



Natural Radiation in Byproducts of the Production of Phosphoric Acid

M. A. G. da Silveira^a; L. L. Cardoso^a; N. H. Medina^b

^a *Physics Department, Centro Universitário da FEI, CEP: 09850-901, S. B. do Campo- São Paulo - Brasil*

marcilei@fei.edu.br

^b *Physics Department, Instituto de Física da USP, 05314-970, Cidade Universitária - São Paulo - S.P. - Brasil*

ABSTRACT

Natural radiation is the largest source of radiation exposure to which man is subject. It is formed basically by cosmic radiation and the radionuclides present in the Earth crust, as ^{40}K and the elements of the decay series of ^{232}Th and ^{238}U . Phosphate ores, which constitutes the raw material for the production of phosphoric acid, have a high rate of natural radiation from the decay series of ^{232}Th and ^{238}U . Phosphogypsum, which is naturally radioactivity, is a by-product of the production of phosphoric acid by the wet method. For each ton of phosphoric acid it is produced about 4.5 tons of phosphogypsum. This work presents the analysis of samples collected in all stages of the manufacturing process of phosphoric acid, which generates the phosphogypsum. Gamma-ray spectrometry was used to measure the concentration of the elements of the decay series of ^{232}Th and ^{238}U . All analyzed samples showed a high concentration of radionuclides, promoting the need for further steps in the process in order to reduce the presence of such radionuclides in the phosphogypsum. The results indicate the radionuclide ^{238}U has higher contribution in some samples of the intermediate stages of the process. All samples exceeded the international average range of human exposure to terrestrial gamma radiation, which is 0.3 to 1.0 mSv/year.

Keywords: Radiação Natural, Espectrometria gama, Relação dose

1. INTRODUÇÃO

1.1. Radiação Natural

A radiação natural provém tanto de fontes cósmicas como terrestres, enquanto que a artificial é produzida pelo ser humano. A radiação cósmica consiste de partículas de altíssima energia que

bombardeiam a Terra (múons, prótons, fótons, elétrons, nêutrons e píons). A quantidade de radiação cósmica varia com a altitude, sendo que ao nível do mar existe uma maior concentração de múons que contribuem para a taxa de dose equivalente (UNSCEAR,2008). Outra componente de radiação natural provém de radionuclídeos presentes no solo que possuem vida-média da ordem de centenas até bilhões de anos, como é o caso do potássio (^{40}K), e os elementos da cadeia do urânio (^{238}U) e tório (^{232}Th). Tais elementos apresentam diferentes concentrações, dependendo do tipo de solo da região. A radioatividade do potássio é proveniente do seu isótopo ^{40}K , o qual decai principalmente (89,3%) por β^- para o núcleo estável ^{40}Ca e por captura eletrônica e emissão de raios gama com energia de 1,46 MeV (10,7%) para o núcleo estável ^{40}Ar , sendo muito comum encontrá-lo em solos e minerais, uma vez que a sua vida-média é da ordem de 109 anos. Os isótopos ^{232}Th e $^{235-238}\text{U}$ fazem parte de séries radioativas onde um núcleo “pai” decai em um núcleo “filho”, também radioativo. Este processo continua até que um núcleo da série seja estável, $^{208-206}\text{Pb}$, o que produz, em média, 40 radionuclídeos instáveis. A exposição humana à radiação ocorre a partir de fontes externas e também por decaimento de elementos radioativos no interior do corpo humano, através de sua ingestão e/ou inalação. Para fins de proteção radiológica, a grandeza física que deve ser usada é o equivalente de dose $H = QD$, sendo D a dose absorvida medida em gray (Gy), $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ e Q é o fator de qualidade da radiação (no caso de fótons e elétrons $Q = 1$). Portanto, numericamente, o valor de dose absorvida será o mesmo que equivalente de dose. Para ser obtida a taxa de dose absorvida devida à radiação de raios gama que incide no corpo de fora para dentro (exposição externa) é necessário o conhecimento dos radionuclídeos que emitem raios gama. Nesse cálculo devemos considerar os coeficientes de conversão de Bq/kg para a taxa de dose em nGy/h para cada um dos radionuclídeos, a saber: 0,0417 (nGy/h)/(Bq/kg) para o ^{40}K , 0,462 (nGy/h)/(Bq/kg) para os nuclídeos da série do ^{238}U e 0,604 (nGy/h)/(Bq/kg) para os nuclídeos da série do ^{232}Th (UNSCEAR,2008). Os valores das taxas de radioatividade presentes nos solos em Bq/kg são obtidos diretamente dos espectros de raios gama, conhecendo-se a eficiência absoluta do detector utilizado ou então, conhecendo-se a atividade de uma amostra padrão. Para transformar a dose absorvida no ar em dose efetiva, deve-se levar em conta também o fator de conversão para radiação gama externa terrestre que é de 0,7 Sv/Gy.

