

RADIONUCLÍDEOS EM ÁGUAS EM UMA REGIÃO DE ALTA RADIOATIVIDADE NATURAL

Pereira, W. S.^{1,2}, Espindola, C. B.¹, Kelecom, A.³ e Silva, A. X.⁴

¹ Laboratório de Monitoramento de Efluentes Líquidos - LAMEL, Curso de Mestrado Profissional em Ciências do Meio Ambiente, Universidade Veiga de Almeida - UVA, Rua Ibituruna, 108, Tijuca, Rio de Janeiro, CEP 20.271-020, Brasil.

² Grupo Multidisciplinar de Radioproteção - GMR, Serviço de Radioproteção - SR, Coordenação de Radioproteção, Licenciamento e Salvaguardas – CPRAL.N, Fábrica do Combustível Nuclear -FCN, Indústrias Nucleares do Brasil – INB. Rodovia Presidente Dutra km 330 – Engenheiro Passos, CEP 27.555-000, Resende – RJ – Brasil.

³ Laboratório de Radiobiologia e Radiometria Pedro Lopes dos Santos - LARARA-PLS, Grupo de Estudos em Temas Ambientais - GETA, Universidade Federal Fluminense – UFF, C.P. 100436, CEP 24.001-970, Niterói, RJ, Brasil.

⁴ Programa de Engenharia Nuclear/COPPE, Departamento de Engenharia Nuclear/Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Caixa Postal 68.509 - Rio de Janeiro CEP 21941-972, Brasil.

RESUMO

O município de Santa Quitéria possui uma região rica em fosfato com urânio e tório associados, sendo caracterizada como região com *Naturally Occurring Radioactive Material* (NORM). Foram analisados os radionuclídeos naturais mais importantes para a dose efetiva comprometida da população (^{238}U , ^{226}Ra e ^{210}Pb na série do urânio, e ^{232}Th e ^{228}Ra da série do tório), logo mais importantes do ponto de vista de radioproteção ambiental e radioecológico. Foram analisadas as águas superficiais em seis pontos do entorno da jazida de fosfato e os resultados avaliados por análise estatística uni-variada e multi-variada para ordenação ambiental dos dados, utilizando a Análise de Componentes Principais (PCA) para identificar a relação entre as características dos dados. Foi utilizada a análise de agrupamento (*cluster*) como forma de corroborar ou refutar a ordenação feita pela PCA. Na análise uni-variada ficou patente as maiores concentrações de atividade dos elementos da série do urânio quando comparadas à série do tório. A PCA identificou três agrupamentos: um grupo reúne os dois pais das séries (^{238}U e ^{232}Th), outro grupo é formado pelo ^{226}Ra e ^{210}Pb e, por fim, o ^{228}Ra forma um grupo de um radionuclídeo só. Os grupos formados destoaram do comportamento ambiental conhecido desses radionuclídeos, pois a literatura descreve comportamentos distintos para urânio e tório, embora eles estejam agrupados nesta avaliação. Por outro lado, os isótopos de rádio (^{226}Ra e ^{228}Ra) deveriam ter o mesmo comportamento ambiental, mas estão em grupos diferentes. Já os ^{226}Ra e ^{210}Pb que deveriam ter comportamento diferentes, se encontram no mesmo grupo. Todas estas observações foram corroboradas pela análise de *cluster*. Tais agrupamentos anômalos precisam ser mais investigados nesta região para tentar explicar as razões dos radionuclídeos naturais estudados nos seis pontos da região NORM do Município de Santa Quitéria apresentarem comportamentos ambientais distintos daqueles normalmente encontrados na literatura.

1. INTRODUÇÃO

A região de interesse desse trabalho fica no município de Santa Quitéria, no Estado do Ceará, Brasil. A área é considerada como de *Naturally Occurring Radioactive Materials* – NORM, devido à existência de uma jazida de fosfato com urânio e tório associados.

Essa característica gera uma área onde os campos de radiação (CR) e as Concentrações de atividade (CA) dos radionuclídeos das séries naturais estão presentes em quantidades

¹ E-mail do autor principal: pereiraws@gmail.com

superiores às médias mundiais, sendo por isso, bons ambientes para o estudo da radioecologia e do comportamento dos radionuclídeos, pois via de regra os CR e as CA dos radionuclídeos naturais estão em quantidades mensuráveis com menor incerteza de medida que nas áreas de radioatividade natural, onde as incertezas das medidas são altas e em alguns casos os valores medidos ficam abaixo do limite de detecção, impossibilitando análises conclusivas.

