11. A radioatividade monitorada nas águas foi de origem natural em 90,05% dos artigos, pois a revisão buscou análises radiológicas de água potável não proveniente de emergências ou com proximidade de instalações nucleares.

Na classificação territorial dos artigos desse estudo, 65,97% foram oriundos exclusivamente de zona urbana, 4,71% deles da zona rural, 10,47% são combinação destas duas zonas, além dos outros artigos em que não foi disponibilizadas essa informação. Estes valores remetem ao fato de que o elevado uso da água nos grandes centros urbanos demandam maior rigor das autoridades e organismos de monitoramento em avaliar a

qualidade radioativa da água, principalmente nas proximidades de propulsores antrópicos de radionuclídeos (mineração, medicina diagnóstica, usinas eletrônicas). Entretanto, os resultados podem servir como alerta para que medidas de monitoramento radioambiental sejam estendidas para a zona rural (ABDULLAH. et al., 2023; KAPDAN et al., 2022; PERVIN et al., 2022; YANG et al, 2019; MEHDIZADEH et al., 2013).

A categorização dos mananciais pesquisados foi por tipo subterrâneo (34,55%), superficial (21,47%), mais 29,32% dos dois tipos combinados. A maioria das publicações monitorou águas de poços e cisternas (34,31%), seguido dos mananciais de superfície (25,55%). Entretanto é importante destacar a preocupação dos trabalhos sobre água engarrafada (13,87%), que é geralmente de origem subterrânea, não é tratada em estações de tratamento de água, e que podem conter elementos radioativos dissolvidos transportados do subsolo (YONG et al. 2020; KINAHAN et al., 2020; PIÑERO-GARCÍA et al. 2020; SEID et al., 2020; ABUELHIA et al. 2018; ALREFAE et al., 2012; KABADAYI. e GUMUS, 2011; DESIDERI et al., 2007a; DÁVILA RANGEL et al., 2002).

Figura 11. Sistematização de artigos sobre radioatividade em água potável conforme tipo de radionuclídeo, proveniência da amostra, tipo de manancial e classificação territorial



Fonte: os autores

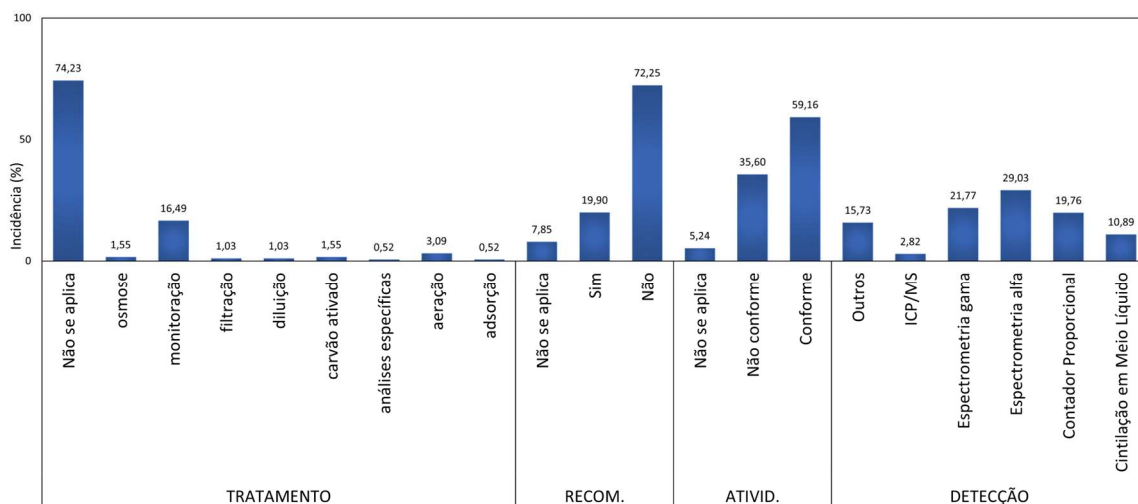
2.3.4. Categorização por técnicas e tratamentos empregados

A Figura 12 apresenta os resultados da sistematização dos artigos através das categorias de técnicas de detecção radiométrica, conformidade quanto às normas de segurança e tratamentos de atenuação da radioatividade utilizados.

Os principais métodos de detecção de radioatividade em água empregados nos estudos foram a espectrometria alfa (29,03%), espectrometria gama (21,77%) e contador proporcional de fluxo gasoso (19,76%). São técnicas empregadas em processo de triagem e análise de

radionuclídeos específicos, que requerem laboratórios e mão-de-obra especializados, ou seja, podem demandar custos para implantação em regiões que não possuam uma prévia estrutura de monitoramento ambiental (FLEIFIL e AL-SUDANI, 2021; SAIDU e BALA, 2018; CFARKU et al., 2014; MALANCA et al., 1998).

Figura 12. Prevalência de artigos sobre radioatividade em água potável conforme tipo de tratamento, recomendação de tratamento, conformidade quanto às normas de segurança e tipo de detecção do radionuclídeo.



Fonte: os autores

Quanto à concentração dos radionuclídeos, os resultados indicaram que em 59,16% dos estudos, as amostras de água estavam em conformidade, de acordo com a normativa de segurança sugerida pelo país de origem do trabalho. Das situações de não conformidade (35,60%), a Nigéria e a Índia apresentaram oito artigos cada, enquanto para o Brasil foram quatro (AMARAL et al., 2022; WAKASUGI et al., 2020; BONOTTO et al., 2014 e 2015). O uso do solo pela mineração, as características geológicas regionais e o abastecimento público de água através de manancial subterrâneo recorrente (maiores carreadores de radionuclídeos), podem justificar como fatores contribuintes da alta concentrações de radionuclídeos em água (ADAGUNODO et al., 2023; NAZIR et al., 2021; RAVIKUMAR et al., 2020; SUKANYA et al., 2020; SAIDU e BALA, 2018; AYODELE et al., 2017; AJAYI E ACHUKA 2009).

A recomendação pela atenuação da radioatividade na água potável foi apresentada em 19,90% dos estudos, através de contínuo monitoramento (16,46%), ou por utilização tecnologias de tratamento de água com a finalidade de normalizar os níveis de radioatividade (9,29%). As principais técnicas citadas foram a osmose reversa, filtração, aeração e adsorção (TYRVÄINEN, et al., 2022; ABU-KHADER et al., 2022; BAEZA et al., 2008).

2.3.5. Categoria alfa total e beta total em água (AB)

A análise de alfa total e beta total (AB), designada pela OMS como a triagem do início do monitoramento radiométrico, foi empregada em 29,84% dos artigos. Na Tabela 2 foram classificados aqueles artigos que disponibilizaram exclusivamente os resultados da concentração alfa total e beta total em água. Os valores foram apresentados pela média dos dados obtidos ou intervalo entre mínimos e máximos, considerando que cada nação legisla de modo distinto sobre o valor recomendado da triagem em água.

Tabela 2. Atividade alfa total e beta total em água apresentadas em publicações no intervalo entre 2002 e 2022

País	Localidade	Origem	N	Atividade (mBq.L ⁻¹)		Referências
				média ou faixa		
				alfa total	beta total	
Bangladesh	Dhaka	4	35	0,45 — 16,53	3,26 — 57,99	Pervin et al. (2022)
Jordânia	Qa Disi	2	ND	1920 — 6190	250 — 750	Abu-Khader et al. (2022)
Turquia	Hatay	5	20	1 — 20	15 — 715	Sogut et al. (2022)
Irã	Teerã	3	30	48 — 76	29 — 49	Ranjbar et al. (2022)
China	Hangzhou	1;4;	ND	16 — 59	28 — 690	Cao et al. (2022)
Turquia	Ankara	1;4	125	20 — 495	70 — 850	Kapdan et al. (2022)
Romênia	ND	1	64	21 — 7530	40 — 5520	Begy et al. (2022)
México	Veracruz	1;2;	195	52 — 950	34 — 1480	Vásquez-Contreras et al. (2022)
Líbano	Sul	1;2;4	42	374,6	418	Mourad et al. (2021)
Itália	Campania	2	207	40	300	La Verde et al. (2021)
Nigéria	Delta State	2	60	20 — 1370	410 — 7320	Esi Oghenevovwero et al. (2021)
China	ND	5	ND	0,498 — 490	5 — 1260	Sang et al. (2021)
Iraque	Misan	1;4	33	77	287	Fleifil et al. (2021)
Turquia	Trabzon	1	ND	8	43	Küçükömeroğlu et al. (2021)
China	Three Gorges	1	34	10 — 50	50 — 130	Yang et al. (2020)
Nigéria	Dutsin-Ma	1;2;4;	36	34	1910	Okunola et al. (2020)
Vietnã	norte	1;2;	226	24 — 748	27 — 632	Long Ho et al. (2020)
Jordânia	Aqaba	3;4;	ND	301 — 1188	604 — 1626	Al-Absi et al. (2019)
China	Chongqing	1	ND	2 — 70	55 — 263	Yang et al. (2019)
Nigéria	Anka	2	32	114 — 3698	71 — 4823	Saidu et al. (2018)
Tunísia	ND	3	6	48 — 94	45 — 430	Labidi et al. (2018)
Arábia Saudita	ND	2	ND	5,84 — 123,96	162 — 1966,88	Alharbi et al. (2018)
Irã	North Guilan	1;2;4;	28	12 — 115	23 — 332	Abbasi et al. (2017)
Turquia	Karaman	1;4;	30	6 — 125	1 — 667	Korkmaz et al. (2016)
Gana	Kumasi	1;2;	ND	15,7 — 142,7	89,3 — 400	Darko et al. (2015)
Turquia	Rize	4	61	5 — 164	12 — 787	Akbulut et al. (2015)
Bulgária	ND	5	994	177	30 — 980	Kamenova-Totzeva et al. (2014)
Albânia	ND	3;4;	ND	39	220	Cfarku et al. (2014)
Turquia	Bolu	1;4;	55	68,11	169,44	Gorur et al. (2014)
Turquia	Nevsehir	2	21	80 — 380	120 — 3470	Turhan et al. (2013)
Irã	Fars	1;2;	92	< 100	< 85	Mehdizadeh et al. (2013)
Brasil	Recife	3	9	35 — 85	200 — 330	Silva Filho et al. (2013)
Turquia	Bursa	5	43	13 — 629	12 — 455	Taskin et al. (2012)
Sérvia	ND	3	11	1 — 13	41 — 173	Jankovic et al. (2012)
Turquia	Samsun	1;4;	19	51,9	77,8	Gorur et al. (2011)
Turquia	Região Mar Negro	5	13	125	170	Kobyta et al. (2011)
Turquia	Batman	1;2;4	16	73,4;	73,7;	Damla et al. 2009)
Brasil	aquífero	2	78	8,9	0,26	Bonotto et al. (2008)
Itália	Centro	4	68	18,18 — 128,18	41,57 — 258,59	Desideri et al. (2007)
Hungria	ND	3	32	35 — 2600	8 — 3340	Kovács et al. (2004)
México	ND	3	37	11 — 415	26 — 695	Rangel et al. (2002)
Brasil e OMS				500	1000	OMS (2018) ; MS: Brasil (2021)

Nota: Procedência da água (1) mananciais de superfície; (2) mananciais subterrâneos; (3) água engarrafada; (4) torneira; (5) não mencionado ou não disponível; (ND) não disponível. Fonte: os autores.

As concentrações acima do limite de triagem da OMS para alfa total em água correspondem a 19,51% dos resultados da Tabela 2, com valor máximo de 6190 mBq.L⁻¹ (Jordânia) e foram provenientes de estudos de mananciais da Nigéria (ESI

OGHENEVOVWERO et al., 2021; LABIDI et al., 2018), Jordânia (ABU-KHADER et al., 2022; AL-ABSI et al. 2019), Romênia (BEGY et al., 2022), México (VÁSQUEZ-CONTRERAS et al., 2022), Hungria (KOVÁCS et al., 2004) e Vietnã (LONG HO et al., 2020).

Para beta total, as concentrações excederam o limite de triagem em 24,39% dos resultados da Tabela 2, com valor máximo de 7320 mBq.L⁻¹ (Nigéria). Foram procedentes da Romênia (BEGY et al., 2022), México (VÁSQUEZ-CONTRERAS et al., 2022), Nigéria (ESI OGHENEVOVWERO et al., 2021; OKUNOLA et al., 2020; SAIDU et al., 2018), China (SANG et al., 2021), Jordânia (AL-ABSI et al., 2019), Arábia Saudita (ALHARBI et al., 2018), Turquia (TURHAN et al., 2013) e Hungria (KOVÁCS et al., 2004).

No Brasil, os estudos apresentaram valores em conformidade com as normas de segurança, na faixa de 8,9 mBq.L⁻¹ – 85 mBq.L⁻¹ para alfa total e 0,26 mBq.L⁻¹ – 330 mBq.L⁻¹ para beta total. (DESIDERI et al., 2007; SILVA FILHO et al., 2013).

2.3.6. Categoria radônio (RN)

Para o atributo “RN”, o monitoramento do gás radônio em água foi determinado em 30,89% dos trabalhos e foram identificados na Tabela 3. As concentrações do isótopo Rn-222 foram apresentados por média ou intervalo entre mínimos e máximos. Considerando que cada nação legisla de modo distinto sobre o valor recomendado de radônio em água, os autores adotaram o limite de segurança da OMS para fins de comparação.

As concentrações que excederam o limite de segurança da OMS correspondem a 30,23% dos resultados da Tabela 3 e pertenceram aos estudos originados na Espanha (IBÁNHEZ et al., 2023; LÓPEZ E SÁNCHEZ, 2008), Iraque (MARZALI et al., 2022), Índia (RAVIKUMAR et al., 2021; KUMAR et al., 2019; RAVIKUMAR; SOMASHEKAR, 2013), Malásia (ISMAIL et al., 2021), China (YONG et al., 2020), Bulgária (KAMENOVA-TOTZEVA et al., 2018), Polónia (KOZLOWSKA et al., 2010), Finlândia (VESTERBACKA et al., 2004). No Brasil foram verificados três trabalhos, dos quais dois desses (BONOTTO, 2014; GODOY, J.M.; GODOY M.L., 2006), superaram as normativas de segurança da OMS.

Constatou-se que as pesquisas priorizaram as análises em mananciais de origem subterrânea, provavelmente pela característica do gás radônio estar mais concentrado nas rochas e dispersar-se à medida que se aproxima da superfície (SINGLA et al., 2022).

Tabela 3. Atividade de Rn-222 dissolvido em água, apresentadas em publicações no intervalo entre 2004 e 2023

País	Localidade	Origem	N	Atividade (Bq.L ⁻¹) média ou faixa	Referências
Iraque	Erbil	1	25	0,15 — 7,48	Abdullah et al. (2023)
Brasil	Caldas Novas	1	26	0,365 — 60,779	Lunardi e Bonotto (2023)
Espanha	Ría de Vigo	1;2;	37	94,9 — 187,3	Ibánhez et al. (2023)
Nigéria	Ibadan	2	40	3,00 — 24,50	Adagunodo et al. (2023)
Paquistão	Hunza-Nagar	1	10	45,3 — 65,8	Muhammad et al. (2023)
Turquia	ND	3	77	7,1 — 28,7	Turhan et al. (2023)
Índia	Hanumangarh	2	50	4,8	Sigla et al. (2023)
Japão	norte	1	15	12,7	Yamada et al. (2022)
Iraque	Dhi-Qar	1	20	288,02	Marzali et al. (2022)
Romênia	ND	3;4;	24	1,39	Calin et al. (2022)
Arábia Saudita	Hafr Al Batin	2	20	0,03 — 3,20	Mamun et al., 2022
Nigéria	Gadua	2	10	4,92 — 82,89	Shu'aibu et al. (2021)
Himalaia	Srinagar	1;2;	60	0,2 — 38,5	Nazir et al. (2021)
Egito	Qena	2	109	3,57	Salahel Din et al. (2021)
Índia	Yadagir	2	93	0,586 — 591	Ravikumar et al. (2021)
Malásia	Malacca	1;2;4;	37	0,07 — 186,5	Ismail et al. (2021)
Arábia Saudita	Qassim	2	61	1,20 — 15,43	El-Taher et al. (2020)
Irã	Qom	2	18	0,29 — 2,20	Fouladi-Fard et al. (2020)
China	ND	3	15	13,3 — 300	Yong et al. (2020)
Índia	Tumkur	2	16	4 — 40	Nagabhushana et al., 2020
Arábia Saudita	Dammam	1;3;4;	77	0,10 — 9,2	Elfatih Abuelhia (2019)
Malásia	Sik	2	40	7,93	Ahmad et al. (2019)
Coréia do Sul	ND	2	3818	86,6	Cho et al. (2019)
Índia	Magadi Taluk	2	32	27,4 — 167,5	Kumar et al. (2019)
Bulgária	ND	2	54	0,40 — 476	Kamenova-Totzeva et al. (2018)
Índia	Haryana	2	95	1,4 — 13,3	Sharma et al. (2017)
Turquia	Kastamonu	1;4;	72	0,025 — 0,128	Kurnaz e Atif Çetiner (2016)
Arábia Saudita	Qassim	1;2;3;4;	24	0,29 — 7,0	Althoyaib e El-Taher, (2016)
Espanha	Ilhas Canárias	2	28	0,3 — 76,9	Alonso et al. (2015)
Brasil	sul	2	75	0,02 — 112,5	Bonotto (2014)
Índia	Bangalore	1;2;	ND	1,50 — 381,20	Ravikumar; e Somashekar, (2013)
Arábia Saudita	ND	2	1025	0,06 — 67,4	Abdulrahman e Alabdula'aly (2014)
Turquia	Sakarya	1;2;3;	57	0,7 — 59,7	Yakut et al. (2013)
Malásia	Penang	1;2;3;4;	39	0,49 — 26,26	Muhammad et al. (2012)
Gana	Accra	2	21	8,1	Darko et al. (2010)
Turquia	Tokat	1;4;	ND	0,09 — 0,83	Yigitoglu et al. (2010)
Polônia	Sudety Mountain	1;2;3;4;	115	4,2 — 1703	Kozłowska et al. (2010)
Paquistão	Lahore	1;2;4;	ND	2,0 — 7,9	Manzoor et al. (2008)
Espanha	Extremadura	1;2;	350	0,24 — 1168	López e Sánchez (2008)
México	Chihuahua	2	ND	1 — 39,8	Villalba et al. (2006)
Brasil	ND	2	358	1,2 — 3542	Godoy, J.M. e Godoy M.L. (2006)
Turquia	Mar Negro	4	11	5,31 — 18,46	Çevik et al. (2006)
Finlândia	ND	2	472	50 — 460	Vesterbacka et al. (2004)
EURATOM:				100 — 1000	SINGLA et al. (2023)
EPA (EUA)				11,1 — 370	SINGLA et al. (2023)
OMS				100	OMS, 2022

Nota: Procedência da água (1) mananciais de superfície; (2) mananciais subterrâneos; (3) água engarrafada; (4) torneira; (5) não mencionado ou não disponível; (ND) não disponível. Fonte: os autores.

2.3.7. Categoria radionuclídeos naturais (RAD)

A categoria “RAD” foi representada por 32,86% dos artigos desta revisão. Os resultados foram dispostos por média dos valores obtidos ou intervalo entre mínimos, junto aos limites de segurança e a concentração (Apêndice 3).

A concentração máxima de radionuclídeos foi alcançada em estudos na Nigéria (²³²Th=

35,61 Bq.L⁻¹ e ²²⁶Ra= 78,36 Bq.L⁻¹), na Jordânia (²³⁸U= 33 Bq.L⁻¹), no Irã (²²⁸Ra= 13,75 Bq.L⁻¹ e ²¹⁰Pb= 41,02 Bq.L⁻¹). Para o polônio (²¹⁰Po), todos os resultados estavam dentro dos limites de referência. Do Brasil foram obtidos quatro estudos (BONOTTO et al., 2009 e 2015; WAKASUGI et al., 2020; AMARAL et al., 2022), com resultados atendendo os limites de segurança internacionais para todos os radionuclídeos em destaque, exceto pela pesquisa realizada na região de São Paulo e Minas Gerais (BONOTTO, 2015), cujos resultados de Ra-226 (42 mBq.L⁻¹ – 2913 mBq.L⁻¹) e Ra-228 (5,4 mBq.L⁻¹ – 3899 mBq.L⁻¹) excederam os valores da OMS, de 1000 mBq.L⁻¹ e 100 mBq.L⁻¹ respectivamente.

A verificação da radioatividade em água potável no Japão, após o acidente na usina nuclear de Fukushima, ocorrido em março de 2011 (DAVIDSON, 2022), tornou-se específica para determinação do césio-134 (¹³⁴Cs) e o césio-137 (¹³⁷Cs), os principais radionuclídeos dispersos pela explosão do reator. Houve restrição de consumo de água local em algumas localidades até que análises indicassem níveis seguros de consumo. À princípio, durante a fase de emergência, a frequência do monitoramento da água de torneira foi diária (limite de 200 Bq.L⁻¹), e a partir de 2012, foi alternada para coletas mensais, sob o limite de 10 Bq.L⁻¹. O radioisótopo iodo-131 encontrado nos recursos hídricos, não foi considerado fator de risco após o acidente, devido à meia-vida curta de oito dias (OMS, 2018).

Por fim, outros 6,81% dos artigos (REF) abordaram a temática “radioatividade em água potável” através de revisão sistemática ou ensaios técnicos. Esses estudos foram lidos integralmente, entretanto não foram categorizados nos parâmetros estabelecidos desse trabalho.

2.4. CONSIDERAÇÕES

O Guia de Gestão da radioatividade em água potável, da Organização Mundial de Saúde (OMS, 2022) recomenda como expediente para garantir que a população não seja exposta a altas doses de radiação pela água, que seja realizado o monitoramento contínuo, além da investigação das causas da radiação ionizante através de levantamentos técnicos e a implantação de sistemas de tratamento de água para atenuação das doses.

A partir dos resultados deste estudo, observou-se a importância de que sejam propostos e executados programas de monitoramento ambiental radiológico dos recursos hídricos, principalmente para comunidades servidas de poços sem tratamento adequado e no consumo da água engarrafada de procedência subterrânea.

2.5. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu concluir que:

- Constatou-se que a maioria dos estudos reunidos carece de dados sobre os riscos da radioatividade natural para a saúde humana. Portanto, as informações registradas nesta revisão subsidiam as bases e evidenciam a necessidade de uma discussão em nível nacional que subsidie a criação de leis governamentais que visem regulamentar a exposição humana à radiação ionizante natural, a fim de prevenir e minimizar os riscos de desenvolvimento de câncer e outras doenças crônicas.

- Os estudos coletados sobre a radioatividade em água potável no Brasil atendiam aos níveis de segurança para o quesito alfa e beta total. Entretanto, as pesquisas identificaram que, em algumas regiões, as concentrações dos radionuclídeos rádio e radônio ultrapassaram as normativas recomendadas.

- Constatou-se a prevalência de estudos do tema proposto nos continentes asiático e europeu, enquanto o Brasil foi o país com mais estudos disponibilizados na América.

- Em países do Hemisfério Norte, verificou-se a predominância de estudos para detecção de isótopos de radônio (Rn-222) em água, ocorrência local a elemento de, e cujos danos à saúde provocados por sua radiação são mais elencados, em comparação a outras radionuclídeos.

- O monitoramento da potabilidade da água foi preconizado em pesquisas envolvendo principalmente captações subterrâneas, provenientes de centros urbanos

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; MIREKHTIARY, F. Lifetime risk assessment of Radium-226 in drinking water samples. **International Journal of Radiation Research**, v. 17, n. 1, 2019. Disponível em: <https://ijrr.com/article-1-2469-en.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- _____. Gross alpha and beta exposure assessment due to intake of drinking water in Guilan, Iran. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 314, n. 2, p. 1075-1081, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5493-6>.
- _____. Some physicochemical parameters and 226Ra concentration in groundwater samples of North Guilan, Iran. **Chemosphere**, v. 256, p. 127113, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127113>.
- ABDULLAH, G. M. *et al.* A study of radon concentration and physicochemical parameters in spring water of Erbil city, Iraqi Kurdistan Region. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08808-5>.
- ABDURABU, W. A. *et al.* Occurrence of natural radioactivity and corresponding health risk in groundwater with an elevated radiation background in Juban District, Yemen. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6142-z>.
- ABOJASSIM, A. A. *et al.* Radioactivity Levels in Healthy and Groundwater Samples of Al-Manathera Region of Al-Najaf, Iraq. **Jordan Journal of Physics**, v. 15, n. 4, p. 353-360, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47011/15.4.3>.
- ABUELHIA, Elfatih. Assessment of radiation dose from radon ingestion and inhalation in commercially bottled drinking water and its annual effective dose in Eastern Province, Saudi Arabia. **International Journal of Environmental Health Research**, v. 29, n. 2, p. 164-172, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09603123.2018.1531113>.
- ABU-KHADER, M. M. *et al.* Evaluation of ultra-filtration ceramic membrane plant for the treatment of drinking water from Ram group aquifers in south Jordan. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 16, p. 100723, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100723>.
- ADAGUNODO, T. A. *et al.* Assessment and health effects of radon and its relation with some parameters in groundwater sources from shallow aquifers in granitic terrains, southeastern axis of Ibadan, Nigeria. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 21, p. 100930, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100930>.
- ADEBIYI, F. M. *et al.* Occurrence and remediation of naturally occurring radioactive materials in Nigeria: a review. **Environmental Chemistry Letters**, v. 19, n. 4, p. 3243-3262, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01237-4>.
- ADEOLA, A. O. *et al.* Advances in the management of radioactive wastes and radionuclide contamination in environmental compartments: a review. **Environmental Geochemistry and Health**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01378-7>.
- AHMAD, N. *et al.* Assessments of 226Ra and 222Rn concentration in well and tap water from Sik, Malaysia, and consequent dose estimates. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 25, n. 7, p. 1697-1706, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1559034>.
- AHMAD, N. *et al.* Effect of geochemical properties (pH, conductivity, TDS) on natural radioactivity and dose estimation in water samples in Kulim, Malaysia. **Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal**, v. 25, n. 7, p. 1688-1696, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1526633>.
- AJAYI, O. S.; ACHUKA, J. Radioactivity in drilled and dug well drinking water of Ogun state Southwestern Nigeria and consequent dose estimates. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 135, n. 1, p. 54-63, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp095>.
- AKBULUT, S.; TASKIN, H. Determination of natural radioactivity by gross α and β measurements in tap waters in Rize province. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 303, n. 1, p. 413-420, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3441-2>.
- ALABDULA'ALY, Abdulrahman I. Occurrence of radon in groundwater of Saudi Arabia. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 138, p. 186-191, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.028>.
- AL-ABSI, E.; ALAMEER, S.; MANASRAH, R.. Critical remarks on radioactivity analysis in drinking waters: high doses and increased lifetime risks from Aqaba tap water, Jordan. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, v. 146, p. 107-119, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23604>.
- ALEISSA, K. A. *et al.* Measurement of radon levels in groundwater supplies of Riyadh with liquid scintillation counter and the associated radiation dose. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 154, n. 1, p. 95-103, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncs140>.
- ALHARBI, T. *et al.* Natural radioactivity measurements and age-dependent dose assessment in groundwater from Al-Zulfi, Al-Qassim and Al-Majmaah regions, Saudi Arabia. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 318, n. 2, p. 935-945, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6053-4>.
- ALOMARI, A. H. *et al.* 238U and 232Th isotopes in groundwater of Jordan: Geological influence, water chemistry, and health impact. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 170, p. 108660, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108660>.
- ALONSO, H. *et al.* Radon in Groundwater of the Northeastern Gran Canaria Aquifer. **Water**, v. 7, n. 12, p. 2575-2590, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w7062575>.
- ALREFAE, Tareq. Investigation of 238U content in bottled water consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses. **Health Physics**, v. 102, n. 1, p. 85-89, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e31822959de>.
- AL-SHBOUL, K. F. *et al.* Radiation hazards and lifetime risk assessment of tap water using liquid scintillation counting and high-resolution gamma spectrometry. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 178-179, p. 245-252, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.09.005>.

- ALTHOYAIB, S. S.; EL-TAHER, A. Natural radioactivity measurements in groundwater from Al-Jawa, Saudi Arabia. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 304, n. 2, p. 547-552, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3874-7>.
- ALTHOYAIB, S. S.; TAHER, A. El. Natural Radioactivity Levels of Radon, Radium and the Associated Health Effects in Drinking Water Consumed in Qassim Area, Saudi Arabia. **Journal of Environmental Science and Technology**, v. 9, n. 2, p. 208-213, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3923/jest.2016.208.213>.
- ALTIKULAÇ, A. *et al.* Natural Radionuclides in Bottled Mineral Waters Consumed in Turkey and Their Contribution to Radiation Dose. **ACS Omega**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c04087>.
- AMARAL, R. S, *et al.* Determination of the internal dose due to the intake of ²²⁶Ra and ²¹⁰Pb in drinking water from deep wells in the Metropolitan Region of Recife–Brazil. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10492-z>, a
- AMARAL, R. S. *et al.* Risk survey for the population of Recife and neighboring cities due to the occurrence of radium in groundwater. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 247, p. 106868, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106868>, b
- AMIN, R. M.; KHALIL, F. A.; EL FAYOUMI, M. A. K. Natural radioactivity and chemical concentrations in Egyptian groundwater. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 173, n. 1-4, p. 29-35, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1367-x>.
- AMRANI, D. Natural radioactivity in Algerian bottled mineral waters. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 252, n. 3, p. 597-600, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1015883610854>.
- ARABI, A. M. El; AHMED, N. K.; SALAHEL DIN, K. Natural radionuclides and dose estimation in natural water resources from Elba protective area, Egypt. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, n. 3, p. 284-292, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl022>.
- ASADUZZAMAN, Kh *et al.* Natural radioactivity levels in commercialized bottled drinking water and their radiological quality assessment. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 26, p. 11999-12009, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1048307>.
- ATEF EL-TAHER *et al.* Assessment of Annual effective dose for different age groups based on radon concentrations in the groundwater of Qassim, Saudi Arabia. **Iranian Journal of Medical Physics**, v. 17, n. 1, p. 15–20, 2020. Disponível em: https://ijmp.mums.ac.ir/article_12777.html. Acesso em: 06 jun. 2023.
- AVWIRI, G. O.; TCHOKOSSA, P.; MOKOBIA, C. E. Natural radionuclides in borehole water in Port Harcourt, Rivers State, Nigeria. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 123, n. 4, p. 509-514, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl526>.
- AWODUGBA, A. O.; TCHOKOSSA, P. Assessment of Radionuclide Concentrations in Water Supply from Bore-holes in Ogbomosoland, Western Nigeria. **Indoor and Built Environment**, v. 17, n. 2, p. 183-186, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/1420326x08089551>.
- AYODELE, A. E. *et al.* Radioactivity level of dug well water across selected cities in two states of Nigeria. **Environmental Forensics**, v. 18, n. 4, p. 331-338, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15275922.2017.1368041>.
- AYODELE, A. E.; IFE-ADEDIRAN, O. O.; AROGUNJO, A. M. Radioactivity level of drilled well water across selected cities in Ondo and Ekiti states, Southwestern Nigeria and its radiological implications. **International Journal of Radiation Research**, v. 18, n. 2, p. 351–358, 2020. Disponível em: <https://ijr.com/article-1-2932-en.html>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- BAEZA, A.; SALAS, A.; LEGARDA, F. Determining factors in the elimination of uranium and radium from groundwaters during a standard potabilization process. **Science of The Total Environment**, v. 406, n. 1-2, p. 24-34, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.050>.
- BAJÁK, Petra *et al.* Refining the conceptual model for radionuclide mobility in groundwater in the vicinity of a Hungarian granitic complex using geochemical modeling. **Applied Geochemistry**, v. 137, p. 105201, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105201>.
- BALARAM, V.; RANI, A.; RATHORE, D. P. S. Uranium in groundwater in parts of India and world: A comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 1, n. 2, p. 100043, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100043>.
- BEGY, R. C. *et al.* Measurements of radium content in some spring waters from Romania. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 11, n. 2, p. 247-251, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.30638/eemj.2012.031>.
- BEGY, R. C. *et al.* Radiological investigation of natural carbonated spring waters from Eastern Carpathians, Romania. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 331, n. 3, p. 1439-1450, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08195-3>.
- BEYERMANN, M. *et al.* Occurrence of natural radioactivity in public water supplies in Germany: ²³⁸U, ²³⁴U, ²³⁵U, ²²⁸Ra, ²²⁶Ra, ²²²Rn, ²¹⁰Pb, ²¹⁰Po and gross activity concentrations. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 141, n. 1, p. 72-81, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq139>.
- BJØRKLUND, G. *et al.* Uranium in drinking water: a public health threat. **Archives of Toxicology**, v. 94, n. 5, p. 1551-1560, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02676-8>.
- BONOTTO, D. M. *et al.* Dissolved ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb in Guarani aquifer groundwater, Brazil. **Radiation Measurements**, v. 44, n. 3, p. 311-324, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radmeas.2009.03.022>.
- BONOTTO, D. M.; BUENO, T. O. The natural radioactivity in Guarani aquifer groundwater, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 66, n. 10, p. 1507-1522, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.03.008>.
- BONOTTO, D. M. ²²²Rn, ²²⁰Rn and other dissolved gases in mineral waters of southeast Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 132, p. 21-30, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.01.005>.