1.2. Rejeitos Naturalmente Radioativos

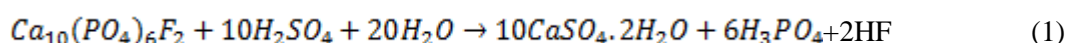
O Brasil conta com reservas de rocha fosfática de 317 milhões de toneladas, que estão localizadas principalmente nos estados de Minas Gerais (68%), Goiás (14%) e São Paulo (6%) (MAZZILLI, 2000). No país, a maior parte das jazidas, cerca de 80%, é de origem ígnea (ou magmática). As reservas de rochas sedimentares estão localizadas principalmente na região de Pernambuco, mas também podem ser encontradas no estado de Minas Gerais. Tanto as rochas fosfáticas de origem ígnea, quanto as rochas de origem sedimentar, apresentam teores de pentóxido de fósforo (P_2O_5) bastante variáveis, em média 12% e 17%, respectivamente. Os principais minérios de fosfato do Brasil são a apatita e a fosforita que ocorrem principalmente no sudeste e no nordeste, respectivamente. Os minérios de fosfato possuem alto índice de radiação natural provenientes das séries de decaimento do ^{238}U e ^{232}Th , de forma que as concentrações variam de acordo com o tipo de rocha. As rochas sedimentares apresentam altas concentrações de urânio e baixas concentrações de tório, enquanto que rochas de origem ígnea contêm baixas concentrações de urânio e altas concentrações de tório e terras raras (UNSCEAR, 2008). Dessa forma, a extração e processamento da rocha fosfatada, bem como os seus produtos e subprodutos, podem ser fontes de urânio, tório e de radionuclídeos decorrentes de suas séries de decaimento, o que motiva um maior aprofundamento das pesquisas e revalida sua importância tendo em vista os efeitos que o aumento da dose de exposição à radiação presente no meio pode acarretar à saúde humana.

Fosfogesso é o nome que se dá ao gesso de origem química gerado no processo de fabricação de ácido fosfórico, (H_3PO_4), matéria-prima utilizada na fabricação de fertilizantes fosfatados de alta concentração. Em função do processo de produção do H_3PO_4 , atualmente empregado, ser pouco eficiente, no tocante à geração de subprodutos, para cada tonelada de ácido produzido gera-se 4,5 toneladas de fosfogesso, representando desta forma um grande passivo ambiental para as empresas. As demandas agrícolas mundiais cada vez maiores são as verdadeiras responsáveis pelo surgimento de um problema ambiental. Ou seja, é necessário um destino para este rejeito da produção de fertilizantes já que o fosfogesso, atualmente, em sua grande parte, está armazenado em aterros expostos às intempéries. Devido à presença de radionuclídeos, o fosfogesso é classificado internacionalmente como TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occuring Radi-

oactive Material), ou seja; é um resíduo sólido que contém elementos radioativos de ocorrência natural provenientes da rocha matriz (UNSCEAR,2008). Esses resíduos podem infiltrar-se através da pilha e contaminar o solo e águas subterrâneas, que eventualmente podem causar danos à saúde humana. Além da presença de radionuclídeos naturais, as pilhas de fosfogesso podem conter elementos tais como: arsênio, chumbo, cádmio, cromo, flúor, zinco, antimônio, cobre e em concentrações que podem representar riscos significativos para a saúde.

Sendo o Brasil um importante produtor de fertilizantes fosfatados, existe o risco de contaminação interna e de exposição à radiação gama para os trabalhadores da área de produção de ácido fosfórico, pois esses funcionários estão em contato constante com a rocha fosfática, com os rejeitos gerados no processo e, portanto, ao fosfogesso. Como a rocha se encontra sob a forma de um pó finamente dividido, há o risco de inalação de poeira contendo radionuclídeos em todos os locais da área de produção onde se encontra o pó espalhado. Além disso, os trabalhadores estão expostos à radiação gama proveniente dos radionuclídeos presentes tanto na rocha fosfática, como no fosfogesso, principalmente nos locais onde estes materiais ficam estocados. Assim, torna-se muito importante encontrar formas economicamente viáveis de aproveitamento desses resíduos, visando à diminuição dos riscos para os trabalhadores, bem como os benefícios sociais e econômicos advindos do uso deste material, especialmente na preservação do meio ambiente.