A mineração de fosfato é reconhecida mundialmente como mineração NORM [1-3]. Várias fases do processo podem gerar Impacto Radiológico Ambiental (IRA) [1,2, 4-7], tanto na mineração [5 e 7], beneficiamento [6], armazenamento de rejeitos e resíduos [5-7] quanto na utilização do fosfato na agricultura [4].

A norma brasileira prevê a regulamentação radiológica da prática de mineração e beneficiamento do fosfato. Segundo norma [8], entende-se como ‘prática’ toda atividade humana que introduz fontes de exposição ou vias de exposição adicionais, que estende a exposição a mais pessoas, ou modifica o conjunto de vias de exposição devida a fontes existentes, de forma a aumentar a probabilidade de exposição de pessoas ou o número de pessoas expostas.

Assim sendo, para regulamentar a mineração NORM são necessários vários processos administrativos e autorizações do órgão regulador da energia nuclear no Brasil: a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). Esses requisitos constam em diversas normas [8–14] e outras normas vigentes, além das licenças de outros órgãos reguladores de outros aspectos ambientais e de mineração.

Um dos aspectos importantes do processo de licenciamento é o estabelecimento de uma linha de base, isto é, estabelecimento dos CR e CA no ambiente do entorno do futuro empreendimento, para poder realizar a comparação com as alterações que o empreendimento causará no ambiente após sua entrada em operação [9], e assim poder avaliar o IRA do empreendimento visando sua viabilidade e sustentabilidade ambiental do ponto de vista radiológico.

O presente trabalho visa avaliar o comportamento ambiental dos radionuclídeos naturais com influência no IRA que devido às suas características de radioproteção ambiental e radioecológicas (tipo de radiação emitida e energia da mesma, meia vida física, processos de absorção por organismos vivos, comportamento geoquímico, etc.).

A avaliação foi realizada antes da entrada em atividade do empreendimento, estabelecendo o comportamento ambiental dos radionuclídeos de interesse da série do urânio (^{238}U , ^{226}Ra e ^{210}Pb) e da série do tório (^{232}Th e ^{228}Ra). Para tanto foi utilizado a análise estatística uni-variada e multi-variada para agrupar os radionuclídeos segundo suas semelhanças ambientais, e suas CA em águas superficiais.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de Estudo

A jazida de fosfato de Santa Quitéria se localiza no município de mesmo nome, na região centro norte do Estado do Ceará, ver Figura 01. Possui reservas recuperáveis na ordem de nove milhões de toneladas de P_2O_5 e oitenta mil toneladas de U_3O_8 [15]. A região está sob influência

do clima “Bsh”, sendo caracterizada como região de clima semiárido, com estação chuvosa entre janeiro e maio, com chuvas esporádicas em junho-julho. A precipitação anual fica entre 550 e 960 mm[15]. Ecologicamente a área é caracterizada como um ecótono entre caatinga e cerrado, com incrustações de florestas tropicais e áreas de ocupação humana [3].

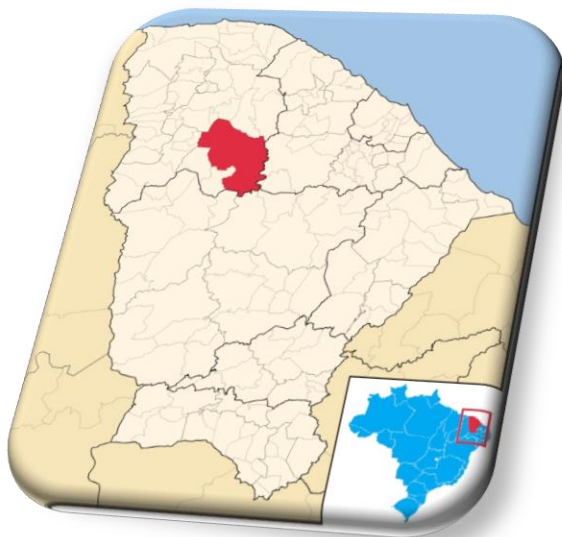


Figura 01 – Localização da área de estudo no Brasil e no Estado do Ceará.