- BONOTTO, D. M.. 226Ra and 228Ra in mineral waters of southeast Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 1, p. 839-853, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4088-1>.
- BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Diretrizes metodológicas elaboração de revisão sistemática e meta-análise de ensaios clínicos randomizados**. ISBN 978-65-5993-021-0. Disponível em: http://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/diretrizes_elaboracao_revisao_sistematica_meta-anal.ise.pdf. Acesso em: 12 jul. 2023.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: Brasília, 4 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em 06 jun. 2023.
- CALIN, M. R. *et al.* Analysis of the radon concentrations in natural mineral and tap water using Lucas Cells technique. **Journal of Environmental Engineering and Landscape Management**, v. 30, n. 3, p. 370-379, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3846/jeelm.2022.17411>.
- CANBAZOĞLU, Cumhur *et al.* Assessment of natural radioactivity in Elazığ region, eastern Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 292, n. 1, p. 375-380, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1485-0>.
- CAO, Y. *et al.* Radioactivity in water and food from Hangzhou, China in the past decade: Levels, sources, exposure and human health risk assessment. **Environmental Technology & Innovation**, p. 102581, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102581>.
- CARLOS, P.M.S. Radioatividade nas águas destinadas a consumo humano. **Instituto Politécnico de Coimbra**. Mestrado. 2017. Disponível em: <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/20896/1/Radioatividade%20nas%20%C3%A1guas%20destinadas%20a%20consumo%20humano%20Pedro%20Carlos%20MGA%202017.pdf>.
- ÇEVİK, U. *et al.* Natural radioactivity in tap waters of Eastern Black Sea region of Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 118, n. 1, p. 88-92, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nci325>.
- CFARKU, F. *et al.* A preliminary study of gross alpha/beta activity concentrations in drinking waters from Albania. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 301, n. 2, p. 435-442, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3142-x>.
- CHMIELEWSKA, I.; CHAŁUPNIK, S.; BONCZYK, M.. Natural radioactivity in drinking underground waters in Upper Silesia and solid wastes produced during treatment. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 93, p. 96-100, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2014.01.017>.
- CHO, B. W. *et al.* Radon concentrations in the community groundwater system of South Korea. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, n. 3, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7301-y>.
- CNEN (a). Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição regulatória 3.01/012:2020**. Níveis de investigação e de referência para radioatividade em água potável. Mai. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_12.pdf. Acesso em 06 jun. 2023.
- COTHERN, C. R.; LAPPENBUSCH, W. L.; MICHEL, J. Drinking-water contribution to natural background radiation. **Health Physics**, v. 50, n. 1, p. 33-47, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/00004032-198601000-00002>.
- CRAWFORD-BROWN, D. Sources, Risks, and Mitigation of Radioactivity in Water. In: CRAWFORD-BROWN, D. **Treatise on Water Science**. Elsevier, 2011. p. 59-67. ISBN 9780444531995. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53199-5.00051-8>. Acesso em 06 jun. 2023.
- DAMLA, N. *et al.* Determination of gross α and β activities in waters from Batman, Turkey. **Desalination**, v. 244, n. 1-3, p. 208-214, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.024>.
- DAMLA, N. *et al.* Evaluation and analysis of the spatial distribution of radiation risks caused by radon in drinking water of Batman, Türkiye. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08670-x>.
- COSTA DANTAS, R. *et al.* Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 143-157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06962-6>.
- DARKO, E. O. *et al.* Preliminary studies on 222Rn concentration in ground water from selected areas of the Accra metropolis in Ghana. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 283, n. 2, p. 507-512, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-009-0378-y>.
- DARKO, G. *et al.* Assessment of the activity of radionuclides and radiological impacts of consuming underground water in Kumasi, Ghana. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 1, p. 399-404, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3433-0>.
- DAVIDSON, A. J. The Role of Nuclear Energy in the Global Energy Transition. **Oxford Institute for Energy Studies**, 2022. Disponível em: <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2022/08/The-Role-of-Nuclear-Energy-in-the-Global-Energy-Transition-ET14.pdf>.
- DÁVILA RANGEL, J. I. *et al.* Radioactivity in bottled waters sold in Mexico. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 56, n. 6, p. 931-936, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00047-7](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00047-7).
- DEGERLIER, Meltem; KARAHAN, Gursel. Natural radioactivity in various surface waters in Adana, Turkey. **Desalination**, v. 261, n. 1-2, p. 126-130, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.020>.
- DESIDERI, D. *et al.* 238U, 234U, 226Ra, 210Po concentrations of bottled mineral waters in Italy and their dose contribution. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 94, n. 2, p. 86-97, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.01.005>. a
- DESIDERI, D. *et al.* Radiological characterization of drinking waters in Central Italy. **Microchemical Journal**, v. 87, n. 1, p. 13-19, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.04.006>. b

- DINH CHAU, N. *et al.* Natural radioactivity in groundwater – a review. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 47, n. 4, p. 415-437, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2011.628123>.
- DRAGOVIĆ, S. D. *et al.* Spatial distribution of the ²²⁶Ra activity concentrations in well and spring waters in Serbia and their relation to geological formations. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 112, p. 206-211, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.08.013>.
- DUONG, H. V. *et al.* Gross alpha/beta activity concentrations in spa and mineral waters in North Vietnam. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, n. 2, p. 1511-1517, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07410-3>.
- ERDEN, P. E. *et al.* ²³⁸U, ²³⁴U and ²²⁶Ra concentrations in mineral waters and their contribution to the annual committed effective dose in Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 301, n. 1, p. 159-166, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3105-2>.
- ESI OGHENEVOVWERO, E.; AGBALAGBA, E. I. O.; AVWIRI GREGORY, O. Impact of produced water discharge on the gross alpha and gross beta activity concentrations and radiological health risk on drinking water sources in coastal areas of Nigeria. **International Journal of Ambient Energy**, v. 42, n. 1, p. 18-28, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1525577>.
- EURATOM. EU Commission Recommendation. **Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies** 344, p. 85–88, 2001. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2001/928/oj>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- FERREIRA, A. M. *et al.* Naturally-Occurring Radioactive Materials at water treatment plant on the Poços de Caldas Plateau Region, Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 1, p. 103-111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200044>.
- FLEIFIL, S. Sh; AL-SUDANI, Z. A. I.. Evaluation of Gross Alpha and Beta Activity Concentrations and Annual Effective Dose in Drinking Waters of Misan Province-Iraq Using Low Background Gas Flow Proportional Counter (LB- 4110). **NeuroQuantology**, v. 19, n. 11, p. 22-31, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14704/nq.2021.19.11.nq21172>.
- FOULADI-FARD, R. *et al.* Radon concentration and effective dose in drinking groundwater and its relationship with soil type. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, n. 2, p. 1427-1435, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07424-x>.
- GALÁN LÓPEZ, M.; MARTÍN SÁNCHEZ, A. Present status of ²²²Rn in groundwater in Extremadura. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 99, n. 10, p. 1539-1543, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.12.013>.
- GARIBOV, A. *et al.* Radioecological research of some water resources in central region of Azerbaijan. **International Journal of Radiation Research**, v. 18, n. 2, p. 323–331, 2020. <https://ijrr.com/article-1-2911-en.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- GAZI, Mahasin *et al.* Radiological safety assessment of drinking water in Darjeeling hill and its foothill areas: An experimental finding. **Water Supply**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.259>.
- GODOY, J. M.; GODOY, M. L. Natural radioactivity in Brazilian groundwater. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 85, n. 1, p. 71-83, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.05.009>.
- GÖRÜR, F. K. *et al.* Annual effective dose and concentration levels of gross α and β in various waters from Samsun, Turkey. **Desalination**, v. 279, n. 1-3, p. 135-139, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.05.071>.
- GORUR, F. K.; CAMGOZ, H. Natural radioactivity in various water samples and radiation dose estimations in Bolu province, Turkey. **Chemosphere**, v. 112, p. 134-140, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.02.074>.
- HO, Phan Long *et al.* Simultaneous Determination of Gross Alpha/Beta Activities in Groundwater for Ingestion Effective Dose and its Associated Public Health Risk Prevention. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61203-y>.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. **IAEA-TECDOC-1788: Criteria for Radionuclide Activity Concentrations for Food and Drinking Water**. Publishing Section; Austria: 2016. p. 20. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/11061/criteria-for-radionuclide-activity-concentrations-for-food-and-drinking-water>. Acesso em 06 jun. 2023.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. **Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards**. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, Vienna, 2014. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards>. Acesso em 06 jun. 2023.
- IBÁNHEZ, J. S. P.; ÁLVAREZ-SALGADO, X. A.; ROCHA, C.. Radon prevalence in domestic water in the Ría de Vigo coastal basin (NW Iberian Peninsula). **Environmental Science and Pollution Research**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27305-6>.
- ISMAL, N. F. *et al.* Radon Levels of Water Sources in the Southwest Coastal Region of Peninsular Malaysia. **Applied Sciences**, v. 11, n. 15, p. 6842, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11156842>.
- JANKOVIĆ, M. M. *et al.* Natural radionuclides in drinking waters in Serbia. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 70, n. 12, p. 2703-2710, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.08.013>.
- JOBBÁGY, V. *et al.* Radiochemical characterization of spring waters in Balaton Upland, Hungary, estimation of radiation dose to members of public. **Microchemical Journal**, v. 94, n. 2, p. 159-165, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.10.015>.
- JOKSIC, J.; RADENKOVIC, M.; MILJANIC, S.. Natural radioactivity of some spring and bottled mineral waters from several Central Balkan sites, as a way of their characterization. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v. 72, n. 6, p. 621-628, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/jsc0706621j>.
- KABADAYI, O.; GUMUS, H. Natural activity concentrations in bottled drinking water and consequent doses. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 150, n. 4, p. 532-535, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr430>.

- KALIPRASAD, C. S.; NARAYANA, Y. Distribution of natural radionuclides and radon concentration in the riverine environs of Cauvery, South India. **Journal of Water and Health**, v. 16, n. 3, p. 476-486, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2018.242>.
- KAMENOVA-TOTZEVA, R. M. *et al.* Natural radioactivity content in Bulgarian drinking waters and consequent dose estimation. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 164, n. 3, p. 402-407, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu290>.
- KAMENOVA-TOTZEVA, R. M. *et al.* Quantitative and qualitative study of radon content in Bulgarian mineral waters. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 181, n. 1, p. 48-51, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy089>.
- KAMENOVA-TOTZEVA, R.; TOTZEV, A.; KOTOVA, R. Radium content in Bulgarian mineral waters. **Nuclear Technology and Radiation Protection**, v. 33, n. 1, p. 133-138, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.2298/ntrp1801133k>.
- KAPDAN, E. *et al.* A study of environmental radioactivity measurements for Cankiri, Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 150, n. 3, p. 398-404, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr416>.
- KAPDAN, Enis *et al.* Radioactivity survey and risk assessment study for drinking water in capital city Ankara, Turkey. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, p. 1-13, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2109965>.
- KASIĆ, Amela *et al.* Levels of natural radioactivity in mineral and thermal waters of Bosnia and Herzegovina. **Nukleonika**, v. 60, n. 3, p. 503-508, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1515/nuka-2015-0062>.
- KEBIR, H. Natural radionuclide concentrations in drinking water (well and spring mineral waters) samples from Bordj-Bouarreridj region, east Algeria. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 331, n. 2, p. 727-737, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08126-8>.
- KHAN, Khalid. Natural radioactivity levels in river, stream and drinking water of the northwestern areas of Pakistan. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 256, n. 2, p. 289-292, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1023993519360>.
- KHANDAKER, M. U. *et al.* Radiation dose to the Malaysian populace via the consumption of bottled mineral water. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 140, p. 173-179, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2017.01.018>.
- KHANDAKER, M. U. *et al.* Terrestrial radionuclides in surface (dam) water and concomitant dose in metropolitan Kuala Lumpur. **Radiation Protection Dosimetry**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz018>.
- KINAHAN, A. *et al.* Assessment of Radiation Dose from the Consumption of Bottled Drinking Water in Japan. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 17, n. 14, p. 4992, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph17144992>.
- KITTO, M. E. *et al.* Radionuclide and chemical concentrations in mineral waters at Saratoga Springs, New York. - **Journal of Environmental Radioactivity**, 80, 3, 327-339, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2004.10.006>.
- KOBYA, Y. *et al.* Radiological Characterization of Natural Spring Waters in Eastern Black Sea Region, Turkey. **Environmental Forensics**, v. 11, n. 1-2, p. 187-192, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15275920903559230>.
- KOBYA, Y. *et al.* Radioactivity Survey and Risk Assessment Study for Drinking Water in the Artvin Province, Turkey. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 226, n. 3, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-015-2344-3>.
- KOBYA, Y. *et al.* Radiochemical characterization of mineral waters in the Eastern Black Sea Region, Turkey. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 182, n. 1-4, p. 415-422, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-011-1885-1>.
- KORKMAZ, M. E.; AGAR, O.; ŞAHİN, M.. Gross α and β activity concentrations in various water from Karaman, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4909-2>.
- KOVACS, T. ^{238}U , ^{226}Ra , ^{210}Po concentrations of bottled mineral waters in Hungary and their committed effective dose. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 108, n. 2, p. 175-181, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch006>.
- KOZŁOWSKA, B. *et al.* Radon in groundwater and dose estimation for inhabitants in Spas of the Sudety Mountain area, Poland. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, n. 4-5, p. 854-857, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.12.016>.
- KÜÇÜKÖMEROĞLU, B. *et al.* Determination of radioactivity level of water supply network in Trabzon province, Turkey. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1972996>.
- KÜÇÜKÖNDER, E; GÜMBÜR, S.. Radon Gas Measurement in Water Samples in Kahramanmaraş Province of Turkey. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 5, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05631-8>.
- KUMAR, A. *et al.* Quantification of radiological dose and chemical toxicity due to radon and uranium in drinking water in Bageshwar region of Indian Himalaya. **Groundwater for Sustainable Development**, p. 100491, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100491>.
- KUMAR, M. *et al.* Radon concentration measurement and effective dose assessment in drinking groundwater for the adult population in the surrounding area of a thermal power plant. **Journal of Water and Health**, v. 20, n. 3, p. 551-559, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2022.265>.
- KURNAZ, A.; ATIF ÇETİNER, M. Exposure assessment of the radon in residential tap water in Kastamonu. **International Journal of Radiation Research**, v. 14, n. 3, p. 245-250, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.14.3.245>.
- KURNAZ, A. *et al.* Radiological and physicochemical properties of drinking waters consumed in the Western Black Sea Region of Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 328, n. 3, p. 805-814, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07736-6>.
- LA VERDE, G. *et al.* Measurement of Natural Radionuclides in Drinking Water and Risk Assessment in a Volcanic Region of Italy, Campania. **Water**, v. 13, n. 22, p. 3271, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13223271>.
- LABIDI, S.; GHARBI, S. Dose assessment to members of the public in Tunisia from intakes of some naturally occurring radionuclides in bottled mineral water. **International Journal of Radiation Research**, v. 16, n. 3, 2018. Disponível em: <https://ijrr.com/article-1-2285-en.html>. Acesso em: 06 jun. 2023.

- LASHEEN, Y. F.; SELIMAN, A. F.; ABDEL-RASSOUL, A. A. Simultaneous measurement of ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in natural water by liquid scintillation counting. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 95, n. 2-3, p. 86-97, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.02.002>.
- LUNARDI, M.; BONOTTO, D. M. Natural radioactivity due to uranium and radon in thermal groundwaters of Central Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**,. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08784-w>.
- MALANCA, A.; REPETTI, M.; DE MACÊDO, H. R. Gross alpha- and beta-activities in surface and ground water of Rio Grande do Norte, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 49, n. 7, p. 893-898, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(97\)00298-4](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(97)00298-4).
- MAMUN, Ai; ALAZMI, Amira Salman. Investigation of Radon in Groundwater and the Corresponding Human-Health Risk Assessment in Northeastern Saudi Arabia. **Sustainability**, v. 14, n. 21, p. 14515, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/su142114515>.
- MANZOOR, F.; ALAAMER, A. S.; TAHIR, S. N. A. Exposures to ²²²Rn from consumption of underground municipal water supplies in Pakistan. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 130, n. 3, p. 392-396, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncn156>.
- MAROVIC, G.; SENČAR, J.; FRANIĆ, Z.. ²²⁶Ra in tap and mineral water and related health risk in the Republic of Croatia. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 46, n. 3, p. 233-239, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1005794028679>.
- MARZAALI, A. A.; AL-SHAREEFI, M. A.; ABOJASSIM, A. A.. ²²²Rn, ²²⁶Ra and ²³⁸U concentration in water samples for some marshes in Dhi-Qar governorate, Iraq. **Water Supply**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2021.216>.
- MEHDIZADEH, S. *et al.* Measurements of natural radioactivity concentration in drinking water samples of Shiraz city and springs of the Fars province, Iran, and dose estimation. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 157, n. 1, p. 112-119, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct114>.
- MILENA-PÉREZ, A. *et al.* Determination and dose contribution of uranium isotopes and ²¹⁰Po activity concentrations of natural spring waters in the Province of Granada, Spain. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 181, n. 4, p. 350-359, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncv034>.
- MOHAMMED, A. A.; TAWFIQ, N. F. Radioactivity Levels in Water Samples of Tigris River in Baghdad City, Iraq. **Iraqi Journal of Science**, p. 2540-2550, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.24996/ijs.2022.63.6.21>.
- MOURAD, S. *et al.* Occurrence and hazard assessment of natural radioactivity in drinking water in South Lebanon. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09133-8>.
- MUHAMMAD, B. G. *et al.* Measurements of ²²²Rn activity concentration in domestic water sources in Penang, northern peninsular Malaysia. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 149, n. 3, p. 340-346, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncr230>.
- MUHAMMAD, S.; HAQ, Anwarul. Spatial distribution of radon contamination in hot springs water and its cancer and non-cancer risks in the Hunza-Nagar valley, Pakistan. **Environmental Geochemistry and Health**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01596-7>.
- NAGABHUSHANA, S. R. *et al.* Study on activity of radium, radon and physicochemical parameters in ground water and their health hazards around Tumkur industrial area. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 323, n. 3, p. 1393-1403, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06985-w>.
- NAZIR, Salik *et al.* Dose estimation of radioactivity in groundwater of Srinagar City, Northwest Himalaya, employing fluorimetric and scintillation techniques. **Environmental Geochemistry and Health**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00576-5>.
- NGUYEN, V. T.; HUYNH, N. P. T.; LE, C. H. Levels of ²²⁶Ra in groundwater samples collected in Phu Yen province, Vietnam associated with health risks to local population and impacts on the maize (*Zea mays* L.) soil. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 25, p. 31812-31826, 5 jun. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09538-x>.
- NIRANJAN, R. S. *et al.* Studies on radon concentration in drinking water around Hemavathi river basin, Karnataka State, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 314, n. 1, p. 321-331, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5432-6>.
- NUCCESELLI, C.; RUSCONI, R.; FORTE, M. Radioactivity in drinking water: Regulations, monitoring results and radiation protection issues. **Annali dell'Istituto Superiore di Sanita**, v. 48, n. 4, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23247133/> Acesso em: 06 jun. 2023.
- OKOLI, Chitu; DUARTE, Trad.: David W. A.; MATTAR, Revisão técnica e. introdução: João. **Guia Para Realizar uma Revisão Sistemática de Literatura. EaD em Foco**, v. 9, n. 1, 2019. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/286131326.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2023.
- OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 185-200, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/xzD9Dgv8GPfHkxkfbQsn4f/>
- OKUNOLA, O.J. *et al.* Risk assessment of drinkable water sources using gross alpha and beta radioactivity levels and heavy metals. **Heliyon**, v. 6, n. 8, p. e04668, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04668>.
- OMS. Organização Mundial da Saúde. **Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda**. 2022. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1414381/retrieve> Acesso em: 06 jun. 2023.
- OMS. Organização Mundial da Saúde. **Management of radioactivity in drinking-water**. 2018. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272995>. Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Acesso em 06 jun. 2023
- PERVIN, S. *et al.* Assessment of gross alpha/beta activity in tap water of Dhaka city using ZnS (Ag) scintillation detector and concomitant health hazard. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, p. 1-12, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2140418>.

- PIÑERO-GARCÍA, F. *et al.* Radiological impact of naturally occurring radionuclides in bottled water. **Food Control**, v. 130, p. 108302, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.108302>.
- QWASMEH, Ahmed Ali Husein. Age-Dependent Dose Due To Intake of 40K, 228RA, 226RA in Spring Water in Petra District, Jordan. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 197, n. 3-4, p. 195-201, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncab170>.
- RANI, S. *et al.* Radiological risk assessment to the public due to the presence of radon in water of Barnala district, Punjab, India. **Environmental Geochemistry and Health**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01012-y>.
- RANJBAR, H. BAGHERI R. Radioactivity assessment and lifetime risk survey from bottled water in Iran. **Iranian Journal of Physics Research**, v. 22, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47176/ijpr.22.3.21383>.
- RAVIKUMAR, P. *et al.* Quantification of radon concentration in groundwater around abandoned Gogi uranium mineralized zone, Yadagir district, Karnataka, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 329, n. 2, p. 489-498, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-021-07814-9>.
- RAVIKUMAR, P.; SOMASHEKAR, R. K. Determination of the radiation dose due to radon ingestion and inhalation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 11, n. 2, p. 493-508, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13762-013-0252-x>.
- SAIDU, A.; BALA, A. Assessment of the Specific Activity of Alpha- and Beta-emitting Radionuclides in Groundwater, Anka, Nigeria. **Iranian Journal of Medical Physics**, v. 15, n. 4, 2018. Disponível em: https://ijmp.mums.ac.ir/article_10612_599c8525e425a75b452880a564f39ea3.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023
- SAJO-BOHUS, L. *et al.* Gross alpha radioactivity of drinking water in Venezuela. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 35, n. 3, p. 305-312, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/s0265-931x\(96\)00056-2](https://doi.org/10.1016/s0265-931x(96)00056-2).
- SALAH EL DIN, K. *et al.* Natural radionuclides in groundwater from Qena governorate, Egypt. **Environmental Forensics**, p. 1-8, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1834026>.
- SALEH, E.E. *et al.* Assessment of radiation hazards a result of natural radioactivity in water from Abyan delta, Yemen. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 304, n. 3, p. 1235-1241, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3932-9>.
- SALEHIPOUR, Amineh *et al.* Spatial distributions of natural radionuclide concentrations of bottled mineral water: doses estimation and health risk assessment. **Environmental Health Engineering and Management**, v. 7, n. 2, p. 107-117, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34172/ehem.2020.13>.
- SANG, C. *et al.* Gross alpha and beta measurements in drinkable water from seven major geographical regions of China and the associated cancer risks. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111728, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111728>.
- SANNAPPA, J. *et al.* Estimation of ambient gamma radiation dose and drinking water radon concentration in coastal taluks of Uttara Kannada district, Karnataka. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 323, n. 3, p. 1459-1466, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06812-2>.
- SEGHOOR, A.; SEGHOOR, F. Z. Radium and 40K in Algerian bottled mineral waters and consequent doses. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 133, n. 1, p. 50-57, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncp009>.
- SEID, A. M. A. *et al.* Radon concentration of different brands of bottled natural mineral water commercially sold in Turkey and radiological risk assessment. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, p. 1-13, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03067319.2020.1830989>.
- SEKUDEWICZ, I.; GAŚIOROWSKI, M.. Determination of the activity and the average annual dose of absorbed uranium and polonium in drinking water from Warsaw. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 319, n. 3, p. 1351-1358, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6351-x>.
- SELÇUK ZORER, Ö.; ŞAHAN, T.. The concentration of 238U and the levels of gross radioactivity in surface waters of the Van Lake (Turkey). **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 288, n. 2, p. 417-421, 2011. Disponível em <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0958-x>.
- SEMERJIAN, L. *et al.* Age-dependent effective ingestion dose estimations and lifetime risk assessment for selected radionuclides (40K and 3H) in bottled waters marketed in United Arab Emirates. **Chemosphere**, v. 249, p. 126114, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126114>.
- SHABANA, E.I. *et al.* Natural radioactivity in the groundwater of Wadi Nu'man, Mecca Province, Saudi Arabia. **Radiochimica Acta**, v. 101, n. 7, p. 461-470, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1524/ract.2013.2043>.
- SHARMA, S. *et al.* Assessment of Radiation Dose from Exposure to Radon in Drinking Water from Western Haryana, India. **International Journal of Environmental Research**, v. 11, n. 2, p. 141-147, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41742-017-0015-5>.
- SHU'AIBU, H. K. *et al.* Determination of radon concentration in groundwater of Gadau, Bauchi State, Nigeria and estimation of effective dose. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 178, p. 108934, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108934>.
- SILVA FILHO, C. A. *et al.* Radioactive risk evaluation of mineral water in the Metropolitan Region of Recife, Northeastern Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 295, n. 2, p. 1215-1220, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1993-6>.
- SINGH, P. *et al.* A study on uranium and radon levels in drinking water sources of a mineralized zone of Himachal Pradesh, India. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4629-9>.
- SINGLA, A.K. *et al.* A comprehensive study of radon in drinking waters of Hanumangarh district and the assessment of resulting dose to local population. **Environmental Geochemistry and Health**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01304-x>.
- SKWARZEC, B. Radionuclides of 210Po, 234U and 238U in drinking bottled mineral water in Poland. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 256, n. 2, p. 361-364, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1023970308882>.

- SKWARZEC, B.; STRUMIŃSKA, D. I.; BORYLO, A. The radionuclides ²³⁴U, ²³⁸U and ²¹⁰Po in drinking water in Gdańsk agglomeration (Poland). **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 250, n. 2, p. 315-318, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1023/a:1017903814852>.
- SLAVCHEV, B. *et al.* Uranium And ²¹⁰Po Radionuclides in Drinking Water in Southern Bulgaria and Expected Radiation Doses. **Radiation Protection Dosimetry**. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac039>.
- SÖĞÜT, Ö. *et al.* Pollution and Health Risk Evaluations from Gross Radioactivity in Drinking Waters in Reyhanlı District, Hatay. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05795-3>.
- SUKANYA, S.; JOSEPH, Sabu; NOBLE, Jacob. Evaluation of radiation dose from radon ingestion and inhalation in groundwater of a small tropical river basin, Kerala, India. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, p. 1-12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2020.1835889>.
- TAHIR, S. N. A.; ALAAMER, A. S. Concentrations of Natural Radionuclides in Municipal Supply Drinking Water and Evaluation of Radiological Hazards. **Environmental Forensics**, v. 10, n. 1, p. 1-6, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15275920802678404>.
- TASKIN, H.; KAM, E.; BOZKURT, A.. Determination of gross alpha and beta activity concentrations in drinking waters in Bursa region of north-western Turkey. **Desalination and Water Treatment**, v. 45, n. 1-3, p. 21-25, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.691956>.
- TURGAY, M. E. *et al.* Assessment of gross alpha and beta radioactivity for drinking water in Hatay province, Turkey. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 11, p. 4960-4965, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.1000384>.
- TURHAN, Ş. *et al.* Determination of natural radioactivity by gross alpha and beta measurements in ground water samples. **Water Research**, v. 47, n. 9, p. 3103-3108, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.03.030>.
- TURHAN, Ş. *et al.* Radiochemical analysis of bottled drinking waters consumed in Turkey and a risk assessment study. **Microchemical Journal**, v. 149, p. 104047, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104047>.
- TURHAN, Ş.; KURNAZ, A.; AYDIN, E. Assessment of internal radiation exposure caused by radon in commercially bottled spring waters consumed in Turkey. **International Journal of Environmental Health Research**, p. 1-12, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2211948>.
- TYRVÄINEN, J. T.; NAARALA, J.; TURTIAINEN, T.. Can activated carbon filtration of groundwater cause radiation safety problems? **Water Supply**, 15 dez. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2022.425>.
- UGBEDE, F. O. *et al.* Natural radionuclides, heavy metals and health risk assessment in surface water of Nkalagu river dam with statistical analysis. **Scientific African**, v. 8, p. e00439, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00439>.
- UNSCEAR. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex B: Uncertainties in risk estimates for radiation-induced cancer**. New York, United Nations, 2012. Disponível em: https://www.unscear.org/docs/reports/2012/UNSCEAR2012Report_AnnexB_Uncertainty_AdvanceCopy.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023
- USEPA United States Environmental Protection Agency. **National Primary Drinking Water Regulations (NPDWR)**, 2022. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwr_complete_table.pdf. Acesso em: 06 jun. 2023.
- VAN DUONG, H. *et al.* Uranium and radium isotopes in some selected thermal, surface and bottled waters in Vietnam. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 319, n. 3, p. 1345-1349, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6317-z>.
- VÁSQUEZ-CONTRERAS, J. A. *et al.* Radiological Study of Water for Human Use and Consumption in Rural Areas of the Central Zone of the State of Veracruz, Mexico. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 21, n. 4, p. 1955-1962, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.46488/nept.2022.v21i04.050>.
- VENGOSH, A. *et al.* A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 151914, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151914>.
- VESTERBACKA, P. *et al.* Activity concentrations of ²²⁶Ra and ²²⁸Ra in drilled well water in Finland. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, n. 4, p. 406-412, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nci067>.
- VESTERBACKA, P.; MÄKELÄINEN, I.; ARVELA, H. Natural radioactivity in drinking water in private wells in Finland. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 113, n. 2, p. 223-232, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nch446>.
- VILLALBA, L. *et al.* Natural radioactivity in groundwater and estimates of committed effective dose due to water ingestion in the state of Chihuahua (Mexico). **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, n. 2, p. 148-157, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nci382>.
- VIPIN KUMAR, P. *et al.* Radon In Groundwater of Magadi Taluk, Ramanagara District in Karnataka. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 183, n. 4, p. 514-521, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy176>.
- WAKASUGI, D. S. M.; DAMATTO, S. R.; ULRICH, J. C. Natural radionuclides ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²¹⁰Pb and ²¹⁰Po and inorganic chemical elements determined in mineral waters from Águas de Contendas and Lambari, Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 326, n. 1, p. 51-63, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07357-5>.
- WALENCIK, A. *et al.* Natural radioactivity in underground water from the Outer Carpathians in Poland with the use of nuclear spectrometry techniques. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, n. 4-5, p. 839-843, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.09.056>.
- WOJTKOWSKA, M.; WOJTKOWSKI, K.; DŁUGOSZ-LISIECKA, M.. Assessment of Heavy Metals and Radionuclides Concentration in Selected Mineral Waters Available on the Polish Market. **Applied Sciences**, v. 12, n. 22, p. 11401, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app122211401>.

- YADAV, A. K. *et al.* Concentrations of uranium in drinking water and cumulative, age-dependent radiation doses in four districts of Uttar Pradesh, India. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 96, n. 2, p. 192-200, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.934247>.
- YAKUT, H. *et al.* Measurement of ²²²Rn concentration in drinking water in Sakarya, Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 157, n. 3, p. 397-406, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/nct157>.
- YALCIN, P. *et al.* Investigation of radioactivity level in soil and drinking water samples collected from the bottle of Erzincan, Turkey. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 292, n. 3, p. 999-1006, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1596-7>.
- YAMADA, R. *et al.* ²²²Rn and ²²⁶Ra Concentrations in Spring Water and Their Dose Assessment Due to Ingestion Intake. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, n. 3, p. 1758, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph19031758>.
- YANG, Q. *et al.* Impact of the three gorges water conservancy project on radioactivity concentration levels in surrounding waters. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 189, n. 4, p. 505-516, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncaa065>.
- YANG, Q. *et al.* Investigation of radioactive level of drinking water sources in the Upper Yangtze River of Chongqing city. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 321, n. 1, p. 141-149, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-019-06551-4>.
- YIGITOGU, I. *et al.* Radon concentrations in water in the region of Tokat city in Turkey. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 142, n. 2-4, p. 358-362, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq191>.
- YONG, J. *et al.* Radon concentration measurement and effective dose assessment in different brands of commercial bottled water produced in China. **Water Supply**, v. 20, n. 5, p. 1581-1591, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/ws.2020.061>.
- YU, Lang *et al.* Assessment of natural radioactivity and consequent radiological hazard in different brands of commercialized bottled mineral water produced in China. **Journal of Water and Health**, v. 18, n. 4, p. 566-573, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.2166/wh.2020.038>.
- YUCE, G.; GASPARNON, M.. Preliminary risk assessment of radon in groundwater: a case study from Eskisehir, Turkey. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 49, n. 2, p. 163-179, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2013.739562>.
- ZIKOVSKY, Lubomir. Alpha radioactivity in drinking water in Quebec, Canada. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 88, n. 3, p. 306-309, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2006.02.004>.

CAPÍTULO III – ARTIGO 2

CARACTERIZAÇÃO RADIOLÓGICA DAS ÁGUAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO EM MUNICÍPIOS DE GOIÁS

Nogueira, R.A.; Scalize, P. S.