Diante dessas considerações relacionadas à saúde, política e meio ambiente, este trabalho tem como objetivo avaliar a concentração de elementos químicos presentes em todas as amostras das etapas do processo de fabricação do ácido fosfórico das indústrias VALE fertilizantes S.A. O fosfogesso é gerado no processo de fabricação de fertilizantes, em que a rocha fosfática é atacada por ácido sulfúrico resultando em fosfogesso e em ácido fosfórico, que é a base dos fertilizantes fosfatados. Este subproduto é geralmente descartado em aterros específicos e esse descarte somente ocorre após o preparo do terreno. A reação química que gera o fosfogesso como rejeito final é mostrada na equação (1).



O imenso volume de fosfogesso produzido anualmente vem merecendo a atenção de órgãos de proteção radiológica e das agências de proteção ambiental mundiais, dada a sua potencialidade de contaminação do meio ambiente. No Brasil, este material vem sendo utilizado há várias décadas; em especial, para consumo agrícola. Nesse caso, o fosfogesso é aplicado como fonte de cálcio e enxofre; como condicionador de subsuperfície e para correção de solos saturados com sódio, potássio ou alumínio. Existem algumas possibilidades de aplicação deste material, como por exemplo: na construção civil, no intuito inclusive de reduzir custos na construção de moradias (CANUUT,2006) ou na pavimentação de ruas; na agricultura, como remediador das características físico-químicas do solo (ERNANI, 2001); no tratamento de efluentes (CANUUT, 2006), entre outros.

No processo físico e químico industrial da extração de ácido fosfórico a partir de rochas fosfáticas são gerados vários outros materiais de rejeito, os quais muitas vezes são reaproveitáveis (PEREIRA, 2014). Este estudo visa analisar a radiação natural devido a radiação gama presente em cada uma das amostras geradas em todas as fases do processo de extração do ácido fosfórico, resultando por último o rejeito TENORM: fosfogesso (UNSCEAR, 2008). Desta forma, é possível verificar em qual ou em quais fases do processo é necessário fazer alterações para aumentar a eficiência do processo, tendo controle da concentração de radionuclídeos presentes nas amostras de cada fase.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Sistema de aquisição de dados

Para a determinação da concentração de radionuclídeos naturais presentes nas 13 amostras coletadas nas etapas de processo físico e químico de extração de ácido fosfórico da indústria VALE Fertilizantes S.A., foi utilizado um sistema de espectrometria de raios gama, que consta de um detector cintilador de raios gama de NaI(Tl). As taxas de radiação efetivas foram avaliadas e comparadas aos limites estabelecidos pelo “United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation” e “Organization for Economic Co-operation and Development (OECD, 1979). As medidas foram realizadas no Laboratório de Física de Radiações do Centro Universitário da FEI, o qual está adequado para possibilitar a aquisição e análise dos dados de radiação natural de solos. O equipamento de aquisição de dados é composto por blindagem de chumbo, detector de NaI(Tl), sistema eletrônico e um programa de aquisição e análise de dados específico para espectroscopia gama (vide figuras 1-a e 1-b). O sistema eletrônico é o UNISPEC, que é um sofisticado sistema analisador que inclui alta-tensão, pré-amplificador, estabilizador, conversor analógico-digital e memória, tudo contido em um dispositivo compacto com entrada USB. O programa de aquisição automática e de análise de dados, GENIE 2000 utiliza a plataforma Windows, e também possibilita gerar uma Tabela de dados do tipo canal/contagem e energia/contagem, que pode ser processada em qualquer programa de análise de dados (SILVEIRA, 2008). Esta automatização permite que seja possível determinar qual é o melhor intervalo de tempo de aquisição de dados para cada tipo de amostra, de maneira que a aquisição seja realizada de uma forma mais sistemática. O sistema detector-amostra é isolado pela blindagem de chumbo para minimizar o efeito de qualquer outra radiação de fundo presente no ambiente que não seja a da amostra (SILVEIRA,2008; SILVEIRA, 2010; MEDINA, 2013).



Figura 1 – Equipamento de medidas de radiação natural composto por detector de NaI(Tl), blindagem de chumbo e eletrônica específica (a). Em (b) é possível observar a blindagem com porta aberta, onde é colocada a amostra para a coleta de dados.