2.2. Coleta e Preparação das Amostras

As amostras foram coletadas em seis pontos, mensalmente, durante 25 meses, de outubro de 2009 a dezembro de 2011. As coordenadas dos pontos amostrados podem ser visualizadas na Tabela 01. Cinco litros de água superficial foram coletados para realização das análises, sendo usado um litro por análise de cada radionuclídeo, exceto para o Ra que usou um litro para os dois isótopos e um litro como contra prova.

Tabela 01 – Coordenadas “UTM” dos pontos de coleta de águas superficiais nas circunvizinhanças da jazida de fosfato de Santa Quitéria.

Ponto de coleta	Coordenada “UTM” E	Coordenada “UTM” N
01	0408575	9495305
02	0409766	9496141
03	0415241	9495593
04	0413784	9493155
05	0410362	9494800
06	0411850	9494292

As amostras foram enviadas para a Laboratório de Química Inorgânica (LQI), Instituto de Química (IQ), Universidade Federal do Ceará (UFC), onde foram filtradas em filtros de porosidade de 0,45 µm. Os filtrados das amostras foram considerados as frações solúveis e as partes retidas pelo filtro consideradas frações particuladas.

Após filtração as amostras foram acidificadas com HNO₃ (conc.) na proporção de 1 ml·l⁻¹ e enviadas ao Laboratório de Monitoração Ambiental (LMA) da Unidade de Tratamento de Minérios (UTM) das Indústrias Nucleares do Brasil (INB) para determinação dos radionuclídeos. Para esta análise foi utilizado a soma das frações solúveis e particuladas como representando a concentração de atividade total dos radionuclídeos no ponto.

2.3. Análise de Radionuclídeos

Os radionuclídeos foram determinados conforme [16] para os isótopos de rádio (²²⁶Ra e ²²⁸Ra) e para o isótopo de chumbo analisado (²¹⁰Pb). Nesse caso foi feita uma separação radioquímica do rádio e do chumbo por co-precipitação seletiva dos rádios (²²⁶Ra e ²²⁸Ra) e do chumbo. O ²²⁶Ra foi analisado por radiometria alfa total e o ²²⁸Ra por radiometria beta total. O chumbo foi também analisado por radiometria beta total. Já o urânio (²³⁸U) e o tório (²³²Th) foram analisados usando o método do arsenazo e espectrofotometria [17].

2.4. Desenho Amostral e Preparação dos Dados

Os dados foram organizados de modo a formar uma matriz onde as colunas representam os pontos de coleta, data de coleta e radionuclídeos, e as linhas representam as CA de cada radionuclídeo indexado pelo ponto e data de coleta, resultando em uma matriz com 5 x 149 (para um dos pontos faltaram dados num mês de coleta) dados de CA, resultando em 745 dados de CA dos cinco radionuclídeos em seis pontos de coletas e 25 datas de coletas. Os dados foram analisados pelos programas Excel[®] 2007 e Minitab[®], versão 16.

2.5. Análise Estatística

2.5.1. Análise Uni-variada

2.5.1.1. Estatística Descritiva

Visando a caracterização radiológica da área foi realizada uma estatística descritiva por radionuclídeo, indiferente do ponto, contendo dados de média, erro padrão, desvio padrão, variância, número de amostras [18 e 19] e porcentagens de resultados com valores inferiores ao limite de detecção do método.

2.5.1.2. Comparação das Médias

Após as estatísticas descritivas foi realizada um teste “Z” de comparação das médias [18 e 19] para o ²³⁸U e ²³²Th, os cabeças das séries radioativas para verificar as diferentes contribuições de cada série e depois o mesmo teste entre os isótopos do rádio (²²⁶Ra e ²²⁸Ra) que, por serem isótopos, devem apresentar o mesmo comportamento ambiental.

2.5.2. Análise Multi-variada

Foi realizada uma abordagem multi-variada para caracterização radioecológica dos pontos, visando agrupar os pontos com maior semelhança de comportamento ambiental e diferenciar os pontos com diferenças de comportamento. Para tanto foi realizada uma Análise de Componente Principal (PCA, sigla em inglês) e em seguida, análise de cluster [21 e 22].

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Sumário dos Dados

As estatísticas descritivas dos radionuclídeos naturais na região da jazida de Santa Quitéria podem ser visualizadas na Tabela 01 e a representação gráfica das médias pode ser visualizada na Figura 02.

Tabela 01 – Estatísticas descritivas dos radionuclídeos analisados na região da jazida de Santa Quitéria.