RESUMO

A radioatividade é um fenômeno inerente de certas substâncias dispersas na biosfera, podendo ser detectada nos recursos naturais ou por proveniência de atividades antrópicas. A água para abastecimento público tem a capacidade de transportar elementos radioativos que podem trazer riscos a saúde humana, conforme a concentração disponível. A quantificação da atividade alfa total e beta total em água potável é a primeira etapa de controle de qualidade para garantir a potabilidade radiológica. Neste estudo, foram analisadas a atividade alfa total e beta total em 376 amostras de água de 62 municípios de Goiás, durante os anos de 2011 e 2017, pelo método de Cintilação em Meio Líquido (LSC). Os resultados foram de 10 mBq.L⁻¹ a 2420 mBq.L⁻¹ para a atividade alfa total e, de 30 mBq.L⁻¹ a 4200 mBq.L⁻¹, para beta total. Constatou-se que 97,87% das amostras de água estavam em conformidade para o parâmetro alfa e 98,94% para o parâmetro beta, de acordo com os padrões requeridos pela Portaria do Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021. Foi verificado que as captações subterrâneas apresentaram atividade radiológica maior que as de manancial superficial. A partir do levantamento sobre as paisagens geológicas e as recentes atividades antrópicas de desenvolvimento de Goiás, não foi estabelecida uma relação direta de causalidade com os resultados obtidos dos municípios que excederam os limites de segurança de triagem radiológica em água. Recomendou-se que nas captação de água onde os valores de triagem foram excedidos, sejam feitas análises específicas para avaliar o risco da radiação em água através da determinação da dose efetiva.

Palavras-chave: radioproteção; monitoramento ambiental; alfa total; beta total.

3.1. INTRODUÇÃO

Para garantir o direito humano elementar de sobrevivência e proteção à saúde, o acesso à água potável é uma conduta diretamente relacionada ao desenvolvimento humano de determinado território conforme a promoção de políticas de saúde pública. O monitoramento de substâncias na água de abastecimento, dentre elas, elementos radioativos, é relevante, considerando os riscos da radiação e seus possíveis danos ao seres vivos (KORKMAZ et al., 2016; ABBASI e MIREKHTIARY, 2017).

Os elementos radioativos, provenientes de processos naturais ou antrópicos estão distribuídos na litosfera, através dos compartimentos naturais, como rochas e rios. Assim, a concentração radioativa da água de uma localidade depende de variáveis como a composição mineralógica do solo e rochas, da geomorfologia, da temperatura ambiente, além do tempo de contato da água com as rochas. Entretanto, quando dissolvidos na água, podem ser incorporados e trazer riscos à saúde humana (SANG et al., 2021).

A água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, deve atender a determinados padrões de potabilidade, de forma a garantir a proteção da saúde humana. A detecção das substâncias radioativas em água pode ser demorada e dispendiosa, por essa razão a Organização Mundial da Saúde recomenda que o parâmetro de atividade alfa total e beta total seja monitorado preliminarmente, como triagem, para averiguar a necessidade de identificar em seguida os elementos radioativos específicos contribuintes (OMS, 2022).

No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021 (MS:BRASIL, 2021) e a Posição Regulatória CNEN 3.01/012:2020 (CNEN, 2020a), orientados pelo Guia de Diretrizes para a qualidade da água potável da OMS, recomendam que os valores limites de atividade para alfa total seja de 500 mBq.L⁻¹ e para beta total sejam de 1000 mBq.L⁻¹. Nessa faixa, a radiação não representa risco à saúde humana. Acima disso, deve-se efetuar a investigação de radionuclídeos, cálculo da dose efetiva, e, se necessário, a introdução de medidas de otimização para aquela fonte de abastecimento de água (KORKMAZ et al., 2016).

Em 1987, na cidade de Goiânia, em consequência da violação de uma cápsula contendo Césio-137, utilizada em equipamento de radioterapia, houve um acidente radiológico com exposição de material radioativo ao meio ambiente. No relatório da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 1988) sobre esse acidente, foi divulgado que:

A resposta subsequente [...] enfrentou várias dificuldades no levantamento da área urbana e da bacia hidrográfica [...], e foram agravadas pela forte chuva que

caiu entre 21 e 28 de setembro, que dispersou ainda mais o céσιο no ambiente. Em vez de serem arrastados, como se esperava, os materiais radioativos depositaram-se nos telhados, o que contribuiu em grande medida para as taxas de dose nas casas. Os níveis de contaminação da água potável eram muito baixos. As águas subterrâneas também se encontravam isentas de contaminação, com exceção de alguns poços próximos dos principais focos de contaminação com concentrações de céσιο ligeiramente acima do nível de detecção.

Na rede hídrica local, o material foi carregado devido ao elevado índice pluviométrico daquele período, sofrendo diluições contínuas, e com pequena parcela agregada aos sedimentos, de tal forma a não causar danos para as populações à jusante. Isso foi reforçado pelo fato de que as quantidades de Céσιο-137 em contato com a água foram pequenas e dispersas na medida em que os rios seguiram seu curso.

Após dez anos, aplicadas medidas de descontaminação e com a criação do depósito de rejeitos radioativos, foi colocado em prática um programa de monitoramento ambiental, sob as orientações da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), cujo principal objetivo foi inspecionar os níveis de Cs-137 nos compartimentos ambientais das imediações do repositório, avaliando a dose real ou potencial de radiação dos rejeitos para os residentes do perímetro. O relatório referente ao ano de 2022 reportou que a dose equivalente efetiva devido ao consumo de água, à exposição ao sedimento do fundo de rio e ao uso de água subterrânea, apresentou valores muito inferiores ao limite de estabelecido para indivíduos do grupo crítico, assim como para todas as matrizes ambientais (DE LUCA e GODOY, 1991; IAEA, 1988; PMA, 2023).

Primordialmente, pela importância em monitorar a potabilidade radiológica da água potável, somada à mobilização pública e científica devido ao acidente radiológico na capital goiana, algumas pesquisas foram realizadas e não foi apresentada a detecção de Cs-137 ou qualquer outro radionuclídeo em água, acima dos limites da legislação brasileira (LAURIA et al, 2004; GODOY e GODOY, 2006; COSTA DANTAS et al., 2019; LUNARDI e BONOTTO, 2023).

Entre 2011 e 2017, a prestadora de serviço SANEAGO em parceria com a CNEN, promoveu a análise da radioatividade natural (alfa total e beta total) em águas de abastecimento de 39,02% dos municípios goianos. No estudo resultante destes ensaios, até o ano de 2016, o parâmetro radiológico apresentou as medianas com valores de 30 mBq.L⁻¹ para alfa total e 54 mBq.L⁻¹ para beta total (MINGOTE e COSTA, 2016).

Em virtude da água poder ser um conduto para entrada de substâncias radioativas no organismo e que seu monitoramento radiológico tem importância significativa para a proteção

da saúde humana (ABBASI e MIREKHTIARY, 2017), este estudo tem o propósito de caracterizar a radioatividade natural da água potável de abastecimento público para determinados municípios de Goiás, e apresentar um banco de dados de monitoramento radioambiental que contribua com a investigação dos riscos da radiação associados à ingestão da água.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Área de estudo

O estado de Goiás, pertencente ao Centro-Oeste brasileiro, representa 4% do território nacional e é dividido em mesorregiões² (Norte, Sul, Leste, Noroeste, Centro) e 18 microrregiões, caracterizadas principalmente pela identidade regional em fatores naturais e sociais. Possui 246 municípios, 2.005,27 km² de área urbanizada e mais de sete milhões de habitantes (IBGE, 2023). A temperatura média anual varia entre 20°C a 23°C (mínima = 12°C; máxima = 34°C), com clima tropical semiúmido (IMB, 2023). A precipitação média varia entre 1100 e 2300 mm, com período de seca no intervalo de abril a setembro e período das chuvas entre outubro e março (SEMAD, 2015).

Os recursos hídricos de Goiás são integrados a partir de três principais bacias: Bacia Hidrográfica do Rio Paranaíba, Bacia Hidrográfica do Rio Tocantins e Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (SEMAD, 2015). Apresenta relevante reserva de água subterrânea, com significativas áreas de recarga do Aquífero Guarani, em conjunto a outros aquíferos. A média da vazão das águas de Goiás é de cerca de 17 L.s⁻¹. (km²)⁻¹ e de 175 km³.ano⁻¹ de volume anual médio (ANA, 2023). As principais atividades relacionadas ao uso dos recursos hídricos são a pecuária, agricultura (irrigação), abastecimento público e indústria (CODEVASF, 2021;).

A infraestrutura de abastecimento de água é de 95% de cobertura e, desse índice, 91,87% dos municípios são atendidos pela prestadora de serviços Saneamento de Goiás S.A. - SANEAGO (SANEAGO, 2023). Aqueles não atendidos pela empresa são operados por serviços autônomos municipais ou pelas prefeituras, como ocorre nas cidades de Senador Canedo e Caldas Novas (ARRUDA; SCALIZE, 2016). Goiás também dispõe de variabilidade em disponibilidade hídrica, em que 53% das regiões urbanas são abastecidas exclusivamente por mananciais superficiais, 24% utilizam somente águas subterrâneas e as demais são

² A denominação "mesorregião" é aplicada aos municípios pela administração pública como parte do planejamento de recursos para a região. Essa divisão foi promovida pelo IBGE objetivando "o processo social como determinante, o quadro natural como condicionante e a rede de comunicação e de lugares como elemento da articulação espacial". A partir de 2017, o IBGE extinguiu as mesorregiões e microrregiões, criando um quadro regional brasileiro, com novas divisões geográficas denominadas, respectivamente, regiões geográficas intermediárias e imediatas (IMB, 2023).

atendidas por ambos os tipos de manancial (ANA, 2021).

A sua geomorfologia Goiás é caracterizada pela predominância das formas denudacionais (98%), que são aquelas provenientes dos processos erosivos naturais. Apresenta domínio de terras planas e de baixas amplitudes altimétricas, com alternância planaltos, chapadas e vales (CODEVASF, 2021;). É constituído por rochas do período Arqueano ao Cenozoico, representados pelos processos Vulcano Sedimentares, complexos máficos-ultramáficos acamadados, rochas sedimentares, complexo granito-gnáissicos e greenstone belts (CARVALHO et al., 2008).

A ocorrência dos solos de Goiás pode estar relacionada às rochas adjacentes a sua formação e pelo tipo de relevo, variando em regiões de formação máfica e nas bacias sedimentares. São predominantes o grupo do Latossolo Vermelho (42%), Latossolo Vermelho-Amarelo, Cambissolo, Argissolo, Nitossolo, Neossolo Quartzarênico, Neossolo Litólico, Plitossolo e Gleissolo (NASCIMENTO, 1991). No contexto sobre o uso do solo em Goiás, cerca de 45% da área do estado é aproveitada por pastagens, outros 18% equivalem a agricultura, 33% equivalem ao bioma nativo cerrado e cerca de 1% representa a área urbana (CARVALHO et al., 2008).

Para entender a presença de radioatividade nos recursos naturais do Estado de Goiás, foi feito um levantamento sobre as ocorrências de minerais radioativos em sua geologia. Foram catalogados cinco principais jazimentos de urânio³ e um em perspectiva, agrupados em ambientes de associação a arenitos feldspáticos ou a granitos intrusivos relacionados a processos metassomáticos (LACERDA FILHO et al., 1999).

3.2.2. Coleta e preparação das amostras

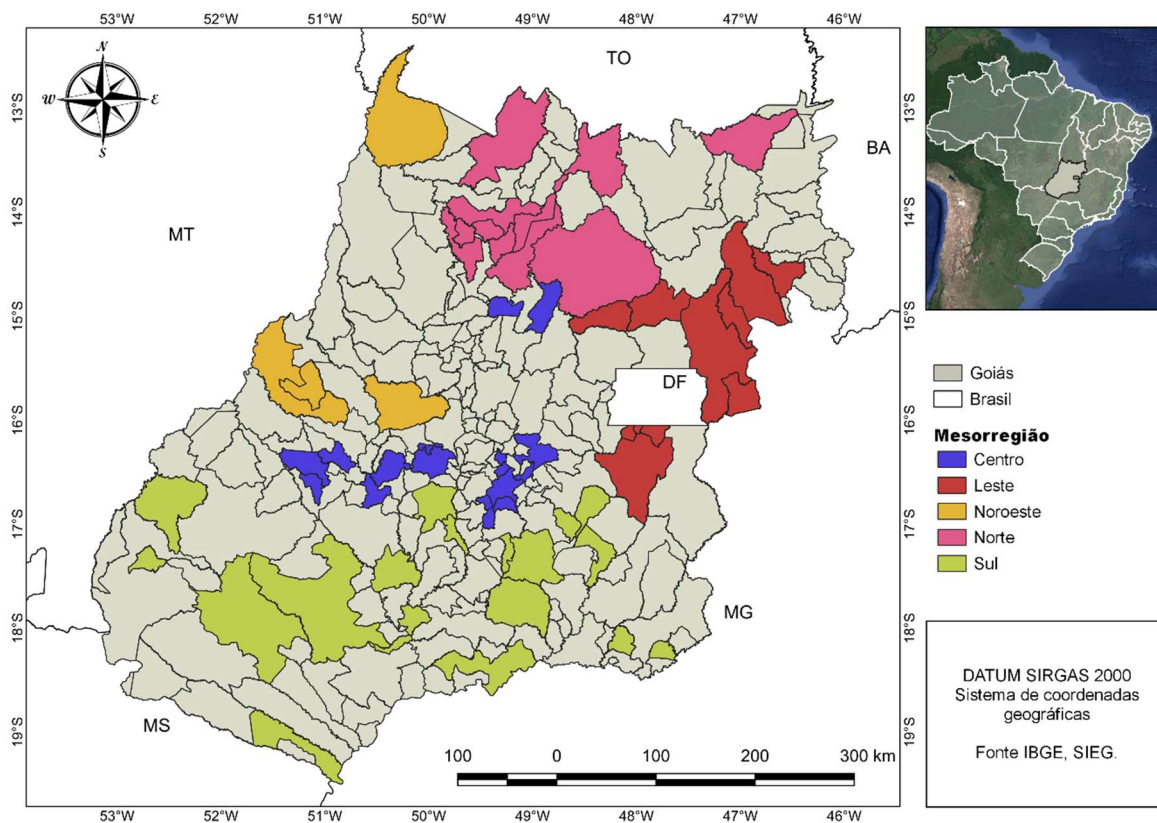
O Guia de Gestão da Radioatividade da Água Potável (OMS, 2018), recomenda que a frequência de monitoramento da radioatividade natural da água potável esteja relacionada aos fatores: origem da fonte de abastecimento (superficial ou subterrâneo); variabilidade dos resultados das concentrações ao longo de um ano; dimensão da população atendida; atividade radioativa mensurada nas amostras; qualidade e quantidade de registros históricos de monitoramento para aquela localidade. Após as primeiras análises, quando as concentrações das águas estiverem estáveis e abaixo dos limites de triagem, a frequência de monitoramento é reordenada para ocorrer a cada dois a cinco anos. Caso contrário, deve-se manter a rotina de amostragem. E a periodicidade do monitoramento deverá aumentada em áreas de risco de contaminação radioativa ou para regiões elevação crescente da

³ Os principais tipos de depósitos de urânio são aqueles associados a arenitos cenozoicos e mesozoicos; veios de quartzo e pegmatitos (sulfetados ou não) de idade paleozoica a arqueano/proterozóica; discordâncias proterozóico / arqueanas e conglomerados proterozóico/ arqueanos (LACERDA FILHO et al., 1999).

radioatividade nas águas.

A pesquisa realizou as análises da radioatividade natural em águas de abastecimento público de 376 amostras, oriundas de 84 captações, distribuídas em 62 municípios pelas cinco mesorregiões de Goiás, no período de 2011 a 2017 (Figura 13). A escolha das localidades foi estabelecida pela SANEAGO, baseando-se nas maiores densidades urbanas. Foi determinada que a caracterização radiológica fosse realizada nas fontes de água a cada seis meses com relatórios comparativos anuais, para determinar a variação sazonal (coletas a cada grande estação, seca e chuva, por exemplo).

Figura 13. Distribuição dos municípios goianos por mesorregião para a análise das atividades alfa total e beta total em água.



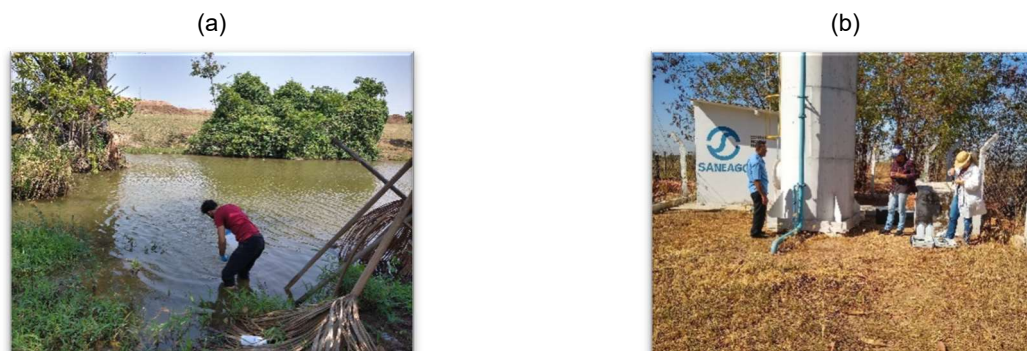
Fonte: os autores

Foram realizadas oito séries de trabalho, com coletas distribuídas durante o ano. O quantitativo de amostras investigadas por série, entre 44 e 49, foi conforme a capacidade analítica de processamento do laboratório.

A coleta e conservação das amostras de água foram executadas conforme as recomendações do Standard Methods (APHA, 2005). As amostras foram coletadas na saída de poços tubulares profundo, quando a captação era subterrânea, ou na entrada das estações de tratamento de água, quando a captação era superficial (rios, córregos, lagos, represas)

(Figura 14), sempre antes de qualquer procedimento de tratamento (água bruta). Em seguida, foram acidificadas (com HCl ou HNO₃) até pH > 2,0, e remetidas, sob refrigeração, para análise no Laboratório de Radioproteção Ambiental (LPRA) do Centro Regional do Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO/CNEN), em Abadia de Goiás.

Figura 14. Locais de coleta de amostras, manancial superficial (a) e na saída do poço tubular profundo, manancial subterrâneo (b)



Nota: Estações de coleta no município de Abadia de Goiás (2019). Fonte: os autores

3.2.3. Procedimento experimental

O desenvolvimento desta pesquisa envolveu medidas de controle de qualidade, implantação de metodologia apropriada para análise alfa e beta, além dos ensaios estatísticos capazes de corroborar a confiabilidade e consequências dos dados levantados.

3.2.3.1. Garantia da qualidade do procedimento analítico

Para garantir a confiabilidade e exatidão dos resultados dos ensaios realizados para este estudo, foram adotadas as orientações da Norma ISO/IEC 17025 (ISO, 2005). O laboratório do CRCN-CO responsável pelas análises participou do Programa Nacional de Intercomparação (PNI), promovido pelo Instituto de Radiometria e Dosimetria (IRD) (BASTOS et al., 2017; TAUHATA et al., 2006).

Trimestralmente foram distribuídas amostras ambientais simuladas e contaminadas com quantidades conhecidas de radionuclídeos para laboratórios participantes. As amostras eram analisadas e os resultados, remetidos ao IRD para avaliação do desempenho analítico.

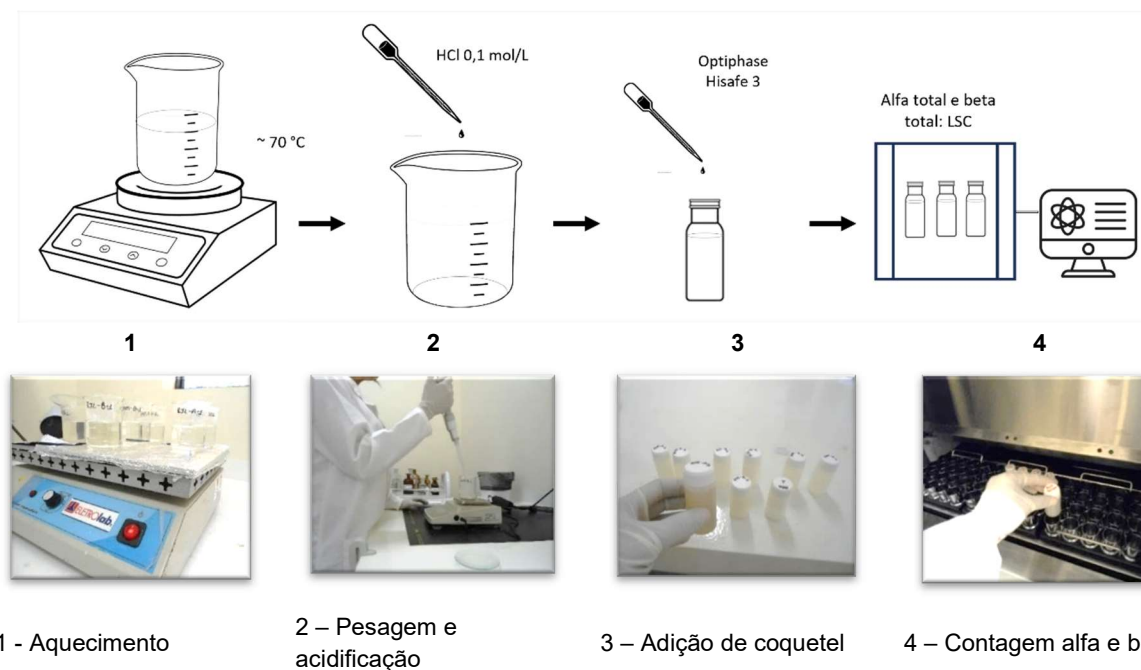
3.2.3.2. Análise alfa total e beta total em água

A metodologia deste estudo foi adaptada a partir das Normas da ISO 11704:2010 (ISO, 2010) com ênfase para Espectrometria de Cintilação em Meio Líquido (LSC – Liquid

Scintillation Counting) (MINGOTE E COSTA, 2016). O LSC é uma técnica recomendada para análise de alfa total e de beta total de amostras de água potável com teor de sólidos totais dissolvidos inferior 5 g.L^{-1} e sem interferentes de cor. A análise de STD não foi realizada, entretanto, foi considerado que as amostras de água atendiam a esse limite da técnica.

O procedimento proposto (Figura 15) estabeleceu que uma alíquota de 100 g da amostra foi concentrada lentamente em chapa de aquecimento até secura completa. Reconstituiu-se o resíduo no béquer com lavagens graduais de ácido clorídrico diluído, transferindo a solução para frascos analíticos de polietileno. Adicionou-se uma alíquota do coquetel de cintilação Optiphase Hisafe 3 - PerkinElmer, um reagente específico para análises LSC. Após agitação, a amostra foi reservada ao abrigo da luz por 24 horas e encaminhada para análise no equipamento.

Figura 15. Diagrama do procedimento adotado para determinação de análise alfa total e beta total em amostras de água por LSC, seguido da preparação em laboratório



Fonte: os autores.

O dispositivo disponível foi o espectrômetro Quantulus 1220 - PerkinElmer, recomendado para análises sob baixos níveis de radioatividade ambiental (background alfa= $0,44 \text{ Bq}$; beta= $1,60 \text{ Bq}$), calibrado com soluções-padrão de Am-241 (alfa) e Sr-90/Y-90 (beta) a 10 Bq.L^{-1} . Os frascos de polietileno contendo as amostras foram posicionados nas bandejas do equipamento para a contagem em protocolo de 270 minutos (três ciclos de repetições de 30 minutos cada).

Para cálculo das atividades das amostras foram consideradas as janelas no espectro

de contagem alfa (400–900 canais) e beta (400-1000 canais). O limite de detecção da técnica foi obtido conforme as condições ambientais para cada série, com nível de confiança de 95%. As incertezas foram consideradas a partir das eficiências alfa e beta, do volume da amostra e nas incertezas de contagem do equipamento e a eficiência para alfa foi de 99,9 % e beta de 70%. Após término das contagens foi realizado tratamento dos dados, para obtenção dos resultados de contagens por segundo (CPS) para Becquerel por litro (Bq.L^{-1}), com aplicação das incertezas.

As amostras com valores de atividade radioativa acima do limite da Portaria do Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021 (MS:BRASIL, 2021) foram reanalisadas para confirmação dos resultados. Caso o valor da reanálise permanecesse acima da triagem, uma amostra da mesma captação era solicitada para SANEAGO. Após esses procedimentos e com pelo menos três repetições, o resultado poderia ser confirmado como acima da triagem recomendada.

3.3.2.3. Estudo estatístico conforme a região da coleta

A detecção da radioatividade em águas tem valor fundamental para assegurar a potabilidade radiológica de tal recurso e a classificação conforme a região das coletas pode indicar se houve variação de comportamento nas medições de cada grupo amostrado. Foi realizada uma análise estatística com a finalidade de comparar os grupos independentes (mesorregião) em uma variável contínua (atividade alfa ou beta).

O tratamento estatístico dos dados foi executado através do software *Jamovi*, versão 2.4.8 e pelo suplemento *Real Statistics* para Microsoft Excel. Os resultados foram agrupados em tabelas e gráficos, com o objetivo de apresentar o comportamento da dispersão, simetria e outliers (valores atípicos) de cada mesorregião pesquisada (JAMOVI, 2023).

Estabeleceu-se como questão de pesquisa: “Existe diferença entre a atividade de alfa total e beta total para água potável entre as mesorregiões de Goiás?”. Essa é uma hipótese não-direcional, pois não busca a comparação qualitativa (maior ou menor) da radioatividade em águas entre as mesorregiões (FREIRE, 2021). Assim, as hipóteses H_1 e H_0 testadas foram:

H_1 = Há diferença dos dados alfa/beta total entre as mesorregiões; são dados divergentes e diferem-se em ao menos um dos grupos.

H_0 = Não há diferença dos dados alfa/beta total entre as mesorregiões; ou seja, são dados convergentes.

Para determinar qual teste estatístico seria adequado para essa análise e garantir que as suposições subjacentes fossem atendidas, foi necessário calcular a normalidade dos

dados e a homogeneidade das variâncias. Um teste de normalidade foi aplicado para verificar se os dados amostrais eram normalmente distribuídos, isto é, que a distribuição de probabilidade associada para as mesorregiões seria ou não aproximada pela distribuição normal. Devido ao seu poder de resolução e por ser preferencialmente indicado para esse tipo de avaliação, o Teste de Shapiro-Wilk⁴ (W) foi utilizado (ZAR, 2010; SOUSA DA SILVA, 2013; CAPP e NIENOV, 2020).

Em seguida foi aplicado o Teste de Levene⁵ para averiguar a homogeneidade das variâncias, devido à robustez analítica quanto à não-normalidade (ALMEIDA et al., 2006; LIMA et al., 2014).

Em grupos com dados aleatórios, como os mensurados por este trabalho, um teste não-paramétrico compara as medianas, por ser uma medida autêntica da tendência central e não sofrer influências de valores extremos, o oposto do que ocorre às médias (FREIRE, 2021). Após as considerações de determinação do teste estatístico, o teste ANOVA a um fator, denominado de Kruskal-Wallis (χ^2), foi ensaio não-paramétrico adequado para esta análise, pois sua premissa consiste em comparar a distribuição de três ou mais grupos de amostras independentes (CAPP e NIENOV, 2020).

Para determinar quais as mesorregiões apresentaram diferença significativa entre si no parâmetro alfa total em água, empregou-se o Teste de Dunn (1964) de comparação por pares. Sua metodologia consiste em examinar os grupos aos pares, utilizando para isso a *média dos postos*⁶, como medida de controle da taxa de erro devido aos contrastes e dados repetidos (CAPP e NIENOV, 2020; ZAR, 2010). O nível de confiança padrão (5%) foi corrigido pela metodologia do teste ($\alpha = 0,005$), para controlar a probabilidade de o teste resultar um “falso positivo”.

3.2.3.4. Estudo estatístico conforme o tipo de captação de água

O sistema de abastecimento de água gerido pelo Estado de Goiás apresenta sistemas de captação, através de poços ou mananciais da superfície (rios, represas, ribeirões, córregos, lagos e nascentes) (SANEAGO, 2023). A caracterização da radioatividade natural da água no intervalo de tempo entre 2011 e 2017, foi categorizada conforme a origem das captações, com a finalidade de comparar seus atributos radiológicos intrínsecos. Essa

⁴ O Teste Shapiro-Wilk (1965) consiste em uma estatística (W) calculada sobre os valores amostrais ordenados elevados ao quadrado, buscando aferir se uma amostra aleatória é originária de uma distribuição Normal.

⁵ O Teste de Levene (1960) baseia-se em uma estatística (F) obtida a partir da análise de variância com um fator, onde os níveis testados são as populações e cada observação é substituída pelo desvio absoluto da variável em relação à média do grupo (ALMEIDA et al., 2006).

⁶ Posto médio é classificação em postos para todas as observações dentro de cada amostra (ZAR, 2010).

avaliação foi providenciada através de análise estatística para dois grupos independentes (captação superficial e subterrânea).

O tratamento estatístico dos dados foi executado através do software Jamovi, com resultados agrupados em tabelas e gráficos (JAMOVI, 2023). Estabeleceu-se como questão de pesquisa: “Existe diferença entre a atividade de alfa total e beta total para as águas de captação subterrânea e captação superficial?”. Essa é uma questão bidirecional, pois instruiu para uma comparação qualitativa entre duas variáveis (FREIRE, 2021). Assim, as hipóteses H_1 e H_0 testadas foram:

H_1 = A radioatividade das águas de captação subterrânea é maior que a das águas de captação superficial.

H_0 = A radioatividade das águas de captação subterrânea não é maior que a das águas de captação subterrânea.

A mediana dos produtos obtidos foi a principal variável analisada por se tratar de uma análise não-paramétrica, que requer uma variável não influenciada por contrastes (extremos).

O teste de normalidade Shapiro-Wilk foi aplicado às variáveis desta análise para comprovar se o grupo amostral era independente ou dependente, com distribuição normal ou não-normal (NAGHETTINI e PINTO; 2007). Em seguida, foi aplicado o ensaio estatístico Teste U de Mann-Whitney (1947), com premissa de comparação das variáveis de duas amostras independentes e de distribuição semelhante (ZAR, 2010; SOUSA DA SILVA, 2013; CAPP e NIENOV, 2020).

3.3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das 376 análises estão dispostos no Apêndice 4, divididos por ano de análise (temporal), forma de captação e mesorregião do estado de Goiás, e descritos nos itens seguintes. A confiabilidade dos resultados foi validada pela avaliação interlaboratorial (Apêndice 5), evidenciando que o LPRA apresentou desvio de -1,12 a 0,49 para alfa e de -2,08 a 1,56 para beta, estando contidos no desvio normalizado de $\pm 3,0$, sugerindo assim desempenho aceitável para os ensaios radiológicos de águas ora realizados (TAUHATA, 2006).

Os resultados para alfa total variaram entre 10 mBq.L⁻¹ a 2420 mBq.L⁻¹, com mediana de 10 mBq.L⁻¹. Enquanto os resultados para beta total variaram entre 40 mBq.L⁻¹ a 4200 mBq.L⁻¹, com mediana de 70 mBq.L⁻¹. Considerando os valores de triagem estabelecidos pelo Ministério da Saúde GM/MS Nº 888/2021, de 500 mBq.L⁻¹ e 1000 mBq.L⁻¹ para alfa total e beta total respectivamente, constatou-se que 97,87% das amostras de água estavam em

conformidade para o parâmetro alfa e 98,94% para o parâmetro beta.

3.3.1. Análise dos resultados conforme o intervalo temporal

Os valores das atividades alfa total e beta total foram ordenadas pela data das análises e as médias por série (Tabela 4). A dispersão dos resultados das concentrações para alfa e beta foi representada na Figura 16. Devido aos contrastes dos resultados (elevado desvio padrão), os resultados deste estudo foram também apresentados através das suas medianas, pois serão mais precisas para representar a tendência central dos valores obtidos (FREIRE, 2021).

Tabela 4. Radioatividade natural em água de abastecimento público em municípios de Goiás

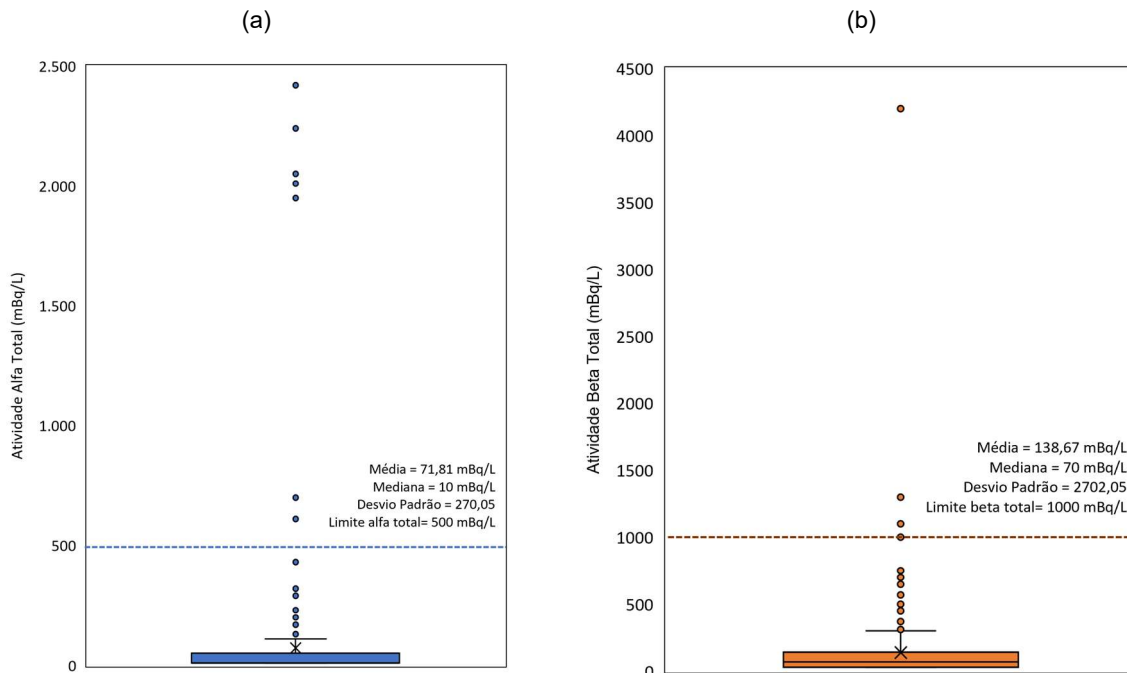
Série	N	Média α [mBq.L ⁻¹]	Máx. α [mBq.L ⁻¹]	Desvio Padrão α	N α > triagem	Média β [mBq.L ⁻¹]	Máx. β [mBq.L ⁻¹]	Desvio Padrão β	N β > triagem
2011	44	90,0	700	108	1	138,6	600	129	0
2014	48	32,9	300	51	0	76,7	510	100	0
2015-A	49	99,4	2050	298	1	376,7	4200	635	4
2015-B	47	73,6	2420	350	1	154,7	770	177	0
2016-A	48	70,4	1950	282	1	84,2	610	111	0
2016-B	48	73,5	2240	326	1	109,0	650	130	0
2017-A	44	61,1	2010	301	1	65,9	410	82	0
2017-B	48	73,5	1950	293	2	92,9	570	115	0
Soma	376				8				4
Média		71,81				138,67			
Mediana		10				70			
Desv. Pad.		270,05				272,05			

Nota: N α = resultados alfa; N β = resultados beta; triagem α : > 500 mBq.L⁻¹; β : > 1000 mBq.L⁻¹; (MS:BRASIL, 2021). Fonte: os autores.

Desses resultados, foram obtidos oito valores de alfa total (Figura 16), sendo duas de 1950 mBq.L⁻¹ sobrepostas, e quatro valores de beta total, acima do limite de 500 mBq.L⁻¹ e 1000 mBq.L⁻¹, respectivamente (MS:BRASIL, 2021). No entanto, uma amostra apresentou os dois elementos acima do limite, totalizando dessa forma, 2,93% do total de amostras analisadas acima do limite. Nesse contexto, foi sugerido à companhia de abastecimento de água, como estratégia de otimização do serviço prestado, o acompanhamento ambiental contínuo nas captações com amostras fora dos limites, além da determinação de radionuclídeos específicos, para assim esclarecer as causas da radioatividade.

Do levantamento dos estudos de desenvolvimento econômico de Goiás (CODEVASF, 2021; IMB, 2022), sobretudo dos setores energético, mineral, de irrigação, agropecuário e florestal, não houve uma relação de causalidade com os resultados obtidos dos municípios que excederam os limites de segurança para alfa total e beta total em água, pois não foi registrada qualquer atividade de dispersão material radioativo na região, além do acidente do Cs-137 em Goiânia em 1987, remediado ambientalmente (AIEA, 1988).

Figura 16. Boxplot da radioatividade natural em água de abastecimento público para municípios de Goiás em termos de alfa total (a) e beta total (b)



Fonte: os autores.

Exceder o limite de triagem não significa que a água esteja imprópria para consumo, ou obrigatoriamente categorizada como radioativa. O fator de contribuição da radioatividade ao organismo humano oriunda da água é vinte vezes inferior à de outras fontes de radiação, como por exemplo, de origem hospitalar, da mineração de urânio ou pelo uso de fertilizantes fosfatados. Assim, não será necessário inutilizar a captação de água para os casos extraordinários, nem causar comoção social pelo alarde de risco. Antes de decidir pela interdição das fontes de água, recomenda-se a implantação do monitoramento ambiental contínuo dos mananciais, com a implantação de protocolos de tratamento de água específicos para as substâncias radioativas detectadas (OMS, 2018 e 2022).

A faixa de concentração da alfa total e beta total em água potável deste estudo foi similar aos monitoramentos recentes na Tabela 5, mensurados por média ou intervalo de máximos e mínimos. Destacam-se as pesquisas publicadas no Brasil (SILVA FILHO et al., 2013), Estados Unidos (KITTO et al., 2017), Portugal (CARLOS et al., 2017), Irã (RANJBAR et al., 2022), Itália (LA VERDE et al., 2021), Iraque (FLEIFIL et al., 2021), Tunísia (LABIDI et al., 2018), Arábia Saudita (ALHARBI et al., 2018), Gana (DARKO et al., 2015), Bulgária (KAMENOVA-TOTZEVA et al., 2014), Albânia (CFARKU et al., 2014) e Turquia (SOGUT et al., 2022).

Porém, a concentração radioativa natural para água potável é relativamente menor quando comparada a outros países, como nas medidas realizadas no Líbano (MOURAD et

al., 2021), Nigéria (ESI OGHENEVOVWERO et al., 2021), China (SANG et al., 2021), Jordânia (ABU-KHADER et al., 2022), Romênia (BEGY et al., 2022) e México (VÁSQUEZ-CONTRERAS et al., 2022).

A distinção de resultados nos países citados e em circunstâncias naturais pode sugerir a importância de se promover a caracterização geoquímica e radiológica das fontes de captação de água potável, conforme a demanda hídrica, para consolidar o comportamento radiológico e por conseguinte, verificar a necessidade de adoção de programas para garantir a qualidade da água nos parâmetros recomendados pelas organizações oficiais (OMS, 2022).

Tabela 5. Radioatividade natural em água potável pelo mundo

País	Localidade	N	Atividade (mBq.L ⁻¹) média ou faixa		Referências
			Alfa Total	Beta Total	
Jordânia	Qa Disi	ND	1920 — 6190	250 — 750	Abu-Khader et al. (2022)
Turquia	Hatay	20	1 — 20	15 — 715	Sogut et al. (2022)
	Irã	30	48 — 76	29 — 49	Ranjbar et al. (2022)
Romênia	ND	64	21 — 7530	40 — 5520	Begy et al. (2022)
México	Veracruz	195	52 — 950	34 — 1480	Vásquez-Contreras et al. (2022)
Libano	Sul	42	374,6	418	Mourad et al. (2021)
Itália	Campania	207	40	300	La Verde et al. (2021)
Nigéria	Delta State	60	20 — 1370	410 — 7320	Esi Oghenevovvero et al. (2021)
China	ND	ND	0,498 — 490	5 — 1260	Sang et al. (2021)
Iraque	Misan	33	77	287	Fleifil et al. (2021)
Vietnã	Norte	226	24 — 748	27 — 632	Ho et al. (2020)
Tunísia	ND	6	48 — 94	45 — 430	Labidi et al. (2018)
Arábia Saudita	ND	ND	5,84 — 123,96	162 — 1966,88	Alharbi et al. (2018)
Portugal	ND	ND	645 — 1480	96 — 1320	Carlos, PMS (2017)
Gana	Kumasi	ND	15,7 — 142,7	89,3 — 400	Darko et al. (2015)
Bulgária	ND	994	177	30 — 980	Kamenova-Totzeva et al. (2014)
Albânia	ND	ND	39	220	Cfarku et al. (2014)
Estados Unidos	Saratoga	ND	4 — 310	110 — 1890	Kitto et al (2005)
Brasil	Goiás	96	10 — 700	40 — 600	Mingote e Costa (2016)
	Recife	9	35 — 85	200 — 330	Silva Filho et al. (2013)
	ND	78	8,9	0,26	Bonotto et al. (2008)
	Goiás	376	10 — 2420	30 — 4200	Este estudo
OMS			500	1000	OMS (2022)

Nota: ND = Não disponível. Fonte: os autores.

3.3.2. Análise dos resultados conforme região da coleta

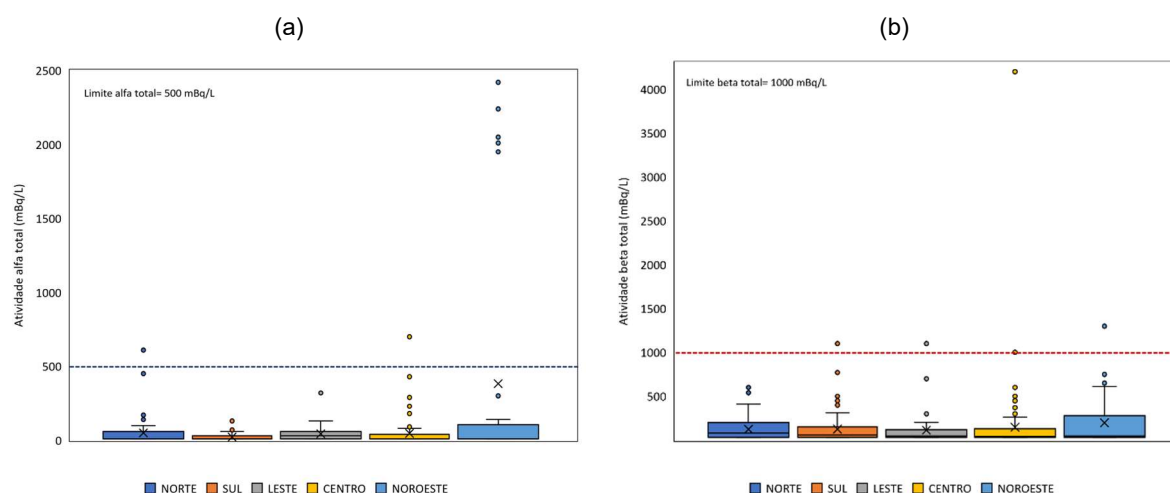
A partir da estatística descritiva dos dados coletados de cada mesorregião (Tabela 6), e do boxplot (Figura 17) observou-se que os resultados obtidos por mesorregiões apresentam elevado desvio padrão, sugerindo alto grau de dispersão das amostras.

Constatou-se a semelhança entre das medianas para a maioria dos grupos, tanto para alfa como para beta, exceto por alguns contrastes. Por isso, estabeleceu-se que para as mesorregiões, a mediana poderia representar melhor o valor típico da radioatividade em águas, em comparação com a média aritmética, pois a primeira indicou a mesma tendência dos resultados para a maioria das mesorregiões e não foi distorcida pelos extremos (FREIRE, 2021).

Tabela 6. Radioatividade alfa e beta total em água de abastecimento público por mesorregiões de Goiás

Mesorregião de Goiás	N	Atividade	Média	Máximo	Mediana	Desvio Padrão
					(1º quartil – 3º quartil)	
[mBq.L ⁻¹]						
Norte	64	A	49,53	610	10 (10 – 60)	95,34
		B	125,63	600	80 (30 – 200)	128,99
Sul	106	A	21,60	130	10 (10 – 30)	20,69
		B	126,32	1100	60 (30 – 150)	163,23
Leste	47	A	43,40	320	30 (10 – 60)	51,67
		B	113,40	1100	50 (30 – 115)	184,04
Centro	123	A	46,67	700	10 (10 – 35)	95,55
		B	148,46	4200	40 (30 – 130)	398,72
Nordeste	36	A	382,22	2420	10 (10 – 95)	785,77
		B	197,78	1300	50 (30 – 232,5)	280,83

Nota: A= Alfa Total; B = Beta Total. Quartis: 1º - 25%; 3º - 75%. Fonte: os autores.

Figura 17. Gráficos descritivos da radioatividade natural em água de abastecimento público nas mesorregiões de Goiás, em termos de alfa total (a) e beta total (b).

Fonte: os autores

Os valores do teste de Shapiro-Wilk para alfa e beta, e seus respectivos p-value⁷ (Tabela 7) permitiram verificar que os dados de todas as mesorregiões não provêm uma distribuição Normal ($p\text{-value} \leq \alpha_w$), ao nível de significância de 5%. Os resultados do Teste de Levene (homogeneidade das variâncias), através dos valores de F para alfa e beta, e seus respectivos p-value (Tabela 7) demonstraram que existe significância estatística na diferença entre as variâncias alfa das mesorregiões, ou seja, não são homogêneas ($p_F \leq \alpha_F$), sendo que beta

⁷ Define-se *p-value* como a probabilidade, sob a hipótese nula, de se obter um valor igual ou maior que o calculado para a estatística do teste ou de se obter um valor igual ou menor do que o calculado para a estatística do teste a partir da amostra (UERJ, 2023)

total, constatou-se a homogeneidade das variâncias ($p_F > \alpha_F$).

Tabela 7. Testes estatísticos para determinação da radioatividade alfa total e beta total em águas das mesorregiões de Goiás.

Teste Estatístico	Índices	Alfa	Beta
Shapiro-Wilk $\alpha_w = 0,05$	W p_w	0,40 < 0,001	0,40 < 0,001
Levene $\alpha_F = 0,05$; GL = 4	F p_F	79,24 < 0,001	1,84 0,120
Kruskall-Wallis $\alpha_k = 0,05$	χ^2 p_k	14,39 0,006	2,70 0,610

Nota: GL= Grau de liberdade; Fonte: os autores.

Como as hipóteses de normalidade e homogeneidade não foram atendidas para todas as categorias, definiu-se que este conjunto amostral como *independente com mais de dois grupos*. Nesse caso, foi realizado um teste não-paramétrico, pois os métodos não pressupõem uma distribuição específica dos dados e são baseados em propriedades mais gerais dos dados, como a ordem ou distribuição de frequência.

Na aplicação do teste ANOVA de Kruskal-Wallis (Tabela 9), observou-se que existe diferença significativa na radioatividade alfa total das águas de algumas das mesorregiões [$p_w = 0,006$] \leq [$\alpha_k = 0,05$], confirmando a hipótese H_1 . Em beta total, a hipótese H_0 foi aceita [$p_w = 0,610$] \leq [$\alpha_k = 0,05$]), de que não há diferença significativa para radioatividade beta, sugerindo uma convergência desses dados.

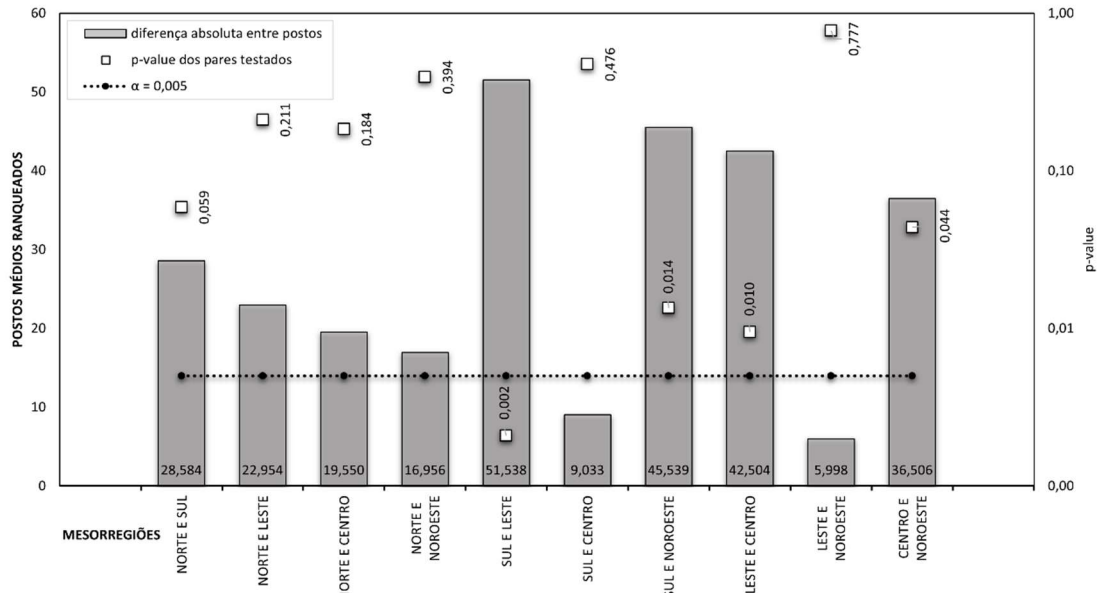
Na determinação específica da diferença de radioatividade entre as mesorregiões pelo procedimento *post hoc*⁸, através do Teste de Dunn, comprovou-se que, em alfa total, não existem diferenças significativas entre a maioria dos grupos, exceto para as mesorregiões Leste e Sul, cujo valor de p-value foi menor que o nível de significância [$p = 0,002$] \leq [$\alpha = 0,005$] (Figura 18). Observou-se que as diferenças entre as mesorregiões foram maiores quanto mais próximo o valor crítico p-value estava do nível de confiança (α). A determinação da diferença entre as mesorregiões para beta total em água não foi realizada, pois a hipótese de não significância estatística foi atendida (Teste de Kruskal Wallis) (Tabela 7).

De forma geral, quanto à região das coletas, foi evidenciado por testes estatísticos, que existe diferença significativa na radioatividade alfa total entre as mesorregiões, principalmente na comparação entre Sul e Leste. Enquanto para atividade beta total, houve similitude de resultados entre todos os grupos. Assim, apesar da dispersão dos dados, a radioatividade

⁸ Em português, "a posteriori". O objetivo de uma análise post-hoc é encontrar padrões após a conclusão do estudo, e encontrar resultados que não fossem o objetivo principal (CAPP e NIENOV, 2020).

natural das águas apresenta semelhança entre as mesorregiões de Goiás, com alguns contrastes para o parâmetro alfa total.

Figura 18. Diferença entre as mesorregiões de Goiás quanto radioatividade alfa total.



Fonte: os autores

3.3.3. Análise dos resultados para radioatividade em água acima do limite de triagem

Ao reportar as amostras que excederam a radioatividade natural nas águas (Tabela 8), foi constatado que para alfa total, os mananciais subterrâneos foram maioria (75%), enquanto para beta total não houve diferença em relação aos tipos de captação. Verificou-se que os resultados para alfa total pertencem às captações de municípios localizados nas cercanias dos jazimentos de urânio em Goiás já catalogadas (Quadro 1). O teor natural de radionuclídeos nas águas subterrâneas pode ser determinado pelo contexto geológico, particularmente pela ocorrência de determinadas rochas ígneas (granitos e pegmatitos), que geralmente contêm grandes quantidades de urânio e outros radionuclídeos (BAJAK et al, 2022).

Os resultados para beta total podem ser oriundos provavelmente de anomalias minerais de emissores beta (Pb-210 e/ou Ra-226), decaídos do urânio ou tório (IVANOVICH E HARMON,1992). Essa circunstância, porém, não define a característica radiológica dos mananciais daqueles municípios, mas serve como pressuposto para uma investigação geológica e seu envolvimento com os recursos hídricos locais. Essa circunstância, porém, não define a característica radiológica dos mananciais daqueles municípios, mas serve como pressuposto para uma investigação geológica e seu envolvimento com os recursos hídricos

locais.

Tabela 8. Relação dos pontos de captação em Goiás com radioatividade natural em água acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira.

Atividade	Município	Ocorrências	Máximos (mBq.L ⁻¹)	Mesorregião	Captação
ALFA	Goiás	6	2420	Noroeste	Subterrânea
	São Luiz do Norte	1	700	Centro	Superficial
	Uruaçu	1	610	Norte	Subterrânea
BETA	Anicuns	1	4200	Centro	Superficial
	Goiás	1	1300	Noroeste	Subterrânea
	Luziânia	1	1100	Leste	Subterrânea
	Vianópolis	1	1100	Sul	Superficial

α : > 500 mBq.L⁻¹; β : > 1000 mBq.L⁻¹; (OMS, 2018). Fonte: os autores.

Quadro 1. Ocorrências de minérios de urânio no Estado de Goiás

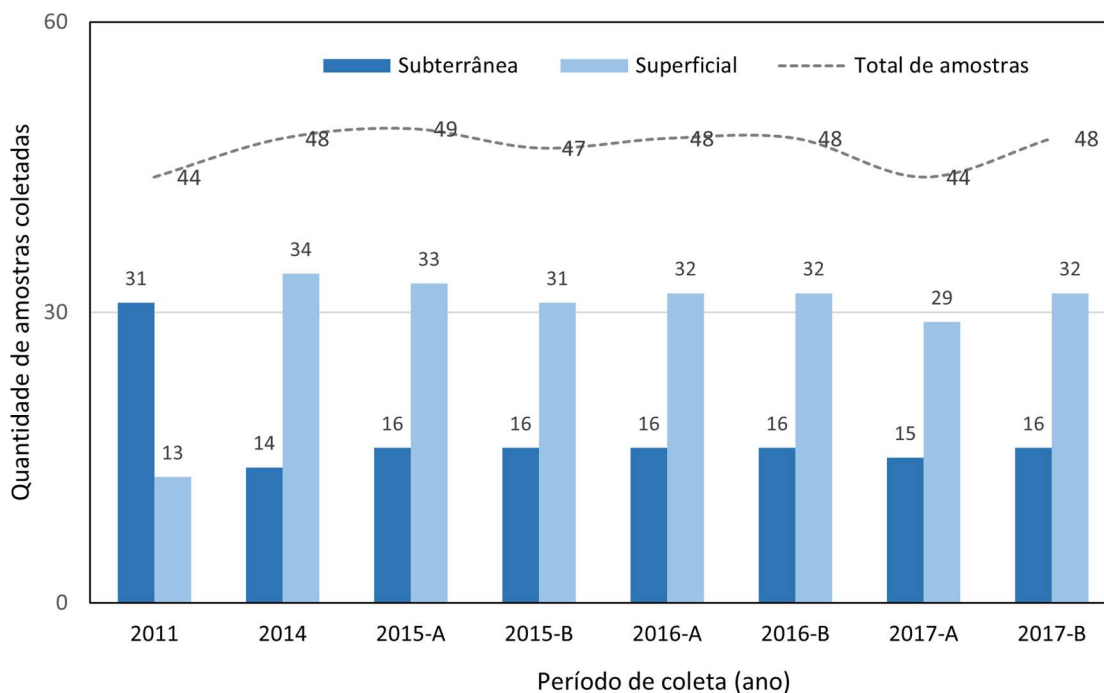
	GRUPO OU SEQUÊNCIA	TIPO DE FORMAÇÃO	REGIÃO
OCORRÊNCIAS CATALOGADAS	Cpa – Grupo Aquidauana	Intrusivos nos metassedimentos.	SUL - Em Jataí, e do limite oeste Paraúna até o limite sul de Goiás, na divisa com Estado do Mato Grosso (2).
	Neoproterozóico. Grupo Serra Dourada / Serra da Mesa	Granitos tipo Mata Azul; veios pegmatíticos e greisens.	NORTE - Nas proximidades da Serra da Mesa (1;2).
	Seqüência Metassedimentar de Ticunzal	Granitos intrusivos de idade cretácica associados a processos metassomáticos (albitos).	NORTE - Serra do Raizama, Campos Belos e Cavalcante (2).
	<i>Paleoplacer</i> do Arqueano ao Proterozóico	Seqüência Serra do Cantagalo: supracrustais do <i>Greenstone Belt</i> de Goiás. Metaconglomerados	NOROESTE - Cercanias do município de Goiás, no Morro da Lavra (2)
	Formação Ponta Grossa, Bacia do Paraná	Arenitos feldspáticos.	CENTRO - Amarinópolis e Iporá (2).
OCORRÊNCIAS EM PERSPECTIVA	Província Alcalina do Sul de Goiás e Província Magmática do Alto Paranaíba	Depósitos ortomagmáticos, com destaque a alcaligranitos, sienitos e carbonatitos	Aguardando estudos de prospecção (2).

Fonte: reunido pelos autores de (1) DANNI et al., 1983; (2) LACERDA FILHO et al., 1999;

3.3.4. Análise dos resultados conforme o tipo de captação da água

Sobre as análises de radioatividade em água e com informações da Tabela , foi elaborada uma relação entre o período de coleta e o tipo de captação, apresentados na Figura 19. Seguindo a tendência do abastecimento de água em Goiás, a maioria dos mananciais analisados foi de origem superficial (63,03%).

Figura 19. Frequência de coletas conforme tipo de captação (subterrânea ou superficial) e ano de coleta.



Nota: Sendo A e B, o primeiro e segundo semestre, respectivamente. Fonte: os autores

As informações da análise estatística dos dados coletados por tipo de captação (Tabela 9) e o boxplot (Figura 20) indicaram que os resultados da radioatividade em águas por captação apresentam elevado desvio padrão, sugerindo a dispersão estatística amostral. Também foi verificado que, para o parâmetro alfa total, a mediana é moderadamente superior em captações subterrâneas, quando comparadas às de superfície. Enquanto para beta total, a diferença entre as medianas é denotadamente grande, sugerindo que para essa análise, houve maior influência do contato da água com as rochas com radionuclídeos de emissão beta.

Tabela 9. Radioatividade das águas de abastecimento de Goiás quanto ao tipo de captação

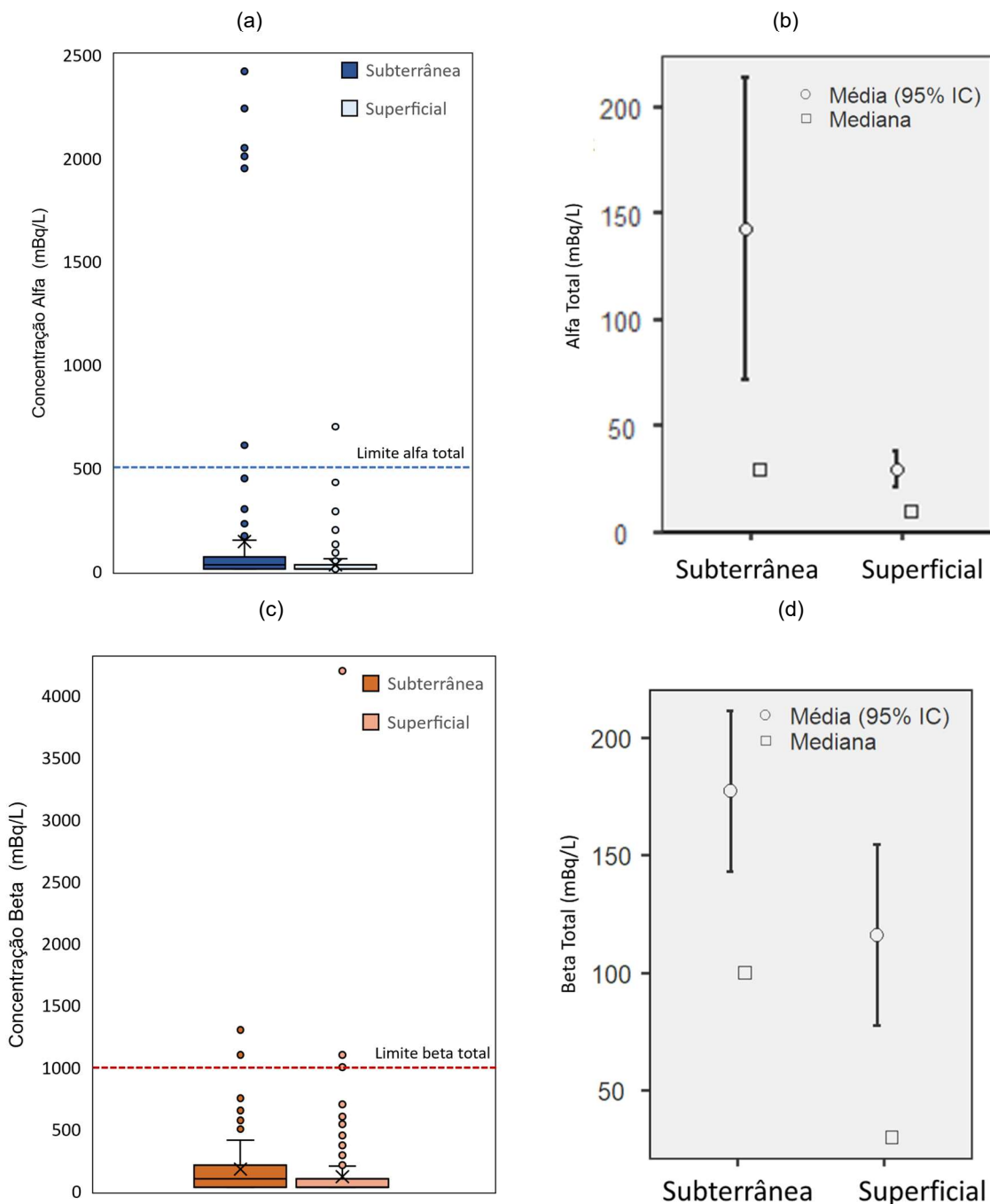
Atividade	Tipo de captação	N	Média	Desvio Padrão	Mediana (M)
					(1º quartil – 3º quartil)
[mBq.L ⁻¹]					
Alfa	Superficial	237	30,08	67,18	10 (10 – 30)
Beta			116,08	302,94	30 (30 – 100)
Alfa	Subterrânea	139	142,95	427,05	30 (10 – 70)
Beta			177,19	204,44	100 (40 – 210)

Nota: quartis: 1º - 25%; 3º - 75%. Fonte: os autores.

O teste de normalidade Shapiro-Wilk foi aplicado às variáveis desta análise e comprovou-se que o grupo amostral era independente e não-normal, com p-value < α_w. (Tabela 10). Assim, o ensaio estatístico adequado para esta essas características amostrais

foi o Teste U de Mann-Whitney. Pela análise desse teste na mesma tabela, foi comprovado que, para um intervalo de confiança de 95%, a radioatividade das águas subterrâneas é maior que das captações superficiais, $[p_U > 0,001] \leq [\alpha_U = 0,05]$, confirmando a hipótese H_1 nos parâmetros alfa e beta total.

Figura 20. Gráficos da radioatividade natural em águas de abastecimento de Goiás quanto à origem da captação, em termos de alfa total (a,b) e beta total (c,d).



Fonte: os autores

Tabela 10. Testes para análise estatística da radioatividade alfa total e beta total em águas de Goiás, em termos do tipo de captação

Teste Estatístico	Índices	Alfa	Beta
Shapiro-Wilk	W	0,296	0,377
$\alpha_w = 0,05$	p_w	< 0,001	< 0,001
Mann-Whitney	U	11171	10826
$\alpha_U = 0,05$	p_U	< 0,001	< 0,001

Fonte: os autores.

As maiores concentrações de radionuclídeos naturais podem ser encontradas em águas subterrâneas, sob aquíferos com mineralizações desses elementos radioativos. A radioatividade dessas águas é condicionada à composição da rocha adjacente e às características físicas e químicas daquela reserva. Isso porque a água subterrânea tem contato por tempo mais prolongado com as rochas, além de estar constantemente dissolvendo os minerais circundantes. De forma geral, observou-se que as águas mananciais da superfície possuem menor radioatividade natural, tanto para alfa quanto para beta, quando comparadas às águas proveniente dos poços, corroborando com as referências da literatura. (CRAWFORD-BROWN, 2011; CHAU et al, 2011; NUCCETELLI et al., 2012; BAJÁK et al., 2022).

As águas subterrâneas são uma reserva estratégica de manutenção do abastecimento público na situação de crise pela água que afeta o Brasil, principalmente em regiões com escassez de recursos hídricos (BORGES et al., 2014; SEMAD, 2015; CPRM, 2021). As condições de ocorrência e uso das águas que estão abrigadas nos principais sistemas aquíferos, são abordagens que possibilitam garantir a qualidade da água de abastecimento e promovem soluções para programas de políticas públicas de saúde. Portanto, o monitoramento radioambiental das captações subterrâneas, mostra-se como relevante recurso para mitigação de riscos à saúde pública.

Em Goiás, as atividades antrópicas registradas nos compêndios estatísticos (urbanização, atividades agrícolas, industriais e mineração, contaminações por fontes) não demonstraram influência na atividade radioativa nas águas. Por isso, é suposto que a elevada radioatividade registrada nas águas de alguns pontos, principalmente das captações subterrâneas de um município do noroeste goiano, provavelmente seja proporcionada pelo contato das águas a rochas e veios com traços de minerais radioativos, de acordo com levantamento das conformações geológicas delineadas pela literatura (LACERDA FILHO et al., 1999; DANNI et al., 1983; FIGUEIREDO e OESTERLEN, 1981).

3.4. CONCLUSÕES

O presente trabalho permitiu concluir que:

- Para a maioria dos municípios goianos pesquisados, verificou-se que as águas utilizadas para o consumo humano apresentaram resultados que atendem aos limites de segurança estabelecidos no quesito radioatividade.

- Os níveis de triagem para potabilidade radiológica ordenados pelas normas vigentes, foram excedidos na água das captações de três municípios no quesito atividade alfa total e em quatro municípios para atividade beta total, para os quais solicita-se que sejam prolongadas as ações de monitoramento radiométrico até adequação.

- Estatisticamente foi observado que as águas das captações subterrâneas das amostras apresentaram radioatividade alfa total e beta total superiores às atividades dos mananciais de superfície.