Parâmetro	Média (Bq·l ⁻¹)	Desvio Padrão	N	L.D. (%) ¹
²³⁸ U	0,1045	0,09609	149	0
²³² Th	0,0069	0,02613	149	0
²²⁶ Ra	0,0538	0,05483	149	0
²²⁸ Ra	0,0026	0,00476	149	66%
²¹⁰ Pb	0,0577	0,05092	149	3%

¹ - Porcentagem de amostras que apresentaram valores menores que o limite de detecção do método empregado

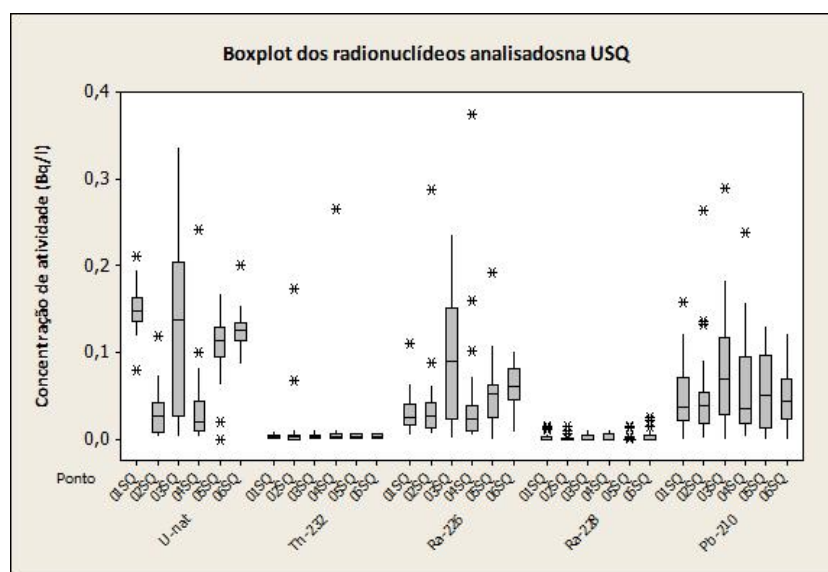


Figura 02 – Média da concentração de atividade, por ponto, de cada radionuclídeo analisado na região de Santa Quitéria, Ceará.

Em primeira análise pode ser visualizada uma menor concentração de atividade dos radionuclídeos da série do ²³²Th em comparação com os da série do ²³⁸U. Essa avaliação preliminar serve tanto para os pais da série do urânio e do tório (respectivamente ²³⁸U e ²³²Th) como para os isótopos de rádio das séries (respectivamente ²²⁶Ra e ²²⁸Ra).

As médias das concentrações de atividade (Bq·l⁻¹) podem ser visualizadas na Figura 02 para todos os radionuclídeos. Nessa figura observa-se que as concentrações de atividade dos

radionuclídeos da série do urânio (^{238}U ; ^{226}Ra e ^{210}Pb) são *de visu* mais altos que os da série do tório (^{232}Th e ^{228}Ra).

3.2. Comparações das Médias

3.2.1. Comparação entre as Médias do Urânio e do Tório

Para comparação entre as médias dos radionuclídeos ^{238}U e ^{232}Th , foi usado o teste Z. Este resultou em um valor de 3,83, superior ao Z crítico bicaudal que foi de 1,96, sendo associado a um P de $1,28 \cdot 10^{-3}$. Logo a CA média do urânio, estimada em $0,11 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$, foi considerada estatisticamente diferente (isto é, maior) que a concentração de atividade média do Th, que foi estimada em $0,007 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$. Esta avaliação estatística corrobora a avaliação visual preliminar dos dados feita com base na Figura 02.

Essa informação aponta para uma maior concentração de atividade dos elementos da série do urânio em comparação à série do tório. Essa afirmação será verificada na avaliação dos isótopos de rádio, pois o de número de massa atômica 226 pertence à série do urânio e o de número de massa atômica 228 pertence à série do tório.

3.2.2. Comparação entre as Médias dos Isótopos de Rádio (^{226}Ra e ^{228}Ra)

Entre os isótopos de rádio também houve diferenças das concentrações de atividade nas águas superficiais da região de Santa Quitéria. O valor de “Z” neste caso foi de 11,35, superior ao “Z” crítico bicaudal de 1,96, associado a um P tendendo a zero. Neste caso a concentração de atividade média do ^{226}Ra ($0,054 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$) foi considerada diferente (isto é, maior) que as concentrações de atividade do ^{228}Ra ($0,003 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$).