- Os valores da radioatividade natural das águas nas captações são similares entre as mesorregiões de Goiás, exceto com alguns poucos contrastes para o parâmetro alfa total.

- Não foram observados por este estudo fatores naturais ou antrópicos que pudessem influenciar na atividade radioativa das amostras de água. Entretanto, foram relatados estudos que evidenciam a presença de minerais contendo elementos radioativos nas formações geológicas de alguns municípios goianos, o que favorece a possibilidade de ocorrer contato da água subterrânea com rochas contendo traços com radionuclídeos.

- Os resultados desta pesquisa podem contribuir como instrumento de referência para a gestão de sistemas de abastecimento de água de Goiás, quanto à potabilidade radiológica.

3.5. RECOMENDAÇÕES

É recomendado que, nos pontos de captação de água onde os valores de triagem foram excedidos, sejam feitas análises para determinação de radionuclídeos específicos e suas respectivas concentrações. Com essa informação será possível discriminar a dose efetiva devida à radiação contida na água, em concordância com as normativas erigidas. E a partir desse dado, poderá ser verificada a necessidade de promover ações de atenuação da radioatividade nos sistema de abastecimento de água.

Sugere-se que o monitoramento radiológico das águas de abastecimento nos municípios goianos prossiga para consolidar as informações coletadas a outras disciplinas envolvidas no contexto ambiental. É proposto que em pesquisas provindas, o planejamento metodológico contemple um maior conjunto de amostras, com a categorização dos dados em

maior intervalo temporal, somado ao estudo comparativo das características geológicas, pedológicas e climáticas de Goiás.

3.6. AGRADECIMENTOS

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e à SANEAGO, instituições que forneceram suporte técnico e recursos humanos necessários para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, A.; MIREKHTIARY, F. Gross alpha and beta exposure assessment due to intake of drinking water in Guilan, Iran. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 314, n. 2, p. 1075-1081, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-017-5493-6>. Acesso em: junho 2023
- ABU-KHADER, M. M. *et al.* Evaluation of ultra-filtration ceramic membrane plant for the treatment of drinking water from Ram group aquifers in south Jordan. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 16, p. 100723, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100723>. Acesso em: junho 2023
- ALHARBI, T. *et al.* Natural radioactivity measurements and age-dependent dose assessment in groundwater from Al-Zulfi, Al-Qassim and Al-Majmaah regions, Saudi Arabia. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 318, n. 2, p. 935-945, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-018-6053-4>. Acesso em: junho 2023
- ALMEIDA et al. **Modificações e alternativas aos testes de Levene e de Brown e Forsythe para igualdade de variâncias e médias**. Relatório Técnico. USP, 2006. <https://repositorio.usp.br/bitstreams/1f98125f-b09e-4dc0-ab68-802f588304ac>. Acesso em: agosto de 2023.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2022. Informe Anual**. 2023. Disponível em: https://biblioteca.ana.gov.br/sophia_web/Busca/Download?codigoArquivo=160802 Acesso em: agosto de 2023
- _____. **Atlas águas: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília**. 2021. Disponível em: <https://portal1.snirh.gov.br/ana/apps/storymaps/stories/1d27ae7adb7f4baeb224d5893cc21730>. Acesso em: agosto de 2023
- APHA; AWWA; WEF - American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. **Sample collection and preservation, ch. Method 7010B**. 21 ed, 2005. p. 7-2; 7-3.
- ARRUDA, P. N., LIMA, A. S. C., & SCALIZE, P. S.. (2016). Gestão dos serviços públicos de água e esgoto operados por municípios em Goiás, GO, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 11(2), 362–376. 2016.. Disponível em: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1739>. Acesso em Fevereiro de 2024.
- BAJÁK, P. et al. Refining the conceptual model for radionuclide mobility in groundwater in the vicinity of a Hungarian granitic complex using geochemical modeling. **Applied Geochemistry**, v. 137, n. 105201, p. 105201–105201, 1 fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105201>. Acesso em: outubro de 2023
- BASTOS, T.M.R. et al. “Programa Nacional de Intercomparação aplicado a análises de radionuclídeos em água no SEAMB – CRCN-NE”. **International Nuclear Atlantic Conference**. Associação Brasileira de Energia Nuclear Belo Horizonte, 2017. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/49/020/49020749.pdf. Acesso em: setembro de 2023.
- BEGY, R. C. *et al.* Radiological investigation of natural carbonated spring waters from Eastern Carpathians, Romania. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 331, n. 3, p. 1439-1450, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-022-08195-3>. Acesso em: junho 2023
- BONOTTO, D. M.; BUENO, T. O. The natural radioactivity in Guarani aquifer groundwater, Brazil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 66, n. 10, p. 1507-1522, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.03.008>. Acesso em: junho 2023
- BORGES, P.P. et al. Exploração de águas subterrâneas por meio de poços tubulares no estado de Goiás: relações demográficas, socioeconômicas e tendências de uso. **Revista de Biotecnologia & Ciência**. Vol. 3, Nº. 1. 2014.

Disponível em: <https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/2492/2024>. Acesso em: agosto de 2023

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: Brasília, 4 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: junho 2023

CAPP, E.; NIENOV, O.H. **Bioestatística Quantitativa Aplicada**. UFRGS. 262p. 2020. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/213116>. Acesso em: agosto de 2023

CARVALHO, T.M.; FERREIRA, M.E.; BAYER, M. Análise integrada do uso da terra e geomorfologia do Bioma Cerrado: Um estudo de caso para Goiás. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 01 n. 01. 62-72. 2008. Disponível em: <https://jbb.ibict.br/bitstream/1705/1/uso%20da%20terra%20geomorfologia.pdf>. Acesso em: agosto de 2023

CFARKU, F. *et al.* A preliminary study of gross alpha/beta activity concentrations in drinking waters from Albania. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 301, n. 2, p. 435-442, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3142-x>. Acesso em: junho 2023

DINH CHAU, N. *et al.* Natural radioactivity in groundwater – a review. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, v. 47, n. 4, p. 415-437, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2011.628123>.

CNEN (a) Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição regulatória 3.01/012:2020. Níveis de investigação e de referência para radioatividade em água potável**. Mai. 2020. Disponível em: https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_12.pdf. Acesso em: junho 2023

CODEVASF. Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. **Caderno de caracterização estado de Goiás – área de gestão estratégica**. Julho, 2021. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/biblioteca-gerald-rocha/publicacoes/outras-publicacoes/caderno-de-caracterizacao-estado-de-goias.pdf/view>. Acesso em: agosto de 2023

COSTA DANTAS, R. *et al.* Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 143-157, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06962-6>.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Crise Hídrica no Brasil: O uso das águas subterrâneas como reforço no abastecimento público**. 2021. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22291/3/rel_2021_estiagem_agua_%20subterranea%20%282%29.pdf. Acesso em: agosto de 2023

CRAWFORD-BROWN, D. Sources, Risks, and Mitigation of Radioactivity in Water. In: CRAWFORD-BROWN, D. **Treatise on Water Science**. Elsevier, 2011. p. 59-67. ISBN 9780444531995. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53199-5.00051-8>. Acesso em: junho 2023

CRCN-CO. Relatório de Avaliação dos Resultados Analíticos do Programa de Monitoração Ambiental e Vigilância Pós-Operacional no Período de Controle Institucional do Repositório de Rejeitos Radioativos de Abadia de Goiás (jun2021 a jun2022). **Relatório Técnico**. 2023

DANNI, J.C.M. *et al.* **Potencialidades Uraníferas do Pré-Cambriano no Estado de Goiás**. Departamento de Geociências. Convênio FUB-CNEN. Universidade de Brasília. UNB, 1983. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/044/24044638.pdf. Acesso em: agosto de 2023.

DARKO, G. *et al.* Assessment of the activity of radionuclides and radiological impacts of consuming underground water in Kumasi, Ghana. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 1, p. 399-404, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3433-0> Acesso em: junho 2023

DE LUCA, M.E.M.; GODOY, J. M. O. Estudo da Contaminação por Césio-137 do Sistema Hidrográfico do Rio Meia Ponte, Represa do Rochedo, Goiás. Anais: **VI FESBE, 1991**, MG. 1991. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/go10anosdep/Cnen/doc/manu49.PDF>. Acesso em: setembro de 2023.

ESI OGHENEVOVWERO, E.; AGBALAGBA, E.I O.; GREGORY, O. A. Impact of produced water discharge on the gross alpha and gross beta activity concentrations and radiological health risk on drinking water sources in coastal areas of Nigeria. **International Journal of Ambient Energy**, v. 42, n. 1, p. 18-28, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1525577>. Acesso em: junho 2023

FIGUEIREDO, A.M.; OESTERLEN, P. M. Prospecção de Urânio no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**. 11(3): p.147-152, 1981. Disponível em: <http://bjg.siteoficial.ws/1981/n3/figueiredo.pdf>. Acesso em: agosto de 2023.

FLEIFIL, S. Sh; AL-SUDANI, Z. A. I.. Evaluation of Gross Alpha and Beta Activity Concentrations and Annual Effective Dose in Drinking Waters of Misan Province-Iraq Using Low Background Gas Flow Proportional Counter (LB- 4110). **NeuroQuantology**, v. 19, n. 11, p. 22-31, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14704/nq.2021.19.11.nq21172>. Acesso em: junho 2023

- FOX, J.; WEISBERG, S. **Companion to Applied Regression**. [Pacote R]. 2020. Obtido em: <https://cran.r-project.org/package=car>.
- FREIRE, S.M. **Bioestatística Básica** [livro eletrônico]. UERJ, 2021. Disponível em: <http://www.lampada.uerj.br/bioestatisticabasica>. Acesso em: agosto de 2023
- GODOY, J. M.; GODOY, M. L. Natural radioactivity in Brazilian groundwater. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 85, n. 1, p. 71-83, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.05.009>.
- HO, P. L. *et al.* Simultaneous Determination of Gross Alpha/Beta Activities in Groundwater for Ingestion Effective Dose and its Associated Public Health Risk Prevention. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61203-y>. Acesso em: junho 2023
- IAEA. International Atomic Energy Agency. The Radiological Accident in Goiania. Viena, 1988. Disponível em: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub815_web.pdf. Acesso em: setembro de 2023.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Brasil/Goias: Panorama**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama>. Acesso em: agosto de 2023
- IMB. Instituto Mauro Borges. **Atlas do Estado de Goiás 2014 – Cobertura e Uso da Terra**. Disponível em: <http://www2.sieg.go.gov.br/post/ver/188772/atlas-imb-2014>. Acesso em: agosto de 2023
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 11704 (2010)**. Water quality – Measurement of gross alpha and beta activity concentration in non-saline water – Liquid scintillation counting method. Suíça.
- _____. **ISO/IEC 17025 (2005)**. General requirements for the competence to testing and calibration laboratories. Suíça
- JAMOVI. The jamovi project (2023). jamovi. (Version 2.4) [Programa de computador]. Obtido em: <https://www.jamovi.org>.
- KAMENOVA-TOTZEVA, R. M. *et al.* Natural radioactivity content in Bulgarian drinking waters and consequent dose estimation. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 164, n. 3, p. 402-407, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/rpd/ncu290>. Acesso em: junho 2023
- KERBY, D. S. **The simple difference formula: An approach to teaching nonparametric correlation**. *Comprehensive Psychology*. 2014. Obtido em: <https://www.jamovi.org>
- KORKMAZ, M. E.; AGAR, O.; ŞAHİN, M. Gross α and β activity concentrations in various water from Karaman, Turkey. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 1, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4909-2>. Acesso em: junho 2023
- LA VERDE, G. *et al.* Measurement of Natural Radionuclides in Drinking Water and Risk Assessment in a Volcanic Region of Italy, Campania. **Water**, v. 13, n. 22, p. 3271, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w13223271>. Acesso em: junho 2023
- LABIDI, S.; GHARBI, S. Dose assessment to members of the public in Tunisia from intakes of some naturally occurring radionuclides in bottled mineral water. **International Journal of Radiation Research**, v. 16, n. 3, 2018. Disponível em: <https://ijrr.com/article-1-2285-en.html>. Acesso em: junho 2023
- LACERDA FILHO J.V.; REZENDE, A.; SILVA, A.; Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. **CPRM**. 1999. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/2418/1/Geol_Rec_Min_Go-DF.pdf. Acesso em: agosto de 2023
- LAURIA, D.C.; SILVA-JÚNIOR, M.M.; NICOLI, I.G.; *et al.* Ocorrência de radônio, de rádio e de chumbo-210 em águas subterrâneas nas cercanias de Goiânia. **Anais: 12º Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**. Cuiabá, 2004. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23564/15642>. Acesso em: setembro de 2023.
- LIMA *et al.* Implementação de testes para homocedasticidade no pacote *Expdes*. **Revista da Estatística UFOP**. Vol III(2), 2014. Disponível em: <https://periodicos.ufop.br/rest/article/view/3319/2582>. Acesso em: agosto de 2023
- LUNARDI, M.; BONOTTO, D. M. Natural radioactivity due to uranium and radon in thermal groundwaters of Central Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08784-w>. Acesso em: agosto de 2023
- MESQUITA, S.A., CARNEIRO, J.C.G. **Participação do Laboratório de Radiotoxicologia do IPEN em programas de intercomparação laboratorial**. Anais: Radio 2005. Rio de Janeiro, 2005 Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/127/43127295.pdf. Acesso em: agosto de 2023
- MINGOTE, R. M.; COSTA, H. F. DA. Avaliação do método de espectrometria por cintilação em meio líquido para a medida das atividades alfa e beta total em água: aplicação a águas de abastecimento público no estado de Goiás, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. vol. 21, 2016 p. 569-578. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/F4VqgyvWwxTqP7mt9HMyZkR/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: junho 2023

- MOURAD, S. *et al.* Occurrence and hazard assessment of natural radioactivity in drinking water in South Lebanon. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 193, n. 6, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09133-8>. Acesso em: junho 2023
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. CPRM. Cap. 07. 2007. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/454/1/livro_hidrologia_estatistica.pdf. Acesso em: agosto de 2023
- NASCIMENTO, Maria Amélia L. Geomorfologia do Estado de Goiás. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 12, n. 1, p. 1-22. 1991. Disponível em: <https://revistas.ufg.br/bgg/article/view/4371/3821>. Acesso em: agosto de 2023.
- NUCCETELLI, C.; RUSCONI, R.; FORTE, M. Radioactivity in drinking water: Regulations, monitoring results and radiation protection issues. *Annali dell'Istituto Superiore di Sanita*, v. 48, n. 4, 2012. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23247133/> Acesso em: 06 jun. 2023.
- OMS. Organização Mundial da Saúde. **Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda**. 2022. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1414381/retrieve>. Acesso em: junho 2023.
- _____. **Management of radioactivity in drinking-water**. 2018. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272995>. Acesso em: junho 2023
- R CORE TEAM. **R: A Language and environment for statistical computing**. (Version 4.1) [Programa de computador]. 2022. Obtido em: <https://cran.r-project.org>.
- RANJBAR, H. BAGHERI R. Radioactivity assessment and lifetime risk survey from bottled water in Iran. **Iranian Journal of Physics Research**, v. 22, n. 3, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.47176/ijpr.22.3.21383>.
- REAL STATISTICS RESOURCE PACK. **Real Statistics Using Excel**. [Programa de computador]. 2023. Obtido em: <https://real-statistics.com/free-download/>. Acesso em: agosto de 2023
- SANEAGO. Saneamento de Goiás S.A. **Institucional**. Disponível em: <https://www.saneago.com.br/#/institucional/historia>. Acesso em: agosto de 2023
- SANG, C. *et al.* Gross alpha and beta measurements in drinkable water from seven major geographical regions of China and the associated cancer risks. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111728, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111728>. Acesso em: junho 2023
- SEMAD. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado e Goiás: setembro 2015**. Disponível em: <https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v1/arquivos/5129>. Acesso em: agosto de 2023
- SILVA FILHO, C. A. *et al.* Radioactive risk evaluation of mineral water in the Metropolitan Region of Recife, Northeastern Brazil. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 295, n. 2, p. 1215-1220, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1993-6>. Acesso em: agosto de 2023
- SÖĞÜT, Ö. *et al.* Pollution and Health Risk Evaluations from Gross Radioactivity in Drinking Waters in Reyhanlı District, Hatay. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 233, n. 8, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05795-3>. Acesso em: junho 2023.
- SOUSA DA SILVA, A. **Comparação entre professores e profissionais de outras áreas em relação ao uso da voz – uma análise estatística**. [Monografia] UFRJ, 2013. Disponível em: http://www.im.ufrj.br/estatistica/web/wp-content/uploads/2016/04/2013_Aline.pdf. Acesso em: agosto de 2023
- TAUHATA, L. *et al.* The Brazilian national intercomparison program (PNI/IRD/ CNEN): Evaluation of 15 years of data. **Journal of Environment Radioactivity**, v. 86, p. 384-390, 2006.
- VÁSQUEZ-CONTRERAS, J. A. *et al.* Radiological Study of Water for Human Use and Consumption in Rural Areas of the Central Zone of the State of Veracruz, Mexico. **Nature Environment and Pollution Technology**, v. 21, n. 4, p. 1955-1962, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.46488/nept.2022.v21i04.050>. Acesso em: junho 2023.
- ZAR, H. **Biostatistical Analysis**. Northern Illinois University. 5 ed. 2009. Disponível em: <https://bayesmath.com/wp-content/uploads/2021/05/Jerrold-H.-Zar-Biostatistical-Analysis-5th-Edition-Prentice-Hall-2009.pdf>. Acesso em: agosto de 2023.

CAPÍTULO IV – ARTIGO 3

OCORRÊNCIA DE RADIOATIVIDADE NATURAL EM MANANCIAIS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO NO MUNICÍPIO DE GOIÁS, BRASIL

Nogueira, R.A.; Scalize, P. S.

RESUMO

A qualidade da água deve ser objeto de um rigoroso controle, devido a sua importância na saúde da população. O melhor cenário para que a água potável seja distribuída ao público com excelência, depende do monitoramento de suas características físico-químicas, biológicas e radiológicas. Substâncias dispersas na crosta terrestre podem transportar a radioatividade através dos recursos hídricos, assim como à medida que a água subterrânea se move através de fraturas do leito rochoso, os radionuclídeos naturais entram em contato com a água subterrânea, pela interação água/rocha e, conforme as características dos elementos dissolvidos, pode representar um risco para a saúde humana. Este estudo monitorou a radioatividade em água bruta destinada ao abastecimento público, proveniente das captações subterrâneas do município de Goiás, Goiás - Brasil. Os resultados indicaram a presença de radioisótopos naturais para a maioria dos poços pesquisados, com teor máximo de 0,834 Bq.L⁻¹ para U-238, e de 0,00945 Bq.L⁻¹ para Th-232. As delineações geológicas da região ou as atividades antrópicas registradas em compêndios estatísticos, não demonstraram influenciar a atividade radioativa nas águas. Após o delineamento do cenário para a área de estudo, verifica-se a necessidade de promover um monitoramento ambiental concentrada na avaliação de riscos e no tratamento da água.

Palavras-chave: água subterrânea; monitoramento ambiental; dose efetiva.

4.1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural determinante para a sobrevivência e desenvolvimento das civilizações. O fornecimento da água potável para o abastecimento público, indústria e agricultura, entre outros usos, deve cumprir requisitos estabelecidos para assegurar que suas propriedades estejam em conformidade com as normativas e não tragam risco à saúde, e sua qualidade deve ser garantida independente da forma de captação, dos mecanismos usados para tratá-la e da forma como é reservada ou distribuída (BÁRTA et al., 2021). A avaliação da qualidade da água deve considerar suas características físicas, químicas e microbiológicas e contemplar aspectos de sua composição para compreender quais efeitos os seus constituintes podem causar na saúde dos consumidores (VIANA et al., 2023; FIORAVANTI et al., 2020), podendo ser incluída a radioatividade devido a sua importância e presente em legislações ao redor do mundo (MS:BRASIL, 2021); Organização Mundial da Saúde (OMS, 2022); Estados Unidos (USEPA, 2021); União Europeia (EURATOM; 1998); Japão (MHLW, 2012).

A radioatividade nas fontes de água pode se diferenciar em cada localidade, de acordo com a dinâmica dos mananciais com as ocorrências de substâncias radioativas, distribuídas em rochas e solos (PERVIN et al., 2022). A concentração de radionuclídeos em água depende do clima, do tempo de contato com o ambiente físico e das características da litologia local. Entretanto, atividades que mobilizam inadvertidamente o material radioativo, como a extração de gás natural e petróleo, a mineração, o uso de fertilizantes na agricultura, o descarte de resíduos radioativos, testes com armas nucleares e acidentes nucleares, dentre outros, são capazes de contaminar a água, tornando-a inadequada ao uso (ADEOLA et al., 2022; MOHAMMED et al., 2022).

Nos estudos qualitativos dos radioelementos em água, aqueles de origem natural, como o potássio-40 (^{40}K) e elementos das séries de decaimento do tório-232 (^{232}Th) e do urânio-238 (^{238}U), principalmente as progênies rádio (^{226}Ra , ^{228}Ra), radônio (^{222}Rn), chumbo (^{210}Pb), são os radionuclídeos mais prováveis de serem encontrados nas águas (OMS, 2022), tendo em vista a fundamentação de evidências científicas indicando a ocorrência de que os teores de radioatividade natural proveniente de águas subterrâneas, podem ser decorrentes da incorporação dos radionuclídeos naturais ou seus descendentes que constituem os minerais associados às rochas (SALAH EL DIN et al., 2021; LA VERDE et al., 2021; ALOMARI et al. 2020;).

A incorporação destes radionuclídeos pelo organismo humano pode causar efeitos prejudiciais à saúde, devido à radiação que emitem. O consumo de água com material

radioativo por longos períodos produz exposição prolongada, e essas doses de radiação, mesmo moderadas, podem favorecer o aumento da incidência de câncer (UGBEDE et al., 2020).

É justificada a imprescindibilidade do controle radiológico da água fornecida à população, e a determinação do risco potencial para a saúde das pessoas (ADAGUNODO et al., 2023). Orientados pela Organização Mundial de Saúde e pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica, cada nação estabeleceu em suas normativas os padrões de potabilidade radioativa, adaptando conforme suas necessidades e prioridades de gestão (OMS, 2022; UNSCEAR, 2017). No Brasil, a Portaria do Ministério da Saúde nº 888, de maio de 2021 e a Posição Regulatória CNEN 3.01/012:2020, recomendam que seja feita um monitoramento preliminar, ou seja, averiguando as concentrações de alfa total e beta total em águas, e posteriormente, se necessário, que seja feita a detecção específica de elementos radioativos nela contidos e as respectivas doses efetivas⁹ (MS:BRASIL, 2021; CNEN, 2020).

O urânio natural é classificado como uma substância quimio-toxicológica e radiológica, sendo descrito como o único agente radioativo para o qual a toxicidade química é o fator de restrição nas avaliações de risco. Os efeitos desse radioisótopo na saúde têm sido investigados e demandam por estudos esclarecedores para o entendimento da dinâmica desse elemento no corpo humano (NAZIR et al., 2020). A exposição crônica a baixas doses de urânio pode estar relacionada ao desenvolvimento do câncer e, em níveis de exposição elevados, pode causar insuficiência renal aguda e morte. A ingestão desse elemento também pode resultar em lesões hepatóxicas, acumulação no tecido ósseo; e está relacionada a uma diminuição do nível de hormonas sexuais e a da fertilidade (BALARAM et al., 2022). O uso de água contendo U-238 em concentrações que excedem as recomendações de segurança deve ser verificada e corrigida, para reduzir os riscos toxicológicos e radiológicos para os consumidores humanos (BJØRKLUND et al., 2020). O limite de toxicidade para o urânio natural ($> 0,37 \text{ Bq.L}^{-1}$ ou $30 \mu\text{g.L}^{-1}$), apesar de inferior ao limite de segurança radiológico (OMS: 10 Bq.L^{-1}), é considerado prioritário nas legislações de controle radiológico em água nos Estados Unidos (USEPA, 2021) e para a OMS (2018).

No mundo, foram relatados da ocorrência de níveis elevados de U-238 em água subterrânea, de zonas áridas da África do Sul, que foi atribuída como causa de anormalidades no sangue dos residentes e aumento da incidência de leucemia (SONI, 2023). Um estudo na Suécia, onde foram examinados 301 residentes que bebiam diariamente a água de poços

⁹ A dose efetiva é um fator que determina a interação dos tipos de radiação e sua sensibilidade aos diferentes órgãos do corpo humano, comparando o impacto biológico específico conforme suas características (LAURIA et al., 2014).

perfurados em rochas ricas em urânio e mostrou que os seus níveis de urânio na urina estavam correlacionados com os níveis de urânio na água potável em comparação com os habitantes que consumiam água da estação de tratamento municipal; no entanto, não foram observados sinais nefrotóxicos conclusivos (MA et al., 2020). No Brasil, um estudo em regiões de Minas Gerais e São Paulo destacou que os teores de urânio natural detectados em águas subterrâneas (6,6 mSv/ano), não excederam os valores de referência da OMS, portanto não constituem uma ameaça para a saúde na zona estudada (BONOTTO, 2017). A constatação de tais levantamentos deve ser avaliada com cautela, quando se trata de exposição ao urânio, uma vez que as populações vulneráveis ou mal servidas são especialmente sensíveis, não sendo completamente capazes de lidar com o excesso de riscos para a saúde, por não estarem cientes da presença desse elemento tóxico na água potável.

Pelo contexto de monitoramento e análise de recursos naturais, torna-se relevante inteirar-se de determinados aspectos característicos da água de abastecimento do município de Goiás, Goiás - Brasil, patrimônio histórico e cultural da humanidade, para garantir que a saúde da população não seja comprometida por esse recurso. Desse modo, essa pesquisa foi desenvolvida com o objetivo de monitorar a radioatividade e determinar a sua dose efetiva em águas de captações subterrâneas destinadas ao abastecimento público do município de Goiás, Goiás - Brasil.

4.2. METODOLOGIA

4.2.1. Área de estudo

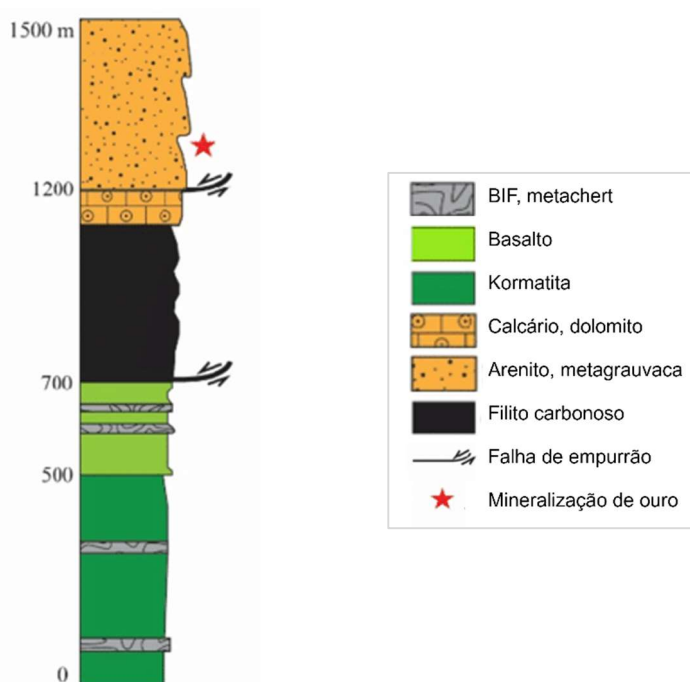
O município de Goiás está localizado na região Noroeste do estado de Goiás, com 24.071 habitantes, densidade de 7,74 habitantes/km² e área urbanizada distribuída em 7,62 km² (IBGE, 2023). Está situada em terreno irregular, a 552 metros de altitude, de clima tropical, com temperatura variando de 16 °C a 34 °C (INMET, 2023). Durante o ano, o clima é caracterizado por dois períodos distintos bem definidos: um chuvoso, entre outubro e abril, com média de 269 mm de precipitação, e outro seco, entre maio e setembro com média de 3 mm de precipitação (MUNICÍPIO DE GOIÁS, 2023).

Está entremeada pela Alta Bacia do Rio Vermelho e compõe o sistema de drenagem da Bacia do Rio Araguaia. Há um baixo potencial para recarga na bacia, uma vez que grande parte do território possui uma estrutura geomorfológica composta por relevo forte ondulado a escarpado, favorecendo o escoamento superficial em detrimento da infiltração. Situa-se próximo da escarpa da Serra Dourada, apresenta muitos desníveis e em sua geologia são encontrados quartzitos e metaconglomerados do Grupo Araxá (Figura 21), com exposição de

rochas do complexo Granito-Gnáissico próximas ao contato com Greenstone Belt (TOMAZZOLLI, 1991). Sob o contexto do uso do solo, a principal atividade empregada é a pastagem (60,77%), complementada pela agricultura, empreendimentos de turismo, piscicultura e dragagem (MUNICÍPIO DE GOIÁS, 2023).

O fornecimento de água é realizado pela SANEAGO, que utiliza manancial superficial e subterrâneo como fonte de captação. A captação superficial é feita no Ribeirão Bacalhau e no Rio Vermelho, com vazão média de 151,2 m³/h e 90 m³/h, respectivamente, responsáveis por 92% do abastecimento. A captação subterrânea é empregada nos outros 8% (Conjunto Felicíssimo, Poço Usina, Poço do Carreiro, Poço Olaria), sendo a água submetida a desinfecção simples. Em períodos de estiagem, ocorre a alternância de captação entre os mananciais (incluindo o Rio Vermelho), conforme a disponibilidade hídrica (MUNICÍPIO DE GOIÁS, 2023). A demanda de água consumida no município em 2022, foi de 89.822 m³, com 100% da população urbana atendida (IMB, 2022). Nos distritos de São João, Colônia de Uvá e Calcilândia, o abastecimento público de água é provido através de poços tubulares profundos (MUNICÍPIO DE GOIÁS, 2023).

Figura 21. Estratigrafia do município de Goiás-GO



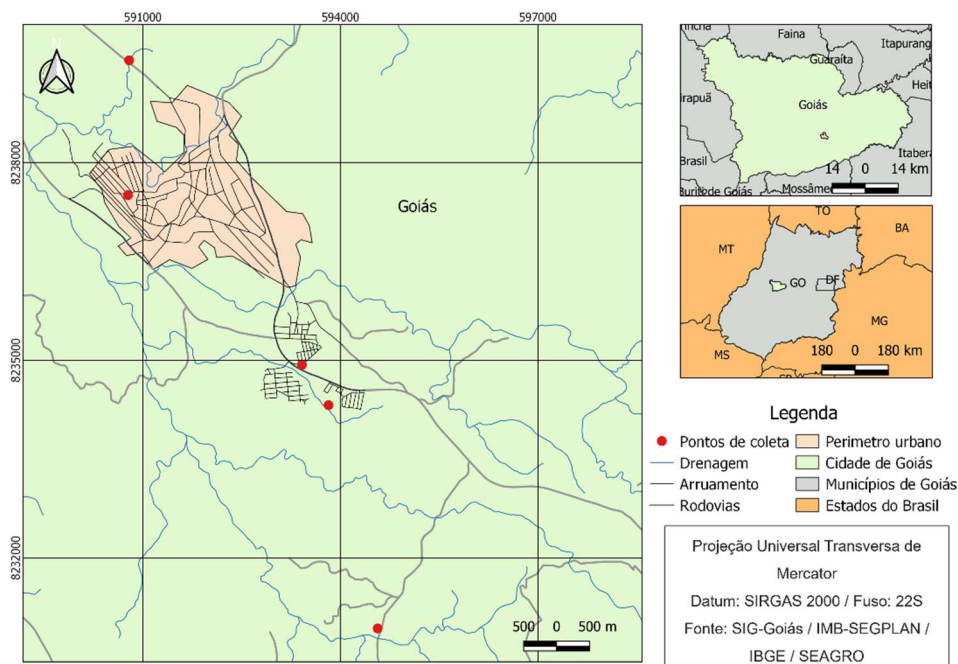
Fonte: adaptado (BOGOSSIAN, 2021).

4.2.2. Coleta e preparação das amostras

Em função da triagem ter encontrado valores somente em água subterrânea que excederam os limites, coletou-se amostras de água bruta de captações subterrâneas, na saída de poços tubulares profundos, em oito localidades do município de Goiás (Figura 22),

sendo em quatro poços de abastecimento público no perímetro urbano (GO-01, GO-02, GO-04, GO-05), três poços de abastecimento público em distritos adjacentes (GO-06, GO-07, GO-08) e um poço em propriedade particular (GO-03)(Tabela 11). As coletas foram realizadas entre fevereiro e agosto de 2020.

Figura 22. Localização dos pontos de coleta urbanos em Goiás-GO



Nota: Os poços 06, 07 e 08, localizados na zona rural, não foram sinalizados. Fonte: os autores.

A coleta e conservação das amostras de água foram executadas conforme as recomendações do Standard Methods (APHA, 2005). As amostras foram armazenadas sob refrigeração no Laboratório de Radioproteção Ambiental do Centro Regional de Ciências Nucleares do Centro-Oeste (CRCN-CO/CNEN), em Abadia de Goiás-GO.