Esta avaliação estatística corrobora a avaliação visual preliminar dos dados que foram feitas com base na Figura 02 e a afirmação de superioridade das CA dos elementos da série do urânio feitas no parágrafo anterior.

3.3. Análise Multi-variada

3.3.1. Análise de Componente Principal (PCA)

O PCA identificou três grupos de radionuclídeos. O primeiro composto pelos pais das séries do urânio e tório (^{238}U e ^{232}Th , respectivamente); o segundo grupo composto pelo ^{226}Ra e pelo ^{210}Pb e por fim o ^{228}Ra isolado dos demais radionuclídeos. Essa avaliação pode ser visualizada na Figura 03, abaixo.

Esse agrupamento é diferente do que é citado pela literatura [23 - 25] onde urânio e tório têm comportamento ambiental distintos e os isótopos de Ra comportamento idênticos.

Esse comportamento diferente do apresentado na bibliografia deve ser melhor estudado, provavelmente utilizando-se das frações solúvel e particulada para uma avaliação mais detalhada de cada radionuclídeo e seu comportamento nas águas superficiais dessa área de alta radioatividade ambiental (área NORM). Além disso, um número maior de dados deve ser adquirido para uma análise mais robusta. Técnicas analíticas diferentes devem ser utilizadas para o ^{228}Ra para evitar o grande número (66 %, ver Tabela 02) de valores de CA abaixo do limite de detecção, podendo ser técnicas mais sensíveis ou uma pré-concentração do material.

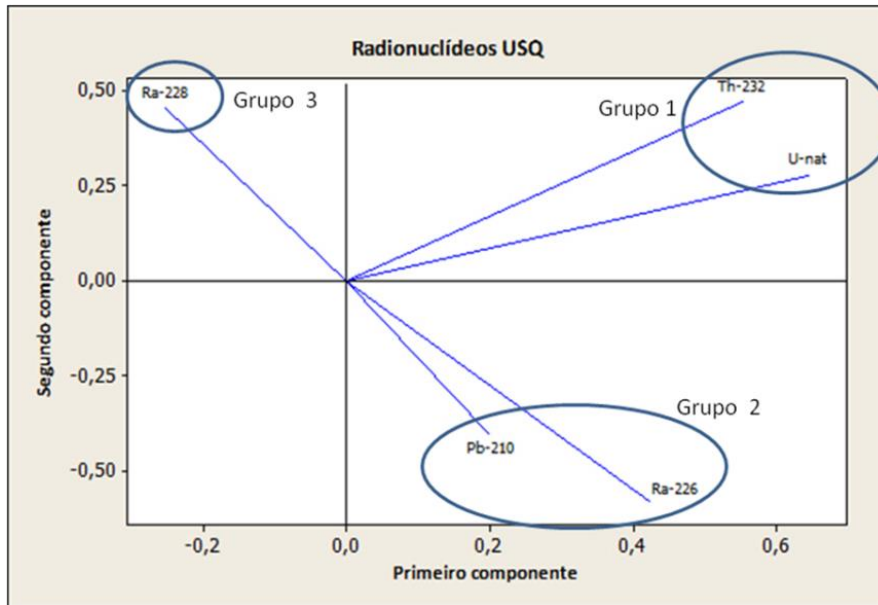


Figura 03 – Agrupamentos dos radionuclídeos, em águas superficiais na região de Santa Quitéria, Ceará, segundo método da Análise do Componente Principal - PCA.

3.3.2. Análise de Agrupamento (*cluster*)

A análise de agrupamento (*cluster*) corroborou os grupos identificados pelo PCA, conforme pode ser visto na Figura 04, abaixo. Esta avaliação confirma o que foi dito para os grupos no tópico anterior. Urânio e tório, que deveriam ter comportamentos distintos [23 - 25] apresentam comportamentos ambientais similares. Similarmente, os isótopos do rádio que deveriam ter comportamentos similares, apresentam comportamentos distintos [23 -25].