Tabela 11. Pontos de amostragem em captação subterrânea no município de Goiás e distritos adjacentes

Ponto de captação	Protocolo	Operação	Coordenadas geográficas	
Carreiro	GO-01	SANEAGO	15°55'19.4"S	50°09'07.0"W
Olaria	GO-02	SANEAGO	15°58'04.8"S	50°07'24.5"W
Privado	GO-03	Particular	16°00'00.2"S	50°07'01.7"W
Usina	GO-04	SANEAGO	15°56'26.1"S	50°09'08.2"W
Papyrus	GO-05	SANEAGO	15°57'48.6"S	50°07'37.6"W
Calcilândia ¹	GO-06	SANEAGO	15°53'59.3"S	49°54'40.0"W
São João ¹	GO-07	SANEAGO	15°38'46.9"S	50°35'00.7"W
Colônia de Uvá ¹	GO-08	SANEAGO	15°53'52.4"S	50°26'21.7"W

Nota: (1) Coordenadas geográficas referentes à localização dos distritos. Fonte: os autores

4.2.3. Procedimento experimental

Devido ao laboratório da CNEN em Goiás não ter capacidade analítica para detectar radionuclídeos específicos, as amostras foram analisadas no Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em São Paulo-SP, que recebeu as amostras ao final do segundo semestre de 2020. Utilizou-se a técnica de Ativação Neutrônica, que consiste no bombardeamento da amostra por um feixe de nêutrons onde são formados isótopos radioativos por meio de reações nucleares. Os radionuclídeos formados decaem para um isótopo estável por meio de emissão de radiação que é medida. A amostra é bombardeada com nêutrons simultaneamente com um padrão que contenha o elemento químico de interesse. Após a irradiação, determina-se atividade dos radioisótopos formados por espectrometria gama (TAHUATA, 2014). Os limites de detecção para esta metodologia, aplicados a isótopos de urânio e tório, foram de $0,36 \mu\text{g.L}^{-1}$ e $0,012 \mu\text{g.L}^{-1}$, respectivamente.

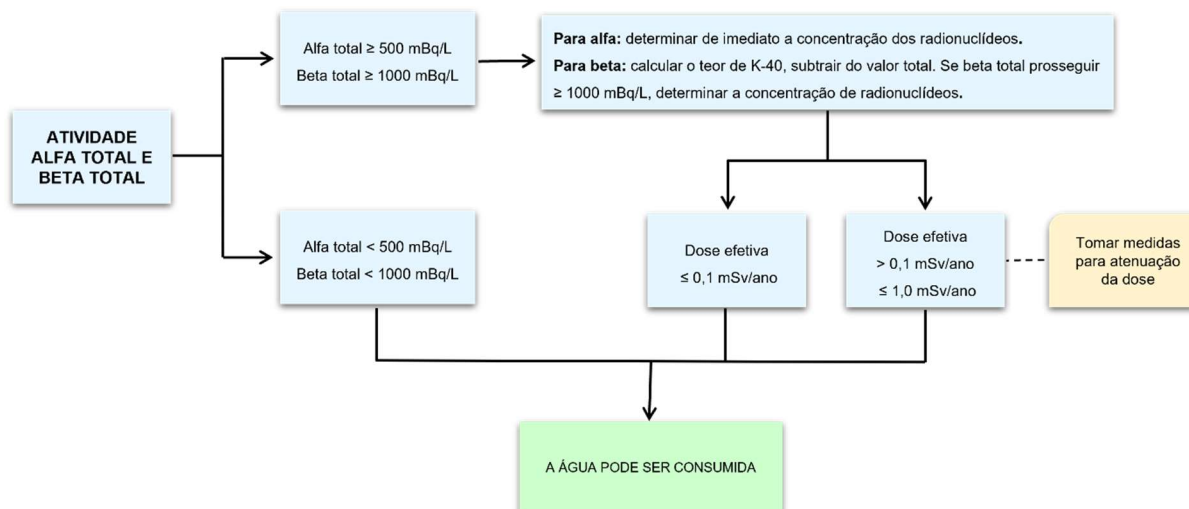
O dispositivo utilizado para a irradiação de nêutrons foi Reator de Pesquisa IEA-R1. Utilizou-se como material de referência soluções certificadas de urânio e tório, da marca SPEX CERTIPREP, de concentração $1,0 \text{ g.L}^{-1}$. Para as medidas de espectrometria gama foram empregados dois equipamentos: um detector germânio hiperpuro (HPGe) modelo GMX 25190 ORTEC com 23% de eficiência relativa e o detector semicondutor do tipo germânio hiperpuro (HPGe), marca CANBERRA, modelo GX3018, de geometria cilíndrica e eficiência relativa de 30%.

4.2.4. Determinação da dose efetiva

Quando os teores superarem os limites de triagem, deverá ser calculada a dose efetiva anual dos radioelementos dissolvidos na água, ponderando o cálculo pela quantidade de água ingerida pelo indivíduo durante um ano, o teor do elemento radioativo detectado e um fator de conversão, específico para cada elemento (COSTA DANTAS et al., 2019). Assim, a dose efetiva anual foi determinada empregando a Eq. 1 (OMS, 2022), naquelas amostras que excederam os limites de triagem, considerando $\alpha > 500 \text{ mBq.L}^{-1}$ e $\beta > 1000 \text{ mBq.L}^{-1}$ (OMS, 2022), também considerado como critério de segurança da CNEN e Ministério da Saúde (Figura 23).

$$D_e = T_i \cdot C_R \cdot F_c \text{ (Equação 1)}$$

Onde: D_e : Dose efetiva anual (mSv/ano); T_i : Taxa de ingestão anual de água do indivíduo por ano (L); C_R : Concentração do radionuclídeo determinado na água (Bq/L); F_c : Taxa de conversão específica (mSv/Bq).

Figura 23. Critério de dose para radionuclídeos em água potável

Fonte: MS:BRASIL, 2021.

Nos casos em que o valor estiver dentro da faixa 0,1 – 1,0 mSv/ano, a água ainda é considerada apropriada para consumo, estando na faixa de segurança aos seres humanos. Todavia serão requeridas ações de investigação ambiental e adoção de tratamentos para normalizar os teores da radioatividade. Se a dose superar 1,0 mSv/ano, medidas de restrição ao uso dessas águas devem ser aplicadas (OMS, 2022; CNEN, 2020; MARZAALI et al. 2021).

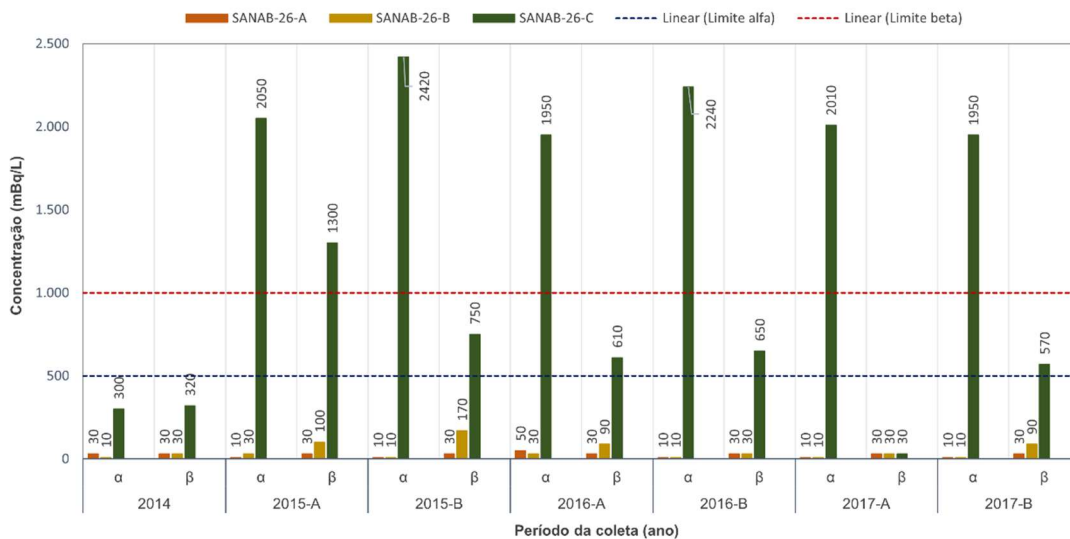
4.3. RESULTADOS

A partir de resultados de análises de monitoramento da radioatividade natural das águas de abastecimento do município de Goiás-GO, entre os anos de 2014 e 2017, pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), foi demonstrado que a triagem radiológica para as captações superficiais (rio e córrego) estavam todas em conformidade. Entretanto, na única captação subterrânea monitorada (SANAB 26-C), os valores de triagem foram excedidos para alfa total em 86% e para beta total em 14% das amostras (Figura. 24). Conforme requerido pela normativas do Ministério da Saúde e CNEN, foi recomendada a determinação de radionuclídeos específicos para qualificar a radioatividade (dose efetiva) daquela fonte de água.

4.3.1. Teor de urânio e tório no município de Goiás

Os teores de urânio e tório, nas águas subterrâneas dos pontos coletados (Tabela 2), indicaram a presença de isótopos de urânio (U-238) e tório (Th-232) na maioria das amostras de água, exceto no poço GO-03, que não apresentaram resultados detectáveis de radionuclídeos para essa análise.

Figura 24. Atividade alfa total e beta total em captações no município de Goiás-GO entre 2014 e 2017



Nota: valores da triagem α > 500 mBq.L⁻¹; β > 1000 mBq.L⁻¹ (OMS, 2018).

Tabela 12. Teores de U-238 e Th-232 encontrados em águas subterrâneas do município de Goiás, Goiás – Brasil, e seus limites de segurança

Poço	Protocolo	Data da coleta	U-238	Th-232
			[Bq.L ⁻¹]	
Carreiro	GO-001	18/02/2020	0,0032	0,0042
Olaria	GO-002	29/07/2020	0,5302	0,00945
Particular	GO-003	29/07/2020	ND	ND
Usina	GO-004	29/07/2020	0,8342	0,0008
Papyrus	GO-005	29/07/2020	0,0042	ND
Calcilândia	GO-006	18/08/2020	0,1336	0,0006
São João	GO-007	25/08/2020	0,0050	ND
Uvã	GO-008	25/08/2020	0,0104	0,0004
		Média	0,1901	0,0019
		Mediana	0,0077	0,0005
Nível máximo de contaminante		OMS (2018)	10,0000	1,0000
		OMS (2018); USEPA (2022); EURATOM (2001);	0,3700^(A)	* ^(B)

Nota: não detectado = ND; (A) toxicidade química, equivalente a 30 µg/L; (B) Os isótopos de tório não são geralmente uma preocupação crítica na água natural uma vez que a solubilidade do tório na água é muito baixa (GÓMEZ, ET AL., 2023);

Sobre os resultados para o U-238, os teores obtidos superaram o limite de segurança de toxicidade química ($\geq 0,37 \text{ Bq.L}^{-1}$), nas amostras dos poços GO-02 e GO-04, enquanto nos demais pontos, os resultados estavam em conformidade. Para o urânio natural, a faixa de resultados deste estudo está com o seu valor máximo equiparável aos estudos da Argélia (KEBIR, 2022), Hungria (JOBÁGY et al., 2010; BAJÁK et al., 2022), Bulgária (SLAVCHEV et al., 2022), Espanha (MILENA-PÉREZ et al., 2018), Polônia (WALENCIK et al., 2010) e

Sérvia (JOKSIC et al, 2007), sendo em 30% das pesquisas apresentadas, realizadas no Iraque (ABOJASSIM et al. 2022; MOHAMMED E TAWFIQ, 2022) e Jordânia (ALOMARI et al., 2020), os valores estão acima do encontrado nesse estudo, destacados na Tabela 13.

Tabela 13. Concentração de U-238 e Th-232 em água para diversos países

País	Localidade	N	Origem	Th-232 (Bq.L ⁻¹)	U-238 (Bq.L ⁻¹)	Referências
Iraque	Al-Najaf	20	2	1,9	8,3	Abojassim et al. (2022)
Argélia	Bordj-Bouarreridj	3	1; 2;	0,04	0,79	Kebir (2022)
Iraque	Bagdá	30	1	16,7	24,2	Mohammed e Tawfiq (2022)
Hungria	Lago Velence	53	1;2;	*	0,03 — 0,753	Baják et al. (2022)
Bulgária	sul	32	4	*	0,0006 — 0,678	Slavchev et al. (2022)
Jordânia	*	94	1; 2;	0,017	33	Alomari et al. (2020)
Nigéria	Ondo & Ekiti	10	2	2,25 — 35,61	*	Ayodele et al. (2020)
Malásia	Kuala Lumpur	14	1	1,1 — 1,3	*	Khandaker et al. (2019)
Espanha	Granada	37	1	*	0,04261	Milena-Pérez et al. (2018)
Nigéria	Ondo & Ekiti	16	2	0,454 — 33,152	*	Ayodele et al. (2017)
lêmen	Golfo de Aden	20	2	1,43	*	Saleh et al. (2015)
Egito	Beni Suef	50	2	0,003 — 0,019	*	Amim e. Khalil (2011)
Polônia	*	*	2		0,0005 — 0,016	Walencik et al. (2010)
Hungria	Planalto Balaton	31	2	*	0,00044 — 0,2743	Jobbágy et al. (2010)
Paquistão	Lahore	*	4	0,0069	*	Tahir e. Alaamer (2009)
Sérvia	Bálcãs	9	1;3;	0,000012	0,00022 — 0,04	Joksic et al. (2007)
Egito	Elba	15	1; 2;	0,21 — 0,97	*	Arabi et al. (2016)
Brasil	Goiás-GO	8	2	0 – 0,00945	0 – 0,8342	Este estudo
Limite				1,0	0,37	OMS, 2018

Nota: Procedência da água (1) mananciais de superfície; (2) mananciais subterrâneos; (3) água engarrafada; (4) não mencionado ou não disponível (*) Dados não disponíveis. Os valores de atividade são apresentados por média ou faixa. (1) Equivalente a 30 µg/L (toxicidade química) Fonte: os autores

Em relação aos teores de Th-232 apresentadas nesse estudo, os valores foram inferiores ao limite especificado pela EPA e OMS (< 1,0 Bq.L⁻¹), e a 83,33% dos demais estudos realizados no Iraque (ABOJASSIM et al, 2022; MOHAMMED E TAWFIQ, 2022), Argélia (KEBIR, 2022), Jordânia (ALOMARI et al., 2020), Nigéria (AYODELE et al., 2020 e 2017), Malásia (KHANDAKER et al., 2019), Egito (AMIM E KHALIL, 2011; ARABI et al., 2006;), lêmen (SALEH et al., 2015), superando apenas os resultados do Paquistão (TAHIR E. ALAAMER, 2009) e Sérvia (JOKSIC et al., 2007).

4.3.2. Dose efetiva devido à ingestão de urânio em água

Os resultados para os poços GO-02 e GO-04 (Tabela 14) demonstraram que as doses efetivas nas duas captações subterrâneas estavam acima do valor recomendado de 0,1 mSv/ano. Entretanto, considerando o critério de dose para radionuclídeos em águas (Figura

23), os valores estão na faixa de otimização, ou seja, dentro da faixa 0,1 – 1,0 mSv/ano. Isso significa que os níveis encontrados não podem ser interpretados com indicativos de que a água potável não é segura, mas que uma investigação adicional deve ser considerada, com o planejamento de ações que mantenham as doses tão baixas quanto possível (OMS, 2018).

Tabela 14. Dose efetiva anual pelo U-238 em águas de poço de abastecimento público do município de Goiás

Radionuclídeo	Protocolo	Atividade (Bq.L ⁻¹)	Dose efetiva anual (mSv/ano)
U-238	GO-02	0,530	0,174
	GO-04	0,834	0,274
Taxa de ingestão de água por ano no Brasil, por indivíduo			730 L/ano
Fator de conversão de dose U-238:			$4,5 \cdot 10^{-8}$ Sv/Bq

Fonte: os autores.

4.4. DISCUSSÃO

A principal via de exposição ao U-238 pode ocorrer através da ingestão direta de água de poços, por isso sugere-se (VENGOSH et al. 2022; BJØRKLUND et al., 2020; YADAV et al., 2014). Nas águas subterrâneas, a ocorrência de radionuclídeos depende de fatores relacionados à concentração, distribuição e solubilidade desses elementos na matriz rochosa. A característica química dessas águas contribui para a dissolução dos elementos radioativos, assim como a acidez, a salinidade, a temperatura e a oxidação das águas influenciam o transporte dos radionuclídeos.

No município de Goiás, o fornecimento de água tratada na malha urbana é consolidado, entretanto, os mananciais se encontram sob grande pressão, com risco de racionamento no auge do período de seca (CPRM, 2021; SEMAD, 2015). Em situações de estresse hídrico, que atualmente afeta inclusive a região Centro-Oeste, a água subterrânea tornou-se um importante recurso hídrico disponível para o abastecimento dessa cidade, comprovado pelo crescimento da perfuração de poços para satisfazer as demandas da população. Esse fato é ainda mais oportunizado em virtude do território municipal situar-se sob ocorrências de rochas sedimentares, favorecendo para que o volume de água nelas armazenado seja uma reserva estratégica (BORGES et al., 2014; VIEIRA et al, 2014; BONNET et al., 2008, CARVALHO et al., 2008).

Uma hipótese que justifique a presença do isótopo de urânio nas águas do município de Goiás é orientada pelos estudos sobre a ocorrência deste elemento disperso no subsolo da região (FIGUEIREDO E OESTERLEN, 1981; DANNI et al., 1983; LACERDA FILHO et al., 1999), e que através da cominuição das rochas, pode ser dissolvido na água subterrânea

(BALARAM et al., 2022; VAN THANG, et al. 2022; VENGOSH, 2022; ALOMARI et al, 2020). Entretanto, para uma confirmação concludente, é solícito que sejam elaboradas pesquisas que contemplem maior universo amostral, com caracterização das influências hidrogeológica e climática, além da complementação de outras técnicas para a determinação da radioatividade.

Para garantir o fornecimento seguro de água potável quanto à concentração radioativa, são recomendadas medidas de atenuação da radioatividade nas águas. A OMS e USEPA recomendam diversas estratégias, seja utilização de outras fontes de água potável ou a sua remoção ou redução a níveis aceitáveis (HOSSAIN, 2020; KHEDR, 2013; MUNTER, 2013; BAEZA et al., 2012), das quais interessam a essa pesquisa, aquelas que oneram custos, se adaptam às características da região e apresentam maior eficiência de remoção de radionuclídeos.

Na decisão de quais medidas de correção devem ser contempladas, as técnicas devem ser justificadas, no sentido de que os benefícios alcançados sejam maiores que os obstáculos do processo, e que seja empregada de modo proporcional ao contexto dos demais riscos, como o químico e microbiológicos (HOSSAIN, 2020; KHEDR, 2013; MUNTER, 2013; BAEZA et al., 2012; USEPA, 2023, 2007, 2006).

A estratégia que tem alcance mais rápido e simples se baseia em recorrer a uma fonte de abastecimento alternativo de água potável, com a alteração da captação de água subterrânea para uma fonte de água superficial ou a mudança para outra fonte subterrânea com baixas concentrações de radionuclídeos naturais (OMS, 2018). A interrupção do uso da fonte de água contaminada, pela busca de uma nova captação, tem a vantagem de não gerar resíduos de tratamento, não demandam mão-de-obra especializada, porém exige a disponibilidade de fontes de água nas proximidades da região que estejam com baixos teores de radioatividade em suas águas (USEPA, 2023; OMS, 2018). Outra alternativa baseia-se na diluição ou mistura controlada das fontes de água potável de baixa concentração radioativa. É uma estratégia que depende da disponibilidade de outras fontes no local e não gera resíduos radioativos durante um possível tratamento. No entanto, deve-se avaliar os custos envolvidos e a segurança durante esse processo (USEPA, 2023 e 2007).

Para uma escala de distribuição onde sejam exigidas alterações significativas e complexas da concentração radioativa da água, tecnologias especializadas devem ser incorporadas ao processo de tratamento. Determinados critérios devem ser considerados antes de escolher o tratamento mais adequado: as características da fonte da água e sua vazão média, o tamanho do sistema e a sua localização, as opções de deposição de resíduos produzidos e a capacidade técnica dos operadores. As tecnologias destes tratamentos

coadjuvantes têm a desvantagem de gerar rejeitos radioativos que demandam gerenciamento apropriado, além da elevação de custos ao tratamento convencional (USEPA, 2007 e 2023; MUNTER, 2013). Alguns processos de tratamento de água podem ser utilizados: a osmose inversa (ADEBIYI et al., 2021; AL-ABSI et al, 2019), a troca iônica (USEPA, 2023), a adsorção por alumina ativada (alúmen) (ADEBIYI et al., 2021), a coagulação e filtração (MUNTER, 2013; Baeza et al., 2008) e a adição de cal (USEPA, 2023).

O processo de coagulação e filtração costuma ser recomendado pois garante uma eficiência em cerca de 60% a 90% na remoção do urânio em água, entretanto, demanda que o município adeque suas captações subterrâneas em estações de tratamento de água adequadas, ou ainda, manejem o transporte da água dos poços até as estações existentes na cidade, onerando ainda mais o tratamento (MUNTER, 2013; BAEZA et al., 2008).

4.5. CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu concluir que:

- Nas águas de duas captações subterrâneas pesquisadas do município de Goiás se detectou a ocorrência radioisótopos naturais de U-238 acima do valor de limite de segurança para dose efetiva anual.

- Deve ser conduzida uma investigação adicional pois as doses efetivas para o radionuclídeo U-238 estão dentro da faixa 0,1 – 1,0 mSv/ano, não permitindo interpretar como indicativo de que a água potável não é segura.

- De forma geral, as águas analisadas, que são utilizadas para o consumo humano, apresentaram os resultados que atendem aos limites estabelecidos, porém requerem monitoração para atenuação da dose.

- Não foram constatados por este estudo fatores naturais ou antrópicos que pudessem influenciar na atividade radioativa das amostras de água.

- Os resultados deste estudo podem ser utilizados como instrumento de referência para projetos de gestão do sistema de abastecimento de água do município, e para que expedientes socioambientais sobre potabilidade radiológica da água sejam promovidos.

4.6. RECOMENDAÇÕES

É recomendado que o monitoramento radioambiental das águas de abastecimento no município de Goiás seja continuada, para consolidar seus dados a outras disciplinas envolvidas no contexto ambiental. Em futuras incursões científicas, sugere-se que sejam

elencadas o planejamento para um conjunto de amostras maior, a categorização dos dados por maior período, somado ao estudo comparativo das influências hidrogeológicas e climáticas (estiagem/chuvas) para aquela região.

Cabe ainda sugerir que seja realizado o delineamento do cenário radiológico para o município de Goiás, através estudo investigativo da ocorrência de elementos radioativos nos recursos naturais do município de Goiás e região. Após verifica-se a necessidade de promover um monitoramento radioambiental no município, concentrada na avaliação de riscos e no tratamento da água.

4.7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), ao IPEN e à SANEAGO, instituições que forneceram suporte técnico e recursos humanos necessários para a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ADAGUNODO, T. A. et al. Assessment and health effects of radon and its relation with some parameters in groundwater sources from shallow aquifers in granitic terrains, southeastern axis of Ibadan, Nigeria. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 21, p. 100930, maio 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2023.100930>.
- ADEBIYI, F. M. et al. Occurrence and remediation of naturally occurring radioactive materials in Nigeria: a review. *Environmental Chemistry Letters*, v. 19, n. 4, p. 3243-3262, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01237-4>.
- ADEOLA, A. O. et al. Advances in the management of radioactive wastes and radionuclide contamination in environmental compartments: a review. **Environmental Geochemistry and Health**, 2022. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01378-7>.
- AL-ABSI, E.; ALAMEER, S.; MANASRAH, R.. Critical remarks on radioactivity analysis in drinking waters: high doses and increased lifetime risks from Aqaba tap water, Jordan. **DESALINATION AND WATER TREATMENT**, v. 146, p. 107-119, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.23604>.
- ALOMARI, A. H. et al. ²³⁸U and ²³²Th isotopes in groundwater of Jordan: Geological influence, water chemistry, and health impact. **Radiation Physics and Chemistry**, v.170, p.108660, 2020. em: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2019.108660>.
- AMIN, R. M.; KHALIL, F. A.; EL FAYOUMI, M. A. K. Natural radioactivity and chemical concentrations in Egyptian groundwater. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 173, n. 1-4, p. 29-35, 2010.: <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1367-x>.
- ANNANMAKI, M., Turtiainen, T. Treatment Techniques for Removing Natural Radionuclides from Drinking Water. **TENAWA project, STUK – A169**, pp 54. 2000. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/32/018/32018426.pdf
- APHA; AWWA; WEF - American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. **Sample collection and preservation, ch. Method 7010B**. 21 ed, 2005.
- ARABI, A. M. EL; AHMED, N. K.; SALAHEL DIN, K. Natural radionuclides and dose estimation in natural water resources from Elba protective area, Egypt. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 121, n. 3, p. 284-292, 2006. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncl022>.
- AYODELE, A. E. et al. Radioactivity level of dug well water across selected cities in two states of Nigeria. *Environmental Forensics*, v. 18, n. 4, p. 331-338, 2017. <https://doi.org/10.1080/15275922.2017.1368041>.
- AYODELE, A. E.; IFE-ADEDIRAN, O. O.; AROGUNJO, A. M. Radioactivity level of drilled well water across selected cities in Ondo and Ekiti states, Southwestern Nigeria and its radiological implications. **International Journal of Radiation Research**, v. 18, n. 2, p. 351–358, 2020. <https://ijrr.com/article-1-2932-en.html>. Acesso em: 06 jun. 2023.
- BAEZA, A., SALAS, A., GUILLEN, J. Adaptation of working conditions of an operating Drinking Water Treatment Plant to remove of naturally occurring radionuclides. *Water, Air, Soil Pollut.* 223 (8), 5057–5069. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11270-012-1258-6>.
- BAEZA, A.; SALAS, A.; LEGARDA, F. Determining factors in the elimination of uranium and radium from groundwaters during a standard potabilization process. **Science of The Total Environment**, v. 406, n. 1-2, p. 24-34, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.07.050>.
- BALARAM, V.; RANI, A.; RATHORE, D. P. S. Uranium in groundwater in parts of India and world: A comprehensive review of sources, impact to the environment and human health, analytical techniques, and mitigation technologies. **Geosystems and Geoenvironment**, v. 1, n. 2, p. 100043, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100043>
- BAJÁK, P. ET AL. Refining the conceptual model for radionuclide mobility in groundwater in the vicinity of a Hungarian granitic complex using geochemical modeling. **Applied Geochemistry**, v. 137, p. 105201, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105201>.

- BÁRTA, R. L. et al. Qualidade da água para consumo humano no Brasil: revisão integrativa da literatura. **Vigilância Sanitária em Debate: Sociedade, Ciência & Tecnologia**, v. 9, n. 4, p. 74–85, 30 nov. 2021. <https://visaemdebate.incqs.fiocruz.br/index.php/visaemdebate/article/view/1822/1375>
- BJØRKLUND, G. et al. Uranium in drinking water: a public health threat. **Archives of Toxicology**, v. 94, n. 5, p. 1551–1560, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02676-8>.
- BONNET, B.R.P., FERREIRA, L.G.; LOBO, F.C. Relações entre qualidade da água e uso do solo em Goiás: uma análise à escala da bacia hidrográfica. **Revista Árvore**. Universidade Federal de Viçosa v. 32, n. 2, pp. 311-322. 2008. <https://www.redalyc.org/pdf/488/48813383014.pdf>.
- BONOTTO, D. M. The dissolved uranium concentration and ²³⁴U/²³⁸U activity ratio in groundwaters from spas of southeastern Brazil. **Journal of Environmental Radioactivity**, v. 166, n. 1, p. 142–151, jan. 2017. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X16300595>
- BORGES, P.P. et al. Exploração de águas subterrâneas por meio de poços tubulares no estado de Goiás: relações demográficas, socioeconômicas e tendências de uso. **Revista de Biotecnologia & Ciência**. Vol. 3, Nº. 1. 2014. <https://www.revista.ueg.br/index.php/biociencia/article/view/2492/2024>
- MS:BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888 de maio de 2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: Brasília, 4 maio 2021. <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>
- CARVALHO, T.M.; FERREIRA, M.E.; BAYER, M. Análise integrada do uso da terra e geomorfologia do Bioma Cerrado: Um estudo de caso para Goiás. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 01 n. 01. 62-72. 2008. <https://jbb.ibict.br/bitstream/1/705/1/uso%20da%20terra%20geomorfologia.pdf>
- CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. **Posição regulatória 3.01/012:2020. Níveis de investigação e de referência para radioatividade em água potável**. Mai. 2020. https://www.gov.br/cnen/pt-br/acesso-rapido/normas/grupo-3/grupo3-pr301_12.pdf
- COSTA DANTAS, R. et al. Natural radioactivity in Brazil: a systematic review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 1, p. 143-157, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06962-6>
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Crise Hídrica no Brasil: O uso das águas subterrâneas como reforço no abastecimento público**. 2021. https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22291/3/rel_2021_estiagem_aqua_%20subterranea%20%282%29.pdf
- DANNI, J.C.M. et al. **Potencialidades Uraníferas do Pré-Cambriano no Estado de Goiás**. Departamento de Geociências. Convênio FUB-CNEN. Universidade de Brasília. UNB, 1983. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/24/044/24044638.pdf
- EURATOM. **EU Commission Recommendation**. Commission Recommendation of 20 December 2001 on the protection of the public against exposure to radon in drinking water supplies 344, p. 85–88, 2001. <https://eur-lex.europa.eu/eli/reco/2001/928/oj>.
- FIGUEIREDO, A.M.; OESTERLEN, P. M. Prospecção de Urânio no Estado de Goiás. **Revista Brasileira de Geociências**. 11(3): p.147-152, 1981. <http://bjg.siteoficial.ws/1981/n3/figueiredo.pdf>
- FIORAVANTI, M. I. A. et al. Monitoramento e avaliação da qualidade da água de solução alternativa coletiva de abastecimento de escolas públicas do município de Itatiba, SP. **Vigilância Sanitária em Debate**, v. 8, n. 2, p. 122–133, 2020.
- GÓMEZ, M. et al. Natural radioactivity in European drinking water: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p. 1-18, 2022. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2041975>.
- Hossain, F., 2020. Natural and anthropogenic radionuclides in water and wastewater: sources, treatments and recoveries. **J. Environ. Radioact.** 225, 106423. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2020.106423>
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Brasil/Goiás: Panorama**. <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/go/panorama>. Acesso em: agosto de 2023.

- IMB. Instituto Mauro Borges. **Banco de Dados estatísticos de Goiás**. 2023. <https://www.imb.go.gov.br/bde/>
- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. **Gráficos Climatológicos: Goiás**. 2023. <https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/GO/83374>
- JOBÁGY, V. et al. Radiochemical characterization of spring waters in Balaton Upland, Hungary, estimation of radiation dose to members of public. **Microchemical Journal**, v. 94, n. 2, p. 159-165, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2009.10.015>.
- JOKSIC, J.; RADENKOVIC, M.; MILJANIC, S.. Natural radioactivity of some spring and bottled mineral waters from several Central Balkan sites, as a way of their characterization. **Journal of the Serbian Chemical Society**, v. 72, n. 6, p. 621-628, 2007. <https://doi.org/10.2298/jsc0706621j>.
- KEBIR, H. Natural radionuclide concentrations in drinking water (well and spring mineral waters) samples from Bordj-Bouarreridj region, east Algeria. **Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry**, v. 331, n. 2, p. 727-737, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08126-8>.
- KHANDAKER, M. U. et al. Terrestrial radionuclides in surface (dam) water and concomitant dose in metropolitan Kuala Lumpur. **Radiation Protection Dosimetry**, 2019. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz018>.
- KHEDR, M.G., 2013. Radioactive contamination of groundwater, special aspects and advantages of removal by reverse osmosis and nanofiltration. **Desalination** 321, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.01.013>
- LA VERDE, G. et al. Measurement of Natural Radionuclides in Drinking Water and Risk Assessment in a Volcanic Region of Italy, Campania. **Water**, v. 13, n. 22, p. 3271, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13223271>.
- LACERDA FILHO J.V.; REZENDE, A.; SILVA, A.; Geologia e recursos minerais do estado de Goiás e Distrito Federal. **CPRM**. 1999. https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/2418/1/Geol_Rec_Min_Go-DF.pdf.
- MA, M.; WANG, R.; XU, L.; XU, M.; LIU, S. Emerging health risks and underlying toxicological mechanisms of uranium contamination: Lessons from the past two decades. *Environment International*, v. 145, p. 106107, 1 dez. 2020. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020320626>
- MARZAALI, A. A.; AL-SHAREEFI, M. A.; ABOJASSIM, A. A. ²²²Rn, ²²⁶Ra and ²³⁸U concentration in water samples for some marshes in Dhi-Qar governorate, Iraq. *Water Supply*, 2021. <https://doi.org/10.2166/ws.2021.216>.
- MHLW. Measures against radioactive materials in tap water. Tokyo: Water Supply Division, Health Service Bureau, **Ministry of Health, Labour and Welfare**, 2012. (http://www.mhlw.go.jp/english/topics/2011eq/dl/Document_121011.pdf).
- MILENA-PÉREZ, A. et al. Determination and dose contribution of uranium isotopes and ²¹⁰Po activity concentrations of natural spring waters in the Province of Granada, Spain. **Radiation Protection Dosimetry**, v. 181, n. 4, p. 350-359, 2018. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy034>.
- MOHAMMED, A. A.; Tawfiq, N. F. Radioactivity Levels in Water Samples of Tigris River in Baghdad City, Iraq. **Iraqi Journal of Science**, p. 2540-2550, 2022. <https://doi.org/10.24996/ij.s.2022.63.6.21>.
- MUNICÍPIO DE GOIÁS. **Diagnóstico da Cidade de Goiás**. <https://goias.go.gov.br/planodiretor/arquivos/>
- MUNTER, R. Technology for the removal of radionuclides from natural water and waste management: state of the art, **Proceedings of the Estonian Academy of Sciences**, 62, (2), 122–132. https://kirj.ee/public/proceedings_pdf/2013/issue_2/Proc-2013-2-122-132.pdf
- NAZIR, S. et al. Dose estimation of radioactivity in groundwater of Srinagar City, Northwest Himalaya, employing fluorimetric and scintillation techniques. *Environmental Geochemistry and Health*, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00576-5>.
- OMS. Organização Mundial da Saúde. **Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda**. 2022. <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1414381/retrieve>
- _____. Organização Mundial da Saúde. **Management of radioactivity in drinking-water**. 2018. <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272995>.

PERVIN, S. et al. Assessment of gross alpha/beta activity in tap water of Dhaka city using ZnS (Ag) scintillation detector and concomitant health hazard. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1080/03067319.2022.2140418>.

SALAH EL Din, K. et al. Natural radionuclides in groundwater from Qena governorate, **Egypt**. *Environmental Forensics*, p. 1-8, 2020. <https://doi.org/10.1080/15275922.2020.1834026>.

SALEH, E.E. et al. Assessment of radiation hazards a result of natural radioactivity in water from Abyan delta, Yemen. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, v. 304, n. 3, p. 1235-1241, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-3932-9>.

SANEAGO. Saneamento de Goiás S.A. **Relatório anual da qualidade da água** <https://www.saneago.com.br/#!/qualidade>

SEMAD. Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado de Goiás: setembro 2015. Disponível em: <https://legisla.casacivil.go.gov.br/api/v1/arquivos/5129>. Acesso em: agosto de 2023

SLAVCHEV, B. et al. Uranium And 210Po Radionuclides in Drinking Water in Southern Bulgaria and Expected Radiation Doses. *Radiation Protection Dosimetry*. 2022. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac039>.

TAUHATA, L.; et al. Radioproteção e dosimetria: fundamentos. 10a. ed. Rio de Janeiro: **IRD/CNEN**, 2014. https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf.

TOMAZZOLI, E.R. Goiás Velho (GO): Roteiro para um trabalho de campo geológico. *Sociedade e Natureza*. v. 3. 1991. <https://doi.org/10.14393/SN-v3-1991-60686>.

UGBEDE, F. O. et al. Natural radionuclides, heavy metals and health risk assessment in surface water of Nkalagu river dam with statistical analysis. *Scientific African*, v. 8, p. e00439, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00439>

UNSCEAR. **United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**. Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex B: Uncertainties in risk estimates for radiation-induced cancer. New York, United Nations. 2017. https://www.unscear.org/docs/publications/2017/UNSCEAR_2017_Annex-B.pdf

USEPA **United States Environmental Protection Agency** TENORM: Drinking Water Treatment Residuals (on line).2023. <https://www.epa.gov/radiation/tenorm-drinking-water-treatment-residuals>.

_____. A System's Guide to the Management of Radioactive Residuals from Drinking Water Treatment Technologies. 2006. (on line). <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=2000ZZAW.txt>.

_____. National Primary Drinking Water Regulations (NPDWR), (on line).2022. https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-06/documents/npwdr_complete_table.pdf

_____. Removing Multiple Contaminants from Drinking Water: Issues to Consider. 2007. (on line). <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi?Dockey=P1009V6Q.txt>.

Van THANG, N.; Thu, H. N. P.; Hao, L. C. Uranium isotopes in groundwater in Ho Chi Minh City and related issues: Health risks, environmental effects, and mitigation methods. *Journal of Contaminant Hydrology*, v. 245, p. 103941, fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2021.103941>

VENGOSH, A. et al. A critical review on the occurrence and distribution of the uranium- and thorium-decay nuclides and their effect on the quality of groundwater. *Science of The Total Environment*, v. 808, p. 151914, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151914>.

VIANA, C. M. et al. Avaliação da qualidade da água através da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos e do índice de violação: estudo de caso do rio Arroio Grande e da Praia do Pontal - RS. *Revista Ambientale*, v. 15, n. 1, p. 30-39, 2023.

VIEIRA, P.A.; FERREIRA, N.C.; FERREIRA, L.G. Análise da vulnerabilidade natural da paisagem em relação aos diferentes níveis de ocupação da bacia hidrográfica do rio vermelho, Estado de Goiás. *Sociedade & Natureza*. V.26, n. 2. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1982-451320140213>

WALENCIK, A. et al. Natural radioactivity in underground water from the Outer Carpathians in Poland with the use of nuclear spectrometry techniques. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 68, n. 4-5, p. 839-843, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2009.09.056>.

YADAV, A. K. et al. Concentrations of uranium in drinking water and cumulative, age-dependent radiation doses in four districts of Uttar Pradesh, India. **Toxicological & Environmental Chemistry**, v. 96, n. 2, p. 192–200, 2014. <https://doi.org/10.1080/02772248.2014.934247>.

CAPÍTULO V

Nesta seção serão apresentadas as considerações finais relacionadas ao panorama da radioatividade natural das águas de abastecimento público em municípios de Goiás. Em seguida, as recomendações e conclusões gerais dissertam sobre os tópicos relevantes pronunciados por este estudo.

5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo buscou suscitar informações atuais e abrangentes sobre a radioatividade natural da água potável em Goiás. Considerando a revisão sistemática da literatura, foi constatado que a radioatividade em água é um assunto amplamente debatido na esfera científica, com estudos que suscitam pela preocupação ambiental desde década de 1980. Atualmente, o tema tem destaque nos continentes europeu e asiático, envolvendo as regiões de maior impacto radioativo devido aos acidentes nucleares e explosão de bombas atômicas. Os estudos preconizaram pelo monitoramento radiológico da água proveniente principalmente das captações dos centros urbanos e de regiões de alta concentração de atividades antrópicas.

As publicações originadas no Brasil indicaram que, em média, as águas possuem baixos teores de radioatividade, comparados às faixas de outros países. Nos países do hemisfério norte, verificou-se a predominância de estudos sobre isótopos de radônio (Rn-222), por ser o elemento de grande ocorrência local, e cujos danos à saúde provocados por sua radiação são mais elencados, em comparação a outras radionuclídeos.

O monitoramento radiológico realizado no Estado de Goiás, entre os anos de 2011 e 2017, revelou que a radioatividade natural das águas da maioria dos municípios analisados, atende aos requisitos de potabilidade radiológica para alfa total e beta total.

As captações de Goiás que excederam os limites de segurança (8 para alfa e 4 para beta), não sofreram interrupção do fornecimento de água, mas tiveram suas análises repetidas para confirmação dos resultados. Em nenhuma dessas captações foi detectada poluição radiológica ou atividades antrópicas de impacto ambiental. Assim, foi aconselhado o prolongamento do monitoramento e a busca de informações que possam explicar as causas da radioatividade elevada.

Em virtude desse estudo, foi verificado que o resultado elevado nas águas da captação

subterrânea do município de Goiás-GO era constante, principalmente para alfa total. Seguindo as recomendações da portaria de potabilidade vigente no Brasil, a determinação de radionuclídeos específicos foi realizada com o intuito de verificar se a ingestão daquelas águas causaria danos à saúde da população. Até 2017, apenas uma captação subterrânea havia sido analisada, então outros sete poços de abastecimento dessa cidade foram incluídos para que a pesquisa pudesse formalizar a conjectura sobre a presença de substâncias radioativas no subsolo da região. Foi detectada presença de Tório-232 na maioria dos poços, em teores que se enquadravam nos limites de segurança estabelecido. O Urânio-238 também foi identificado, especialmente nas águas de dois poços da malha urbana, cujos teores excederam o valor de referência. Apesar da dose efetiva nesses poços estar abaixo do nível de referência da OMS, será mandatário o emprego de medidas que promovam a redução dos teores de urânio.

5.2. RECOMENDAÇÕES

Considerando os níveis de potabilidade radiológica do Ministério da Saúde, É recomendado que o monitoramento radiológico das águas de abastecimento nos municípios de Goiás prossiga em periodicidade anual, para estabelecer um sistema de informações integrado às variações físicas, químicas, geológicas e climáticas para cada região. Cabe ainda sugerir que seja realizada um levantamento geológico atualizado com a finalidade de prospectar e monitorar as anomalias de elementos radioativos, consolidando um registro da disponibilidade de minérios radioativos nos diversos recursos naturais de Goiás.

Para a atenuação da radioatividade nas águas dos dois poços do município de Goiás, que apresentaram teores de U-238 acima dos limites de segurança para a saúde humana, foi proposto que seja feita a diluição daquelas águas com outras captções de baixa concentração radioativa. A interrupção da captação desses dois poços também é válida, porém depende da disponibilidade hídrica de outros mananciais. O encaminhamento das águas dos poços para as estações de tratamento convencionais é uma alternativa, mas exige adequações técnicas do sistema de abastecimento municipal.

Apesar das recomendações em relação à potabilidade de água estarem relacionadas às águas de sistema de abastecimento, não foram estabelecidos limites oficiais para águas minerais engarrafadas ou de fontes. Neste contexto, deve ser reconhecida a preocupação relacionada à concentração de elementos radioativos destas procedências, em concomitante necessidade do monitoramento destas águas, tendo em vista o aumento de consumo e o uso destas águas na indústria alimentícia.

5.3. CONCLUSÕES GERAIS

A presente dissertação permitiu concluir que:

(1) Os termos de conhecimento sobre “radioatividade em água potável” apresentaram maior recorrência em pesquisas científicas a partir do ano de 2010, com prevalência de estudos nos continentes asiático e europeu. As recentes publicações evidenciaram que os estudos relacionados a esse assunto se concentram no monitoramento de centros urbanos, em captações superficiais e subterrâneas de abastecimento público.

(2) Considerando os níveis de triagem para potabilidade radiológica ordenados pelas normas vigentes, os parâmetros de conformidade da radioatividade em água potável foram atendidos na maioria dos 62 municípios de Goiás. A água das captações de três municípios no quesito atividade alfa total e em quatro municípios para atividade beta total, ultrapassaram os limites de segurança radiológica, para os quais solicita-se que sejam prolongadas as ações de monitoramento radiométrico até adequação.

(3) O monitoramento da radioatividade das águas de captação subterrânea para o consumo humano do município de Goiás-GO reportou a presença de substâncias radioativas naturais em alguns poços. Os valores determinados atendem aos limites estabelecidos, porém requerem monitoramento para atenuação da dose.

REFERÊNCIAS

- CNEN (b). Comissão Nacional de Energia Nuclear. Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro. Rio de Janeiro, 2020. Disponível em: <http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/glossario.pdf>
- CAMARGO, I. M. C. **Determinação da concentração de isótopos naturais de urânio e tório em amostras de água**. Dissertação (Mestrado em Ciências – área de Tecnologia Nuclear) – Comissão Nacional de Energia Nuclear - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/CNEN, São Paulo, 1994. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/lara%20Maria%20Carneiro%20de%20Camargo_M.pdf. Acesso em: agosto de 2023.
- FARIA, L. S. **Determinação da radioatividade natural de águas subterrânea e superficial de Brumadinho e Nova Lima**, Brasil. 2013. 86 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) - Centro de Desenvolvimento e Tecnologia Nuclear, Comissão Nacional de Energia Nuclear, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/45/068/45068117.pdf>. Acesso em: agosto de 2023.
- GÓMEZ, M. *et al.* Natural radioactivity in European drinking water: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, p. 1-18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2041975>.
- GONÇALVES, M. F., *et al.* Monitoring of radionuclides in water for human consumption in the county of Angra dos Reis. **Brazilian Journal of Radiation Sciences**, 9(2). 202. Disponível em: <https://doi.org/10.15392/bjrs.v9i2.1685>. Acesso em: agosto de 2023.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. **Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards**. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 3, Vienna, 2014. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/8930/radiation-protection-and-safety-of-radiation-sources-international-basic-safety-standards> Acesso em 06 jun. 2023.
- ICRP - International Commission on Radiological Protection. **The 2007 recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publicação 103, 332 pp. 2007. Disponível em: [https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37\(2-4\)-Free_extract.pdf](https://www.icrp.org/docs/ICRP_Publication_103-Annals_of_the_ICRP_37(2-4)-Free_extract.pdf). Acesso em: agosto de 2023.
- _____, **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**. Publicação 60, 201 pp., 1990. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_33_1-2. Acesso em: agosto de 2023
- KÜÇÜKÖMEROĞLU, B. *et al.* Determination of radioactivity level of water supply network in Trabzon province, Turkey. **Isotopes in Environmental and Health Studies**, p. 1-13, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/10256016.2021.1972996>.
- LAURIA, D.C., *et al.* **Radioatividade em água potável: Ocorrência, regulamentação e aspectos de proteção radiológica**. 1 ed. – Rio de Janeiro: IRD, 2014. Disponível em: <https://www.gov.br/ird/pt-br/central-de-conteudo/publicacoes/RadioatividadeemAguaPotavel.pdf> Acesso em: agosto de 2023.
- NOUAILHETAS, Y. **Apostila educativa: Radiações ionizantes e a vida**. Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2012. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/material-divulgacao-videos-imagens-publicacoes/publicacoes-1/radiacoesionizantes.pdf>.
- OKUNO, E. Efeitos biológicos das radiações ionizantes: acidente radiológico de Goiânia. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 27, n. 77, p. 185-200, 2013. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/xzD9Dgv8GPFtHkxkfbQsn4f/>

OLIVEIRA, J. **Determinação dos níveis de Radioatividade Natural em Águas Utilizadas para Abastecimento Público no Estado de São Paulo**, 1998. Volume 1. Tese apresentada para obtenção do Grau de Doutor em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Aplicações, São Paulo 1998. Disponível em: http://pelicano.ipen.br/PosG30/TextoCompleto/Joselene%20de%20Oliveira_D.pdf. Acesso em: agosto de 2023.

OMS. Organização Mundial da Saúde. **Guidelines for drinking-water quality: Fourth edition incorporating the first and second addenda**. 2022. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1414381/retrieve> Acesso em: 06 jun. 2023.

_____. Organização Mundial da Saúde. **Management of radioactivity in drinking-water**. 2018. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/272995>. Acesso em 06 jun. 2023

SANG, C. *et al.* Gross alpha and beta measurements in drinkable water from seven major geographical regions of China and the associated cancer risks. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 208, p. 111728, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111728>. Acesso em: agosto de 2023.

SINGLA, A.K. *et al.* A comprehensive study of radon in drinking waters of Hanumangarh district and the assessment of resulting dose to local population. **Environmental Geochemistry and Health**, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01304-x>. Acesso em: junho de 2023.

TAHIR, S. N. A.; ALAAMER, A. S. Concentrations of Natural Radionuclides in Municipal Supply Drinking Water and Evaluation of Radiological Hazards. **Environmental Forensics**, v. 10, n. 1, p. 1-6, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15275920802678404>.

TAUHATA, L.; et al. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10a. ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014. Disponível em: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/45/073/45073465.pdf. Acesso em: agosto de 2023.

UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to General Assembly, with Scientific Annexes**, United Nations, New York, 2020. Disponível em: https://www.unscear.org/unscear/en/publications/2020_2021_1.html. Acesso em: agosto de 2023

_____. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. **Sources, effects and risks of ionizing radiation. Annex B: Uncertainties in risk estimates for radiation-induced cancer**. New York, United Nations, 2012. Disponível em: https://www.unscear.org/docs/reports/2012/UNSCEAR2012Report_AnnexB_Uncertainty_AdvanceCopy.pdf. Acesso em: junho. 2023.

Apêndice 1. Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2023	Iraque	mananciais superfície	Radônio	em conformidade	N/A	Abdullah et al., 2023	191
2023	Brasil	poços, mananciais superfície	Radônio, Urânio	em conformidade	N/A	Lunardi et al., 2023	190
2023	Espanha, Irlanda	mananciais superfície, poços	Radônio	acima	Sim	Ibánhez et al., 2023	189
2023	Nigéria	poços	Radônio	acima	Sim	Adagunodo et al., 2023	188
2023	Paquistão	mananciais superfície	Radônio	acima	Não	Muhammad et al., 2023	187
2023	Turquia	Engarrafada	Radônio	em conformidade	Não	Turhan et al., 2023	186
2023	África do Sul, Nigéria	não identificada	N/A	N/A	N/A	Adeola, et al., 2022	185
2023	Índia	mananciais superfície, poços	Radônio	em conformidade	Não	Sigla et al., 2023	184
2023	Finlândia	ETA's	Chumbo	acima	Sim	Tyrväinen, et al., 2022	183
2023	Estônia, Espanha	não identificada	Alfa Total e Beta Total, Radônio	N/A	N/A	Gómez, et al., 2022	182
2022	Irlanda, Japão	mananciais superfície	Radônio	em conformidade	Não	Yamada et al., 2022	181
2022	Iraque	mananciais superfície	Urânio, Rádio, Radônio	acima	Não	Marzali et al., 2022	180
2022	Estados Unidos, Suíça	poços	Urânio, Tório	N/A	N/A	Vengosh, et al., 2022	179
2022	Romênia	poços, torneiras, mananciais superfície	Urânio, Radônio, Potássio K-40, Tório, Rádio	em conformidade	Não	Calin et al., 2022	178
2022	Bangladesh, Malásia	torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Pervin et al., 2022	177
2022	Polônia	Engarrafada	Potássio K-40, Tório, Rádio	em conformidade	Não	Wojtkowska et al., 2022	176
2022	Brasil	poços	Chumbo, Rádio	acima	Sim	Amaral et al., 2022	175
2022	Turquia	poços	Radônio	em conformidade	Não	Damla et al., 2022	174
2022	Jordânia	poços	Alfa Total e Beta Total, Rádio	acima	Sim	Abu-Khader et al., 2022	173
2022	Arábia Saudita	poços	Radônio	em conformidade	Não	Mamun et al., 2022	172
2022	Iraque	poços, ETA's	Tório, Urânio, Potássio K-40	acima	Não	Abojassim et al., 2022	171
2022	Argélia	mananciais superfície, poços	Potássio K-40, Tório, Urânio	acima	Não	Kebir, 2022	170
2022	Turquia	poços	Potássio K-40, Rádio	acima	Não	Altikulac et al., 2022	169
2022	Brasil	ETA's	Urânio, Rádio	em conformidade	Não	Ferreira, et al., 2022	168
2022	Turquia	torneiras, poços	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	N/A	Sogut et al., 2022	167
2022	Irã	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	N/A	Ranjbar et al., 2022	166

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2022	China	mananciais superfície, torneiras	Alfa Total e Beta Total, Estrôncio, Césio	em conformidade	Não	Cao et al., 2022	165
2022	Iraque	mananciais superfície	Césio, Potássio K-40, Tório, Rádio	acima	Sim	Mohammed e Tawfiq, 2022	164
2022	Turquia	torneiras, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Kapdan et al., 2022	163
2022	Bósnia, Hungria, Romênia	mananciais superfície	Potássio K-40, Polônio, Rádio, Radônio, Alfa Total e Beta Total	acima	Sim	Begy et al., 2022	162
2022	Índia	poços	Radônio	em conformidade	Não	Gazi et al., 2022	161
2022	México	mananciais superfície, poços	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Vásquez-Contreras et al., 2022	160
2022	Índia	poços	Radônio	em conformidade	Não	Kumar et al., 2022	159
2022	Líbia, Turquia	Engarrafada	Radônio	em conformidade	Não	Seid et al., 2022	158
2022	Turquia	torneiras, poços, mananciais superfície	Radônio	em conformidade	Não	Küçükönder et al., 2022	157
2022	Finlândia, Hungria, Itália	poços, mananciais superfície	Urânio	acima	Não	Baják et al., 2022	156
2022	Brasil	poços	Rádio	em conformidade	Não	Amaral et al., 2022	155
2022	Bulgária	ETA	Urânio, Polônio	em conformidade	Não	Slavchev et al., 2022	154
2022	Índia	não identificada	Urânio	N/A	N/A	Balaram et al., 2022	153
2021	Jordânia	mananciais superfície	Potássio K-40, Rádio	em conformidade	Não	Qwasmeh, 2021	152
2021	Turquia	ETA	Alfa Total e Beta Total, Césio, Tório, Urânio, Potássio K-40, Radônio	em conformidade	Não	Küçükömeroğlu et al., 2021	151
2021	Malásia, Nigéria	poços	Radônio	acima	Sim	Shu'aibu et al., 2021	150
2021	Índia	mananciais superfície, poços	Urânio, Radônio	acima	Sim	Nazir et al., 2021	149
2021	Iraque	mananciais superfície, torneiras, ETA	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Fleifil et al., 2021	148
2021	Índia	poços	Radônio	acima	Não	Sukanya et al., 2021	147
2021	China, Dinamarca	poços, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Sang et al., 2021	146
2021	Nigéria	poços	Alfa Total e Beta Total	acima	Sim	Oghenevovwero et al., 2021	145
2021	Itália	poços	Alfa Total e Beta Total, Trítio, Radônio	em conformidade	Não	La Verde et al., 2021	144
2021	Egito	poços	Potássio K-40, Tório, Radônio, Rádio	acima	Não	Salahel Din et al., 2021	143
2021	Líbano	poços, mananciais superfície, torneiras	Alfa Total e Beta Total, Radônio	acima	Sim	Mourad et al., 2021	142
2021	África do Sul, Nigéria	não identificada	N/A	N/A	N/A	Adebisi, et al., 2021	141

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2021	Índia	mananciais superfície, poços	Urânio, Radônio	acima	Não	Kumar et al., 2021	140
2021	Índia	poços	Radônio	acima	Sim	Ravikumar et al., 2021	139
2021	Líbia, Turquia	Engarrafada, torneiras	Potássio K-40, Rádio	acima	Sim	Kurnaz et al., 2021	138
2021	Espanha, Suécia	Engarrafada	Chumbo, Polônio, Urânio, Rádio	acima	Não	Pinero-García et al., 2021	137
2021	Índia	mananciais superfície, poços	Radônio	em conformidade	Não	Rani et al., 2021	136
2021	Malásia, Reino Unido	mananciais superfície, torneiras, poços	Radônio	em conformidade	Não	Ismail et al., 2021	135
2020	Malásia, Jordânia	poços	Urânio, Tório	em conformidade	Não	Alomari et al., 2020	134
2020	Emirados Árabes	Engarrafada	Potássio K-40, Trítio	em conformidade	Não	Semerjian et al., 2020	133
2020	Egito, Iraque	poços	Radônio	em conformidade	Não	El-Taher et al., 2020	132
2020	China	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Yu et al., 2020	131
2020	Japão, Irlanda	Engarrafada	Césio, Chumbo, Polônio, Potássio K-40, Rádio, Radônio, Trítio, Urânio	em conformidade	Não	Kinahan et al., 2020	130
2020	Índia	poços	Radônio	em conformidade	Não	Sannappa et al., 2020	129
2020	Vietnã, Polônia, Hungria	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Duong et al., 2020	128
2020	China	mananciais superfície	Urânio, Alfa Total e Beta Total, Césio, Potássio K-40, Estrôncio, Tório, Rádio	em conformidade	Não	Yang et al., 2020	127
2020	Vietnã	poços	Rádio	em conformidade	Não	Nguyen et al., 2020	126
2020	Brasil	não identificada	N/A	N/A	N/A	Costa Dantas et al., 2019	125
2020	Brasil	mananciais superfície	Rádio, Polônio, Chumbo	acima	Não	Wakasugi et al., 2020	124
2020	Nigéria	mananciais superfície	Urânio, Tório, Potássio K-40	acima	Sim	Ugbede et al., 2020	123
2020	Nigéria	poços	Tório, Rádio, Césio, Potássio K-40	acima	Sim	Ayodele et al., 2020	122
2020	Azerbaijão	mananciais superfície, poços	Rádio	acima	Sim	Garibov et al., 2020	121
2020	Itália, Irã	poços	Radônio	em conformidade	Não	Fouladi-Fard et al., 2020	120
2020	China	Engarrafada	Radônio	em conformidade	Não	Yong et al., 2020	119
2020	Nigéria	poços, torneiras, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	acima	Sim	Okunola et al., 2020	118
2020	Vietnã	ETA, poços	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Long Ho et al., 2020	117
2020	Turquia	não identificada	Rádio	em conformidade	Não	Abbasi e Mirekhtiary, 2020	116
2020	Irã	Engarrafada	Rádio, Potássio K-40, Chumbo	acima	Não	Salehipour et al., 2020	115
2020	Índia	poços	Radônio, Rádio	acima	Não	Nagabhushana et al., 2020	114
2020	Bangladesh, Cazaquistão, Irã, Itália, Noruega	não identificada	Urânio	N/A	N/A	Bjørklund et al., 2020	113

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2019	Arábia Saudita	ETA, engarrafada, torneiras	Radônio	em conformidade	Não	Elfatih Abuelhia, 2019	112
2019	Malásia, Paquistão	poços, torneiras	Rádio, Radônio	em conformidade	Não	Ahmad et al., 2019	111
2019	Jordânia	Engarrafada, torneiras	Alfa Total e Beta Total	acima	Sim	Al-absi et al., 2019	110
2019	Polônia	poços, torneiras	Urânio, Polônio	em conformidade	Não	Sekudewicz e Gąsiorowski, 2019	109
2019	Malásia, Paquistão	poços, torneiras	Tório, Potássio K-40, Rádio	em conformidade	Não	Ahmad et al., 2019	108
2019	China	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Yang et al., 2019	107
2019	Turquia, Irã	poços	Rádio	em conformidade	Não	Abbasi e Mirekhtiary, 2019	106
2019	Turquia, Líbia	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Turhan et al., 2019	105
2019	Coréia do Sul	poços	Radônio	acima	Sim	Cho et al., 2019	104
2019	Índia	poços	Radônio	acima	Sim	Kumar et al., 2019	103
2019	Malásia, Reino Unido	mananciais superfície	Potássio K-40, Tório, Rádio	acima	Sim	Khandaker et al., 2019	102
2019	Vietnã, Hungria, Polônia	mananciais superfície, poços, engarrafada	Urânio, Rádio	em conformidade	Não	Duong et al., 2019	101
2018	Nigéria	poços	Alfa Total e Beta Total	acima	Sim	Saidu et al., 2018	100
2018	Espanha, Suécia	mananciais superfície, poços	Urânio, Polônio	em conformidade	Não	Milena-Pérez et al., 2018	99
2018	Índia	mananciais superfície	Radônio	em conformidade	Não	Kaliprasad et al., 2018	98
2018	Tunísia	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total, Rádio, Urânio	em conformidade	Não	Labidi et al., 2018	97
2018	Arábia Saudita	poços	Alfa Total e Beta Total, Potássio K-40, Rádio	acima	Não	Alharbi et al., 2018	96
2018	Bulgária	poços	Radônio	em conformidade	Não	Kamenova-totzeva et al., 2018 (a)	95
2018	Bulgária	mananciais superfície	Rádio	em conformidade	Não	Kamenova-totzeva et al., 2018 (b)	94
2016	Índia	não identificada	Urânio, Radônio	em conformidade	Não	Singh et al., 2016	93
2016	Turquia	torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Turgay et al., 2016	92
2017	Índia	poços	Radônio	acima	Não	Sharma et al., 2017	91
2016	Turquia	torneiras, mananciais superfície	Radônio	em conformidade	Não	Kurnaz e Atif Çetiner, 2016	90
2017	Turquia, Irã	torneiras, poços, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Abbasi et al., 2017	89
2016	Turquia	torneiras, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Korkmaz et al., 2016	88
2016	Malásia	Engarrafada	Potássio K-40, Rádio	acima	Não	Asaduzzaman et al., 2015	87
2016	Arábia Saudita, Egito	Engarrafada, ETA, poços	Rádio, Radônio	acima	Não	Althoyaib e El-Taher, 2016	86
2016	Iêmen, Indonésia, Malásia	poços	Rádio, Tório, Urânio, Potássio K-40	acima	Não	Abdurabu et al., 2016	85
2017	Reino Unido, Malásia	Engarrafada	Rádio, Tório, Potássio K-40	acima	Sim	Khandaker et al., 2017	84

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2017	Jordânia	torneiras	Potássio K-40, Rádio, Tório	em conformidade	Não	Al-Shboul et al., 2017	83
2017	Nigéria	poços	Tório, Rádio, Potássio K-40	acima	Não	Ayodele et al., 2017	82
2017	Índia	mananciais superfície	Radônio	em conformidade	Não	Niranjan et al., 2017	81
2015	Brasil	poços	Rádio	acima	Não	Bonotto, 2015	80
2015	Egito, Iêmen	poços, mananciais superfície	Tório, Rádio, Potássio K-40	acima	Sim	Saleh et al., 2015	79
2015	Gana	ETA, poços	Tório, Rádio, Potássio K-40, Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Darko et al., 2015	78
2015	Turquia	torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	N/A	Akbulut et al., 2015	77
2015	Bósnia	mananciais superfície	Urânio, Rádio, Potássio K-40	em conformidade	Não	Kasic et al., 2015	76
2015	Bulgária	poços, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total, Urânio, Rádio	em conformidade	Não	Kamenova-totzeva et al., 2014	75
2015	Arábia Saudita, Egito	poços	Radônio, Rádio	acima	Não	Althoyaib e El-TaHER, 2014 (a)	74
2015	Bélgica, Turquia	poços, mananciais superfície	Alfa total, Beta total	acima	Não	Althoyaib e El-TaHER, 2014 (b)	73
2015	Espanha	poços	Radônio	em conformidade	Não	Alonso et al., 2015	72
2014	Brasil	poços	Radônio	acima	Não	Bonotto, 2014	71
2014	Turquia	ETA	Urânio, Rádio	em conformidade	Não	Erden et al., 2014	70
2014	Albânia, Itália	Engarrafada, torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Cfarku et al., 2014	69
2014	Índia	torneiras, não identificada, mananciais superfície	Urânio	em conformidade	Não	Yadav et al., 2014	68
2014	Índia	poços, mananciais superfície, ETA	Radônio	acima	Sim	Ravikumar e Somashekar, 2013	67
2014	Polónia	poços	Urânio, Rádio	acima	Sim	Chmielewska, et al., 2014	66
2014	Turquia	mananciais superfície, torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Gorur et al., 2014	65
2014	Arábia Saudita	poços	Radônio	em conformidade	Sim	Abdulrahman e Alabdula'aly, 2014	64
2013	Turquia	poços	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Turhan et al., 2013	63
2013	Turquia	poços, engarrafada, mananciais superfície	Radônio	acima	Sim	Yakut et al., 2013	62
2013	Arábia Saudita	poços	Radônio	em conformidade	Não	Aleissa et al., 2013	61
2013	Irã	ETA, poços, mananciais superfície	Rádio, Urânio, Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Mehdizadeh et al., 2013	60
2013	Arábia Saudita	poços	Urânio, Rádio, Radônio	acima	Sim	Shabana et al., 2013	59
2013	Austrália, Turquia	ETA, poços, mananciais superfície	Radônio	acima	Não	Yuce e Gasparon, 2013	58

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas vigentes?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2013	Brasil	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Silva Filho et al., 2013	57
2012	Turquia	não identificada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Kadpan et al., 2012	56
2012	Turquia	não identificada	Alfa total, Beta total	em conformidade	Não	Taşkin et al., 2012	55
2012	Turquia	não identificada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Taskin et al., e2012	54
2012	Kwait	Engarrafada	Urânio	em conformidade	Não	Alrefae, 2012	53
2012	Turquia	não identificada	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Yalcin et al., 2012	52
2012	Nigéria, Malásia	ETA, mananciais superfície, torneiras, engarrafada	Radônio	em conformidade	Não	Muhammad et al., 2012	51
2012	Romênia	mananciais superfície	Rádio	acima	Não	Begy et al., 2012	50
2012	Turquia	Engarrafada	Urânio, Potássio K-40, Tório	em conformidade	Não	Kabadayi e Gumus, 2012	49
2012	Sérvia	Engarrafada, torneiras, mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total, Rádio	em conformidade	Não	Jankovic´ et al., 2012	48
2012	Itália	não identificada	N/A	N/A	N/A	Nuccetelli et al., 2012	47
2012	Sérvia	poços, mananciais superfície	Rádio	acima	Sim	Dragović et al., 2012	46
2011	Turquia	mananciais superfície, torneiras	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Gorur et al., 2011	45
2011	Egito	poços, torneiras	Tório, Rádio, Potássio K-40	em conformidade	Não	Amim e Khalil, 2011	44
2011	Polônia	não identificada	N/A	N/A	N/A	Chau et al., 2011	43
2011	Turquia	não identificada	Alfa Total e Beta Total, Rádio, Tório, Césio, Potássio K-40	em conformidade	Não	Koby et al., 2011	42
2011	Turquia	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total, Trítio	em conformidade	Não	Zorer et al., 2011	41
2010	Polônia	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total, Urânio, Rádio	em conformidade	Não	Walencik et al., 2010	40
2010	Turquia	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Não	Degerlier, 2010	39
2010	Alemanha	ETA	Chumbo, Rádio, Urânio, Radônio, Polônio.	em conformidade	Sim	Beyermann et al., 2010	38
2010	Gana	poços	Radônio	em conformidade	Sim	Darko et al., 2010	37
2010	Hungria	torneiras, mananciais superfície	Urânio, Rádio, Polônio	acima	Sim	Jobbágy et al., 2010	36
2010	Turquia	mananciais superfície	Alfa Total e Beta Total, Tório, Rádio, Potássio K-40, Césio	em conformidade	Não	Koby et al., 2010	35
2010	Turquia	mananciais superfície, torneiras	Radônio	em conformidade	Não	Yigitoglu et al., 2010	34
2010	Polônia	mananciais superfície, Engarrafada, ETA	Radônio	em conformidade	Sim	Kozłowska et al., 2010	33

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF.
2009	Arábia Saudita, Paquistão	ETA	Potássio K-40, Tório, Rádio	em conformidade	Não	Tahir e Alaamer, 2009	32
2009	Turquia	mananciais superfície, poços	Alfa Total e Beta Total	em conformidade	Sim	Damla et al., 2009	31
2009	Brasil	poços	Chumbo, Polônio	em conformidade	Não	Bonotto et al., 2009	30
2009	Nigéria	poços	Urânio, Potássio K-40, Rádio	acima	Sim	Ajayi e Achuka, 2009	29
2009	Argélia	Engarrafada	Potássio K-40, Rádio	acima	Não	Seghour e fSeghour, 2009	28
2008	Nigéria	poços	Urânio, Tório, Potássio K-40	em conformidade	Não	Awodugbaa e Tchokossab, 2008	27
2008	Espanha	ETA	Urânio, Rádio	acima	Sim	Baeza et al., 2008	26
2008	Arábia Saudita, Paquistão	poços	Radônio	em conformidade	Não	Manzoor et al., 2008	25
2008	Espanha	poços	Radônio, Rádio, Urânio	acima	Não	López e Sánchez; 2008	24
2008	Brasil	poços	Alfa Total e Beta Total, Potássio K-40, Rádio, Tório	em conformidade	Não	Bonotto et al., 2008	23
2007	Itália	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total, Urânio, Rádio	acima	Não	Desideri et al., 2007	22
2007	Sérvia	Engarrafada, mananciais superfície	Urânio, Tório, Potássio K-40, Rádio	acima	Não	Joksic et al., 2007	21
2007	Nigéria	poços	Potássio K-40, Rádio	em conformidade	Não	Awiri et al., 2007	20
2007	Itália	torneiras	Alfa Total e Beta Total, Urânio, Rádio, Radônio, Trítio	em conformidade	Não	Desideri et al., 2007	19
2007	Egito	Engarrafada	Rádio	acima	Não	Lasheen et al., 2007	18
2006	México, Espanha	poços	Radônio, Rádio, Urânio	acima	Não	Villalba et al., 2016	17
2006	Egito	poços, mananciais superfície	Potássio K-40, Tório, Rádio	acima	Não	Arabi et al., 2016	16
2006	Brasil	poços	Rádio, Radônio, Chumbo, Urânio, Tório	em conformidade	Não	Godoy e Godoy, 2006	15
2006	Finlândia	poços	Rádio	em conformidade	Não	Vesterbacka et al., 2006	14
2006	Turquia	torneiras	Césio, Rádio, Radônio, Chumbo, Potássio K-40, Bismuto	em conformidade	Não	Çevik et al., 2006	13
2006	Canadá	Engarrafada, mananciais superfície	Alfa total	acima	Não	Zikovsky, 2006	12
2005	Finlândia	poços	Urânio, Radônio, Chumbo, Polônio, Rádio	acima	Não	Vesterbacka et al., 2004	11
2004	Hungria	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total, Urânio, Rádio	acima	Sim	Kovács et al., 2004	10
2003	Polônia	Engarrafada	Urânio, Polônio	em conformidade	Não	Skwarzec et al., 2003	9

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 1 - Relação das publicações científicas sobre radioatividade em água, categorizadas para revisão sistemática (cont.)