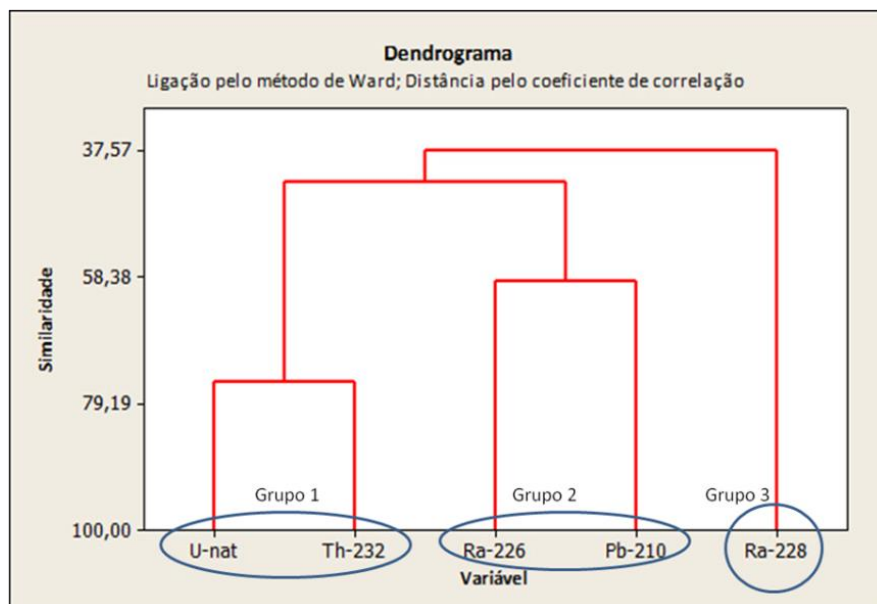


Figura 04 – Análise de agrupamento (*Cluster analysis*) dos radionuclídeos em águas superficiais na região de Santa Quitéria Ceará.

4. CONCLUSÕES

Com base na análise dos dados avaliados, é possível concluir que, nas águas superficiais da região de Santa Quitéria:

- 1) A CA do ^{238}U foi maior que a do ^{232}Th ; e
- 2) A CA do ^{226}Ra foi maior que a do ^{228}Ra ;

Com base nessas afirmações acima pode-se concluir que os radionuclídeos relevantes do ponto de vista radioecológico e de radioproteção ambiental da série do urânio estão presentes em CA maiores que os da série do tório.

Ainda pode-se inferir que:

- 3) O agrupamento dos radionuclídeos pais das séries (^{238}U e ^{232}Th), mesmo com CA diferentes, apresentam o mesmo comportamento ambiental, diferente do comportamento descrito em [23-25]; e que
- 4) Os isótopos de rádio que, segundo a [23-25], deveriam possuir o mesmo comportamento ambiental, apresentam diferenças nesse comportamento.

Este último fato pode ser, teoricamente, creditado ao grande número de valores abaixo do limite de detecção observados para o ^{228}Ra (66%), podendo, portanto, introduzir uma distorção da realidade. Isso pode ser resultado da metodologia usada na determinação do ^{228}Ra .

Concluindo, os radionuclídeos da série do urânio se encontram em CA maiores que os da série do tório e o comportamento ambiental desses radionuclídeos nas águas superficiais da região de Santa Quitéria são diferentes do encontrado em [23-25]. Mais estudos devem ser realizados para corroborar ou refutar essas afirmações.

Finalmente, faz-se mister a necessidade de alterar do método analítico do ^{228}Ra , que apresentou dois terços dos valores abaixo do limite de detecção.

4. REFERÊNCIAS

1. International Atomic Energy Agency, Management of Radioactive Waste from the Mining and Milling of Ores, Safety Standards Series No. WS-G-1.2, ed. IAEA, Vienna, 48 pp, (2002).
2. International Atomic Energy Agency and International Labour Office, Occupational Radiation Protection in the Mining and Processing of Raw Materials, Safety Standards Series No. RS-G-1.6, Ed. IAEA, Vienna, 104 pp, (2004).
3. Pereira, W.S., Kelecom, A. & Pereira, J. R. S. "Analysis of Radium Isotopes in Surface Waters nearby a Phosphate Mining with NORM at Santa Quitéria, Brazil," *Journal of Environmental Protection*, **Vol. 5**, No. 3, pp. 193-199. (2014), doi: [10.4236/jep.2014.53023](https://doi.org/10.4236/jep.2014.53023).
4. Ashraf, E. M., Khater, H. A. & Sewaidan, A. L., "Radiation Exposure Due to Agricultural Uses of Phosphate Fertilizers," *Radiation Measurements*, **Vol. 43**, No. 8, pp. 1402-1407. (2008). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.radmeas.2008.04.084>.
5. Rutherford, P. M., Dudas, M. J. & Arocena, J. M. "Radio-Activity and Elemental Composition of Phosphogypsum Produced from Three Phosphate Rock Sources," *Waste Management & Research*, **Vol. 13**, No. 5, pp. 407-423 (1995).