ANO	PAÍS	COLETA	RADIONUCLÍDEO	CONC.	TRAT.	AUTORIA	REF
2003	Paquistão	ETA, mananciais superfície, poços	Potássio K-40, Tório, Rádio	em conformidade	Não	Khan et al., 2003	8
2002	México	Engarrafada	Alfa Total e Beta Total	acima	Não	Rangel et al., 2002	7
2002	Argélia	Engarrafada	Radônio, Rádio, Tório, Potássio K-40	em conformidade	Não	Amrani, 2002	6
2001	Polônia	mananciais superfície, poços	Urânio, Polônio	em conformidade	Não	Skwarzec et al., 2003	5
1998	Brasil, Itália	mananciais superfície, poços, torneiras	Alfa total, Beta total	em conformidade	Não	Malanca et al., 1998	4
1997	Croácia	Engarrafada, torneiras	Rádio	em conformidade	Não	Marovic et al., 1987	3
1997	Venezuela, Estados Unidos	Engarrafada, mananciais superfície	Alfa total	em conformidade	Não	Sajo-bohus, et al..	2
1986	Estados Unidos	não identificada	N/A	N/A	N/A	Cothorn et al., 1986	1

Nota: N/A = Não aplicável; TRAT = Tratamento foi requerido? CONC = Concentração em conformidade com as normas?

Apêndice 2. Categorias e critérios delineados em revisão sistemática sobre radioatividade em água potável

VARIÁVEL	CRITÉRIO	AB	% AB	RAD	% RAD	RN	% RN	REF	% REF	Total	% Total
1-Região	Urbana	42	74%	38	64%	40	65%	6	46%	126	66%
	Rural	1	2%	4	7%	4	6%	0	0%	9	5%
	Urbana e rural	6	11%	3	5%	10	16%	1	8%	20	10%
	Não mencionado N/A	8	14%	14	24%	8	13%	6	46%	36	19%
	1-Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	14,25		14,75		15,50		3,25		47,75	
	Desvio padrão	18,73		16,28		16,52		3,20		46,19	
2-Origem	Superficial	18	32%	12	20%	11	18%	0	0%	41	21%
	Subterrânea	10	18%	22	37%	30	48%	4	31%	66	35%
	Superficial e subterrânea	17	30%	19	32%	18	29%	2	15%	56	29%
	Não mencionado	12	21%	6	10%	3	5%	7	54%	28	15%
	2-Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	14,25		14,75		15,50		3,25		47,75	
	Desvio padrão	3,86		7,18		11,45		2,99		14,46	
3-Coleta	Engarrafada	13	15%	14	18%	10	11%	1	7%	38	14%
	ETA	5	6%	6	8%	7	8%	2	13%	20	7%
	Mananciais superfície	26	30%	21	27%	22	24%	1	7%	70	26%
	Não identificada	6	7%	3	4%	1	1%	7	47%	17	6%
	Poços	20	23%	28	35%	43	47%	3	20%	94	34%
	Torneiras	18	20%	7	9%	9	10%	1	7%	35	13%
	3-Total	88	100%	79	100%	92	100%	15	100%	274	100%
	Média	14,67		13,17		15,33		3,00		45,67	
Desvio padrão	8,24		9,75		15,19		2,83		27,63		
4-Fonte	Natural	50	88%	54	92%	61	98%	7	54%	172	90%
	Antrópica	3	5%	0	0%	0	0%	1	8%	4	2%
	Natural e Antrópica	3	5%	4	7%	1	2%	1	8%	9	5%
	Não se aplica	1	2%	1	2%	0	0%	4	31%	6	3%
	4-Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	14,25		14,75		15,50		3,25		47,75	
Desvio padrão	23,85		26,22		30,34		2,87		71,76		
5-Concentração	Conforme	43	75%	30	51%	38	61%	2	15%	113	59%
	Não conforme	13	23%	27	46%	24	39%	4	31%	68	36%
	Não se aplica	1	2%	2	3%	0	0%	7	54%	10	5%
	5-Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	19,00		19,67		20,67		4,33		63,67	
	Desvio padrão	21,63		15,37		19,22		2,52		42,16	

Nota: AB = alfa e beta; RN = Radônio; RAD = radionuclídeos; REF = artigos de revisão e referência..

Apêndice 2. Categorias e critérios delineados em revisão sistemática sobre radioatividade em água potável (cont.)

VARIÁVEL	CRITÉRIO	AB	% AB	RAD	% RAD	RN	% RN	REF	% REF	Total	% Total
6-Tratamento	Não	44	77%	45	76%	46	74%	3	23%	138	72%
	Sim	9	16%	12	20%	14	23%	3	23%	38	20%
	Não se aplica	4	7%	2	3%	2	3%	7	54%	15	8%
	6-Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	19,00		19,67		20,67		4,33		63,67	
	Desvio padrão	21,79		22,50		22,74		2,31		53,39	
7-Deteccão	LSC	8	10%	6	9%	12	15%	1	7%	27	11%
	Contador Proporcional	45	54%	1	1%	3	4%	0	0%	49	20%
	Espectrometria alfa	10	12%	22	32%	39	48%	1	7%	72	29%
	Espectrometria gama	9	11%	30	43%	13	16%	2	14%	54	22%
	ICP/MS	1	1%	5	7%	1	1%	0	0%	7	3%
	Outros	11	13%	5	7%	13	16%	10	71%	39	16%
	7-Total	84	100%	69	100%	81	100%	14	100%	248	100%
	Média	14,00		11,50		13,50		2,33		41,33	
Desvio padrão	15,59		11,64		13,56		3,83		20,61		
8- Tipo Trat.	Adsorção	0	0%	0	0%	0	0%	1	7%	1	1%
	Aeração	0	0%	0	0%	6	9%	0	0%	6	3%
	Análises específicas	0	0%	1	2%	0	0%	0	0%	1	1%
	Carvão ativado	0	0%	1	2%	1	2%	1	7%	3	2%
	Diluição	0	0%	1	2%	1	2%	0	0%	2	1%
	Filtração	1	2%	0	0%	0	0%	1	7%	2	1%
	Monitoração	9	16%	12	20%	9	14%	2	14%	32	16%
	Osiose	1	2%	0	0%	2	3%	0	0%	3	2%
	Não se aplica	46	81%	44	75%	45	70%	9	64%	144	74%
	8- Total	57	100%	59	100%	64	100%	14	100%	194	100%
	Média	6,33		6,56		7,11		1,56		21,56	
Desvio padrão	15,16		14,56		14,55		2,88		44,27		
9- Tempo	1986 a 1999	2	4%	1	2%	0	0%	1	8%	4	2%
	2000 a 2009	7	12%	13	22%	7	11%	1	8%	28	15%
	2010 a 2019	28	49%	22	37%	25	40%	5	38%	80	42%
	2019 a 2023	20	35%	23	39%	30	48%	6	46%	79	41%
	9- Total	57	100%	59	100%	62	100%	13	100%	191	100%
	Média	14,25		14,75		15,50		3,25		47,75	
Desvio padrão	11,90		10,21		14,29		2,63		37,95		

Nota: AB = alfa e beta; RN = Radônio; RAD = radionuclídeos; REF = artigos de revisão e referência

Apêndice 3. Atividade dos principais radionuclídeos naturais em água, apresentadas em publicações no intervalo entre 1987 e 2022

País	Localidade	N	Origem	Th-232 (Bq.L ⁻¹)	U-238 (Bq.L ⁻¹)	Ra-226 (mBq.L ⁻¹)	Ra-228 (mBq.L ⁻¹)	K-40 (mBq.L ⁻¹)	Pb-210 (Bq.L ⁻¹)	Po-210 (Bq.L ⁻¹)	Referências
Polônia	ND	12	3	ND	ND	14,8	ND	357	ND	ND	Wojtkowska et al. (2022)
Brasil	Recife	110	2	ND	ND	1,4 — 119	ND	ND	0,025 — 0,563	ND	Amaral et al. (2022)
Iraque	Al-Najaf	20	2	1,9	8,3	ND	ND	57400	ND	ND	Abojassim et al. (2022)
Argélia	Bordj-Bouarrerdj	3	1; 2;	0,04	0,79	ND	ND	1,8	ND	ND	H. Kebir (2022)
Turquia	ND	25	3	ND	ND	400	500	4300	ND	ND	Altikulac et al. (2022)
Iraque	Bagdá	30	1	16,7	24,2	ND	ND	329220	ND	ND	Mohammed e Tawfiq (2022)
Hungria	Lago Velence	53	1; 2;	ND	0,03 — 0,753	5 — 63	ND	ND	ND	ND	Baják et al. (2022)
Bulgária	sul	32	5	ND	0,0006 — 0,678	ND	ND	ND	ND	0,003	Slavchev et al. (2022)
Jordânia	Petra	4	1	ND	ND	150 — 220	50 — 80	640 — 2720	ND	ND	Qwasmeh A.H. (2021)
Turquia	Mar Negro	41	3;4;	ND	ND	700	500	1300	ND	ND	Kurnaz et al. (2021)
Europa	ND	37	3	ND	0,0002 — 0,714	0,7 — 77	2 — 52	ND	0,0004 — 0,115	0,0002 — 0,12	Pinero-García et al. (2021)
Jordânia	ND	94	2	0,017	33	ND	ND	ND	ND	ND	Alomari et al. (2020)
Vietnã	Phu Yen	60	2	ND	ND	1,7 — 159	ND	ND	ND	ND	Nguyen et al. (2020)
Brasil	Lambari	ND	1	ND	ND	2,2 — 5,9	19,3 — 87	ND	<0,0049	< 0,0033	Wakasugi et al. (2020)
Nigéria	Ondo & Ekiti	10	2	2,25 — 35,61	ND	708 — 56680	ND	45420 — 4676100	ND	ND	Ayodele et al. (2020)
Azerbaijão	ND	10	1;2;	ND	ND	360 — 480	138 — 183	ND	ND	ND	Garibov et al. (2020)
Irã	ND	70	1	ND	ND	1,7 — 2220	1,3 — 1375	1290 — 389170	0,15 — 41,02	ND	Salehipour et al. (2020)
Turquia	Guilan do Norte	28	3	ND	ND	2,0 — 38,2	ND	ND	ND	ND	Abbasi . e Mirekhtiary, (2019)
Malásia	Kuala Lumpur	14	1	1,1 — 1,3	ND	2400 — 3200	ND	22700 — 40700	ND	ND	Khandaker et al. (2019)
Vietnã	norte	17	1; 2; 3;	ND	0,009	5 — 29,2	ND	ND	ND	ND	Duong et al. (2019)
Espanha	Granada	37	1	ND	0,04261	ND	ND	ND	ND	0,00174	Milena-Pérez et al. (2018)
Bulgária	ND	104	3	ND	ND	30 — 4900	ND	ND	ND	ND	Kamenova-Totzeva et al. (2018)
Malásia	Kuala Lumpur	18	3;	0,65 — 3,39	ND	1145 — 3300	ND	21120 — 25310	ND	ND	Khandaker et al. (2017)
Jordânia	Irbid	12	4	0,0024 — 0,119	ND	19 — 302	ND	101 — 342	ND	ND	Al-Shboul et al. (2017)
Nigéria	Ondo & Ekiti	16	2	0,454 — 33,152	ND	2084 — 78355	ND	34470 — 556902	ND	ND	Ayodele et al. (2017)
Malásia	Juban	38	2	ND	ND	50 — 609	100 — 790	351000 — 9072000	ND	ND	Abdurabu et al. (2016)
Brasil	MG-SP	75	1; 2;	ND	ND	42 — 2913	5,4 — 3899	ND	ND	ND	Bonotto (2015)
OMS				1,0	10	1000	100	*	0,1	0,1	OMS (2018)
EURATOM				*	30 µg/L ^(a)	500	200	*	*	*	EURATOM (2001)
USEPA				*	30 µg/L ^(a)	185	185	*	*	*	USEPA (2022)

Nota: Procedência da água (1) mananciais de superfície; (2) mananciais subterrâneos; (3) água engarrafada; (4) torneira; (5) não mencionado ou não disponível; ND = Não disponibilizado, Valores de atividade apresentados por média ou faixa. O teor dos isótopos Th-232, U-238, Pb-210 e Po-210 foram apresentados em Bq.L⁻¹ devido à ordem de grandeza com que normalmente são encontrados. (a) Monitoramento da concentração por unidade massa por volume. Fonte: os autores.

Apêndice 3. Atividade dos principais radionuclídeos naturais em água, apresentadas em publicações no intervalo entre 1987 e 2022 (cont.)

País	Localidade	N	Origem	Th-232 (Bq.L ⁻¹)	U-238 (Bq.L ⁻¹)	Ra-226 (mBq.L ⁻¹)	Ra-228 (mBq.L ⁻¹)	K-40 (mBq.L ⁻¹)	Pb-210 (Bq.L ⁻¹)	Po-210 (Bq.L ⁻¹)	Referências
Iêmen	Golfo de Aden	20	2	1,43	ND	1710	ND	14160	ND	ND	Saleh et al. (2015)
Bósnia	ND	23	5	ND	0,0006 — 0,017	1,1 — 791	0,2 — 221	12 — 346	ND	ND	Kasic et al. (2015)
Turquia	ND	9	5	ND	0,00042 — 0,439	0,56 — 165	ND	ND	ND	ND	Erden et al. (2014)
Kwait	ND	41	3	ND	0,00318	ND	ND	ND	ND	ND	T. Alrefae, 2012)
Romênia	ND	24	1	ND	ND	15 — 2550	ND	ND	ND	ND	Begy et al. (2012)
Turquia	ND	6	3	1,05	0,781	ND	ND	2190	ND	ND	Kabadayi e Gumus (2012)
Sérvia	ND	170	1; 2;	ND	ND	360 — 570	ND	ND	ND	ND	Dragović et al. (2012)
Egito	Beni Suef	50	2	0,003 — 0,019	ND	8 — 40	ND	25 — 344	ND	ND	R.M. Amim e F.A. Khalil (2011)
Polônia	ND	ND	1	ND	0,0005 — 0,016	10 — 490	29 — 397	ND	ND	ND	Walencik et al. (2010)
Hungria	Planalto Balaton	31	1	ND	0,00044 — 0,2743	2,1 — 601	ND	ND	ND	0,002 — 0,0152	Jobbágy et al. (2010)
Paquistão	Lahore	ND	5	0,0069	ND	104	ND	625	ND	ND	Tahir e. Alaamer (2009)
Brasil	Aquífero Guarani	77	2	ND	ND	ND	ND	ND	0,0067	0,0037	Bonotto et al. (2009)
Nigéria	Ogun	10	2	ND	ND	2890 — 7790	ND	1740 — 4690	ND	ND	Ajayi e Achuka (2009)
Argélia	ND	5	3	ND	ND	13,9 — 148,9	7,2 — 52,9	7 — 219	ND	ND	A. Seghour e F. Seghour (2009)
Sérvia	Bálcãs	9	1; 2;	0,000012	0,00022 — 0,04	26 — 2280	3 — 1170	70 — 1700	ND	ND	Joksic et al. (2007)
Nigéria	Port Harcourt	29	2	ND	ND	204	351	2303	ND	ND	Avwiri et al. (2007)
Egito	Elba	15	1; 2;	0,21 — 0,97	ND	1600 — 11100	ND	9100 — 23000	ND	ND	Arabi et al. (2016)
Finlândia	ND	176	2	ND	ND	10 — 1000	30 — 300	ND	ND	ND	Vesterbacka et al. (2006)
Paquistão	nordeste	9	1	0,0048	ND	36	ND	120	ND	ND	Khan et al. (2003)
Croácia	ND	ND	2;4;	ND	ND	0,0019	ND	ND	ND	ND	Marovic et al. (1987)
OMS				1,0	10	1000	100	*	0,1	0,1	OMS (2018)
EURATOM				*	30 µg/L ^(a)	500	200	*	*	*	EURATOM (2001)
USEPA				*	30 µg/L ^(a)	185	185	*	*	*	USEPA (2022)

Nota: Procedência da água (1) mananciais de superfície; (2) mananciais subterrâneos; (3) água engarrafada; (4) torneira; (5) não mencionado ou não disponível; ND = Não disponibilizado, Valores de atividade apresentados por média ou faixa. O teor dos isótopos Th-232, U-238, Pb-210 e Po-210 foram apresentados em Bq.L⁻¹ devido à ordem de grandeza com que normalmente são encontrados. Fonte: os autores.

Apêndice 4. Atividade alfa total e beta total em municípios de Goiás

MUNICÍPIO	TIPO DE CAPTAÇÃO	MESORREGIÃO	PROTOCOLO	2011		2014		2015A		2015B		2016A		2016B		2017A		2017B	
				ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA
Abadia de Goiás	Superficial	Centro	SANAB-01-A			10	30	90	100	10	30	10	30	10	30	10	30	10	160
	Subterrânea	Centro	SANAB-01-B			50	90	240	400	70	500	230	120	180	130	10	70	180	150
Acreúna	Subterrânea	Sul	SANAB-02-A	15	50														
Água Fria de Goiás	Subterrânea	Leste	SANAB-03-A					60	100	60	160	60	130	10	30	60	30	10	30
Alto Horizonte	Subterrânea	Norte	SANAB-04-A	60	100														
Alvorada do Norte	Superficial	Leste	SANAB-05-B			30	30	30	30			10	30	10	30			10	30
Americano do Brasil	Superficial	Centro	SANAB-06-A			10	30	70	1000	30	100	10	30	10	90	10	30	10	30
Amorinópolis	Superficial	Centro	SANAB-07-A			10	30	10	400	10	100	10	30	10	80	10	30	10	30
Anápolis	Subterrânea	Centro	SANAB-08-A	60	50														
Anicuns	Superficial	Centro	SANAB-09-A			10	30	60	4200	30	400	10	30	10	30	10	30	10	30
Aparecida de Goiânia	Superficial	Centro	SANAB-10-A			10	30	50	30	10	30	10	70	10	60	10	30	10	30
Aragoiânia	Superficial	Centro	SANAB-11-A			10	30	50	200	30	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Aurilândia	Superficial	Centro	SANAB-12-A			10	30	60	200	10	30	10	30	10	30	10	30	10	30
Barro Alto	Subterrânea	Centro	SANAB-13-A			30	80	50	100	10	100	80	80	10	30	10	30	10	30
Cabeceiras de Goiás	Subterrânea	Leste	SANAB-14-A	90	200														
Campinorte	Subterrânea	Norte	SANAB-15-A	170	400			450	200	40	410	70	240	70	180	10	30	70	210
Campos Belos	Superficial	Norte	SANAB-16-A	50	100	10	30	50	30	10	30	40	80	10	30	10	30	10	30
Castelândia	Superficial	Sul	SANAB-17-A	40	50														
Cezarina	Superficial	Sul	SANAB-18-A			10	30	50	500	10	30	10	30	10	30			10	70
Cidade Ocidental	Subterrânea	Leste	SANAB-19-A	80	50														
Doverlândia	Superficial	Sul	SANAB-20-A			10	30	10	30	40	30	10	30	10	210	60	220	10	100

Nota: Atividade = mBq.L⁻¹; limites de triagem = α : > 500 mBq.L⁻¹; β : > 1000 mBq.L⁻¹ (OMS, 2022; CNEN, 2020a; MS:BRASIL, 2021).

Apêndice 4. Atividade alfa total e beta total em municípios de Goiás (continuação)

MUNICÍPIO	TIPO DE CAPTAÇÃO	MESORREGIÃO	PROTOCOLO	2011		2014		2015A		2015B		2016A		2016B		2017A		2017B	
				ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA
Flores de Goiás	Subterrânea	Leste	SANAB-21-A	15	50														
Formosa	Superficial	Leste	SANAB-22-A			30	30	60	700	10	160	60	30	10	30	10	30	10	30
	Subterrânea	Leste	SANAB-22-B			50	140												
	Subterrânea	Leste	SANAB-22-C	60	50														
Goianápolis	Superficial	Centro	SANAB-23-A			10	30	40	100	10	30	10	70	10	30	10	30	10	70
Goianeira	Subterrânea	Sul	SANAB-24-A	70	50	10	80	30	400	30	770	10	30	10	90	10	30	10	30
Goiânia	Superficial	Centro	SANAB-25-A			10	30	70	300	30	30	10	30	10	120	10	90	10	70
	Superficial	Centro	SANAB-25-B			10	30	100	40	10	140	10	130	10	130	10	30	10	30
Goiás	Superficial	Noroeste	SANAB-26-A			30	30	10	30	10	30	50	30	10	30	10	30	10	30
	Superficial	Noroeste	SANAB-26-B			10	30	30	100	10	170	30	90	10	30	10	30	10	90
	Subterrânea	Noroeste	SANAB-26-C			300	320	2050	1300	2420	750	1950	610	2240	650	2010	30	1950	570
Iporá	Superficial	Centro	SANAB-27-A			10	30	20	300	10	70	10	30	10	30	10	30	10	80
Israelândia	Superficial	Centro	SANAB-28-A			10	30	30	100	40	130	10	30	10	100	10	30	10	90
Itajá	Subterrânea	Sul	SANAB-29-A	40	50	10	280	40	500	10	70	50	290	10	310	10	410	10	290
Itumbiara	Superficial	Sul	SANAB-30-A	15	50														
	Superficial	Sul	SANAB-30-B	40	100	10	30	10	100	10	110	10	30	50	30	10	30	10	30
Jataí	Superficial	Sul	SANAB-31-A	15	50	30	30	10	200										
	Superficial	Sul	SANAB-31-B	40	50														
	Subterrânea	Sul	SANAB-31-C	60	100														
Jussara	Subterrânea	Noroeste	SANAB-32-A	90	300														
Luziânia	Subterrânea	Leste	SANAB-33-A	90	50														
	Subterrânea	Leste	SANAB-33-B	70	100														
	Subterrânea	Leste	SANAB-33-C	50	50														
	Subterrânea	Leste	SANAB-33-D	30	50														
	Subterrânea	Leste	SANAB-33-E	100	200														
	Subterrânea	Leste	SANAB-33-F	80	100														

Nota: Atividade = mBq.L⁻¹; limites de triagem = α: > 500 mBq.L⁻¹; β: > 1000 mBq.L⁻¹ (OMS, 2022; CNEN, 2020a; MS:BRASIL, 2021).

Apêndice 4. Atividade alfa total e beta total em municípios de Goiás (continuação)

MUNICÍPIO	TIPO DE CAPTAÇÃO	MESORREGIÃO	PROTOCOLO	2011		2014		2015A		2015B		2016A		2016B		2017A		2017B	
				ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA
Luziânia	Subterrânea	Leste	SANAB-33-G			50	110	10	1100	10	120	10	30	10	30	10	30	10	80
Mara Rosa	Subterrânea	Norte	SANAB-34-A	80	100	40	30	10	300	10	110	10	30	10	70	10	30	10	30
Mimoso de Goiás	Subterrânea	Leste	SANAB-35-A	15	50														
Minaçu	Superficial	Norte	SANAB-36-A			60	80	10	200	10	80	10	70	10	70	10	100	10	80
Monte Alegre de Goiás	Superficial	Norte	SANAB-37-A			10	210	70	30	10	100	60	30	10	100	10	30	10	30
Morrinhos	Subterrânea	Sul	SANAB-38-A	15	50														
Niquelândia	Superficial	Norte	SANAB-39-A			70	70	10	100	10	540	10	70	10	30	10	30	10	30
Nova Iguaçu de Goiás	Subterrânea	Norte	SANAB-40-A	150	200														
Nova Veneza	Subterrânea	Centro	SANAB-41-A	110	200														
Novo Gama	Subterrânea	Leste	SANAB-42-A	70	100														
Ouvidor	Superficial	Sul	SANAB-43-A			10	30	30	40	10	130	10	220	10	150	60	30	10	30
Palmeiras de Goiás	Subterrânea	Sul	SANAB-44-A	70	100	10	30	60	100	10	70	10	30	10	70	10	30	10	110
Piracanjuba	Superficial	Sul	SANAB-45-A			10	30	40	100	10	130	10	30	10	240	10	70	10	70
Pires do Rio	Superficial	Sul	SANAB-46-A			10	30	30	200	50	30	10	30	10	100			10	130
Porangatu	Superficial	Norte	SANAB-47-A			50	30	10	200	10	100	10	30	10	30	10	30	10	30
Porteirão	Superficial	Sul	SANAB-48-A	30	50														
Portelândia	Subterrânea	Sul	SANAB-49-A			10	30	30	200	60	270	10	270	10	180	10	150	10	160
Professor Jamil	Superficial	Sul	SANAB-50-A			10	30	30	500	10	290	10	30	10	30	10	30	10	30
Rio Verde	Superficial	Sul	SANAB-51-A	70	50														
	Superficial	Sul	SANAB-51-B			10	30	40	100	10	150	10	30	10	30	10	70	10	30
	Superficial	Sul	SANAB-51-C	70	50														
Santa Fé de Goiás	Subterrânea	Noroeste	SANAB-52-A	140	500														
Santa Terezinha de Goiás	Subterrânea	Norte	SANAB-53-A	140	300														
Santo Antônio de Goiás	Subterrânea	Centro	SANAB-54-A			10	30	10	200	10	200	30	110	10	30	10	30	10	130
São Luís de Montes Belos	Subterrânea	Centro	SANAB-55-A	90	50	30	510	50	400	60	30	10	30	10	80	10	130	10	30

Nota: Atividade = mBq.L⁻¹; limites de triagem = α : > 500 mBq.L⁻¹; β : > 1000 mBq.L⁻¹ (OMS, 2022; CNEN, 2020a; MS:BRASIL, 2021).

Apêndice 4. Atividade alfa total e beta total em municípios de Goiás (continuação)

MUNICÍPIO	TIPO DE CAPTAÇÃO	MESORREGIÃO	PROTOCOLO	2011		2014		2015A		2015B		2016A		2016B		2017A		2017B	
				ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA	ALFA	BETA
São Luiz do Norte	Superficial	Centro	SANAB-56-A	700	600	200	340	440	600	110	180	290	370	430	460	110	260	290	450
São Miguel do Araguaia	Superficial	Noroeste	SANAB-57-A			40	90	10	200	10	70	10	30	10	30	10	30	10	30
	Subterrânea	Noroeste	SANAB-57-B			110	210	10	400	10	30	40	30	90	160			10	30
São Miguel do Passa Quatro	Superficial	Sul	SANAB-58-A	130	300														
Uruaçu	Superficial	Norte	SANAB-59-A	70	100	40	80												
	Subterrânea	Norte	SANAB-59-B					100	600	50	90	10	120	30	260	10	300	610	400
	Superficial	Norte	SANAB-59-C	70	200	40	30												
Valparaíso de Goiás	Subterrânea	Leste	SANAB-60-A	320	300														
	Subterrânea	Leste	SANAB-60-B	60	200														
	Subterrânea	Leste	SANAB-60-C					30	100	10	80	10	30	10	30	10	30	10	30
Vianópolis	Superficial	Sul	SANAB-61-A			20	30	10	1100	10	30	10	30	40	450	10	70	10	120
Vila Boa	Subterrânea	Leste	SANAB-62-A	130	200														

Nota: Atividade = mBq.L⁻¹; limites de triagem = α : > 500 mBq.L⁻¹; β : > 1000 mBq.L⁻¹ (OMS, 2022; CNEN, 2020a; MS:BRASIL, 2021).

Apêndice 5. Desempenho analítico para determinação da radioatividade natural em água potável

(a) alfa total

Ano	Série	Referência (Bq. L ⁻¹)	Valor obtido (Bq. L ⁻¹)	Desvio padrão	Desvio normalizado
2014	2 ^a	1,260	1,330	0,021	0,49
2015	1	0,530	0,517	0,022	-0,2
	2	0,920	0,915	0,043	-0,05
2016	1	1,230	1,132	0,055	-0,68
	2	0,560	0,496	0,006	-1,01
2017	1	0,660	0,576	0,018	-1,12
	2	1,000	0,964	0,015	-0,31
2018	1 ^b	-	-	-	-
	2	1,230	1,182	0,05	-0,34

(a): ano de entrada no programa; (b): não houve participação

(b) beta total

Ano	Série	Referência (Bq. L ⁻¹)	Valor obtido (Bq. L ⁻¹)	Desvio padrão	Desvio normalizado
2014	2 ^a	2,250	2,655	0,055	1,56
2015	1 ^b	-	-	-	-
	2	1,550	1,747	0,214	1,1
2016	1	2,040	1,947	0,153	-0,39
	2	1,210	1,174	0,129	-0,26
2017	1	2,170	1,653	0,205	-2,08
	2	1,820	1,903	0,165	0,39
2018	1 ^c	-	-	-	-
	2	1,490	1,441	0,112	-0,29

(a). ano de entrada no programa; (b) não houve série de amostras para emissor beta; (c). não houve participação