6. Beddow, H., Black, S. & Read, D. “Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) from a Former Phosphoric Acid Processing Plant,” *Journal of Environmental Radioactivity*, **Vol. 86**, No. 3, pp. 289-312. (2006). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2005.09.006>.
7. Othman, I., & Al-Masri, M. S., “Impact of Phosphate Industry on the Environment: A Case Study,” *Applied Radiation and Isotopes*, **Vol. 65**, No. 1, pp. 131-141, (2007). DOI <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2006.06.014>
8. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Norma CNEN-NN-3.01: “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica,” Ed. CNEN, RJ, p. 34, (2005a)
9. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, “Posição Regulatória 3.01/008: 2011: Programa de Monitoração Radiológica Ambiental,” Ed. CNEN, RJ, p. 5, (2011a).
10. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, “Posição Regulatória 3.01/009 :2011: Modelo para Elaboração de Relatórios de Programa de Monitoração Radiológica Ambiental,” Ed. CNEN, RJ, p. 5, (2011b).
11. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Norma CNEN-NN-4.01: Requisitos De Segurança E Proteção Radiológica Para Instalações Mínero-Industriais. Ed. CNEN, RJ, 19 pp, (2005b).
12. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Norma CNEN-NE-3.02: Serviços de Radioproteção, Ed. CNEN, RJ, 17 pp, (1988)
13. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Norma CNEN-NN-8.01: Gerência De Rejeitos Radioativos De Baixo E Médio Níveis De Radiação, Ed. CNEN, RJ, 45 pp, (2014).
14. Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN, Norma CNEN-NE-8.02: Licenciamento De Depósitos De Rejeitos Radioativos De Baixo E Médio Níveis De Radiação, Ed. CNEN, RJ, 32 pp, 2014
15. J. R. Silva, “Caracterização Hidrogeológica da Jazida de Itaitaia,” Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2003, p. 126.
16. Godoy, J. M., Lauria, D. C., Godoy, M. L. D. P. & Cunha, R. P., “Development of a Sequential Method for Determination of ^{238}U , ^{234}U , ^{232}Th , ^{230}Th , ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra and ^{210}Pb in Environmental Samples,” *Journal of Radio-Analytical Nuclear Chemistry*, **Vol. 182**, No. 1, pp. 165-169, (1994). DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02047980>.
17. Savvin, S. B., “Analytical Applications of Arsenazo III—II: Determination of Thorium, Uranium, Protactinium, Neptunium, Hafnium and Scandium,” *Talanta*, **Vol. 11**, No. 1, pp. 1-6, (1964). DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0039-9140\(64\)80003-5](http://dx.doi.org/10.1016/0039-9140(64)80003-5).
18. Ceteno, A. J. “Curso de Estatística Aplicada a Biologia,” Ed. Da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, pp. 188 (1999).
19. Arango, H. G., “Bioestatística: Teórica e Computacional Com Bancos de Dados Reais em Disco,” 3rd Edition, Ed. Guanabara & Koogan, pp. 438, (2009).
20. Ferreira, D. F. “Estatística Multivariada,” Editora da UFLA, Lavras, p. 650 p, (2008).
21. Valentin, J. L. “Ecologia Numérica. Uma Introdução a Análise Multivariada de Dados Ecológicos,” Ed. Interciência, Rio de Janeiro, pp. 117, (2000).
22. Gotelli, N. J. & Ellison, A. M., “A Primer of Ecological Statistic,” Ed. Sinauer Associates, Sunderland, pp. 510, (2004).
23. Lauria, D. C. Martins, N. S. & Zenaro, R., “Monitoração Radiológica Ambiental”. CNEN, IRD, Coleção IRD, **V. 01**, N. 01. pp 166, (2007).
24. Rochedo, E. R.R. Amaral, E. C. S. Godoy, J. M. e Warsserman, M. A. V., “Avaliação de impacto radiológico ambiental. Parte 1 - Liberações rotineiras”. Ed; Instituto de Radioproteção e Dosimetria, pp. 141. (2004)
25. Klement, A. W. “CRC handbook of Environmental Radiation”. Edição: Allen Brodsky. Boca Raton, Florida, Florida: CRC Press, pp. 475, (1982).