2.2 Preparo das amostras

Para a análise de dados por espectrometria de raios gama, cada uma das amostras foi homogeneizada. Inicialmente, as amostras foram submetidas ao aquecimento em uma estufa à 100°C por um período de 24 horas, em refratários de vidro esterilizados com álcool etílico 92,8° INPM, e recobertos com papel alumínio. Após este tratamento térmico de secagem, a amostra passou por um processo de granulação, sendo peneiradas e armazenadas em potes plásticos sendo devidamente lacradas, pesadas, e identificadas (SILVEIRA,2008; SILVEIRA, 2010; MEDINA, 2013).

2.3 Espectrometria de raios gama

Os núcleos radioativos estão constantemente emitindo energia de diversas formas, desde a emissão de partículas α e β , até energia eletromagnética de alta energia, os raios gama. Esses núcleos emitem estas energias por serem instáveis, refletindo em uma série de decaimentos desses radio-núclídeos, iniciada pelos núcleos “pai” passando pelos núcleos “filhos” até que se tornem núcleos estáveis. Os elementos radioativos podem decair de diferentes formas de energia e em diferentes tempos de decaimento, que são representadas de acordo com a vida-média de cada elemento.

Neste estudo, os núcleos radioativos ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th , que possuem vidas-médias comparáveis com a idade da terra, são os que efetivamente contribuem para as medidas. O ciclo de decaimento dos radionuclídeos ^{238}U e ^{232}Th está em equilíbrio em ambientes naturais, porém durante a reação do ácido sulfúrico com a rocha fosfática, ocorre a quebra desse equilíbrio radioativo, devido à semelhança química entre os átomos de rádio e cálcio, que pertencem a mesma família 2A da Tabela periódica, o rádio passa a se agregar preferencialmente aos sulfatos gerando o precipitado de sulfato de rádio, enquanto que o urânio, tório e o chumbo são primeiramente redistribuídos no ácido fosfórico (MAZZILLI, 2000).

Neste trabalho foram utilizados padrões certificados pela IAEA (International Atomic Energy Agency) cujos valores estão apresentados na Tabela 1

Tabela 1. Valores de massa, atividade e Concentração das amostras padrão da IAEA (International Atomic Energy Agency).

Padrão	IAEA		
	Massa (g)	Atividade (Bq)	Concentração (g/kg)
K ₂ SO ₄ (IAEA-RGK-1)	201(6)	1428(4)	89,9(6)
U-ore (RGU-1)	170(5)	848(4)	0,400(2)
Th-ore (IAEA-RGTh-1)	190(6)	614(12)	0,800(2)

Através da técnica de espectrometria de raios gama, foram obtidos os espectros referentes aos radioisótipos ^{40}K , ^{238}U e ^{232}Th durante um intervalo de tempo necessário para que a incerteza percentual relativa de cada pico de emissão de raios gama fosse suficientemente pequena. O pico de raios gama de 1460 keV é emitido do decaimento do ^{40}K , o pico de 1764 keV é emitido no decaimento radioativo do ^{214}Bi , da série do ^{238}U , e o pico de raios gama de 2614 keV é emitido no decaimento radioativo do ^{208}Tl , da série do ^{232}Th . Para o cálculo a atividade de uma amostra, bem como para determinar a concentração dos elementos radioativos presentes nas amostras, foram utilizados padrões dos elementos ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , que são de interesse neste estudo, pois a atividade das amostras padrão é calculada com base no tempo da vida-média do radionuclídeo (SILVEIRA, 2008). A quantificação da área dos picos de emissão de

raios gama de interesse é feita por um ajuste gaussiano, que por sua vez é subtraído da contribuição da radiação de fundo. Com estes dados é possível determinar a atividade de cada elemento radioativo presente nas amostras (MAZZILLI, 2000; SILVEIRA, 2008; SILVEIRA, 2010; MEDINA, 2013). Nas amostras verificou-se que a presença de ^{40}K é insignificante, de forma que seu teor está abaixo dos limites de detecção do equipamento.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como pode ser observado na Tabela 2, durante o processo de produção que gera o subproduto fosfogesso, a atividade do radionuclídeo ^{232}Th é muito maior que a atividade do ^{238}U . O radionuclídeo ^{238}U apresenta maiores valores nas amostras Lama Fina, Lama Final, Rejeito Final Barita e nos Concentrados final ultrafino e final de sílica. A atividade do ^{232}Th é bem relevante nas amostras Lama Fina e Lama Final. Os valores de atividade do radionuclídeo ^{238}U , em todas as amostras analisadas, se encontram abaixo da faixa estabelecida pela USEPA-EUA, em que o fosfogesso destinado ao uso agrícola deve apresentar atividade por volta de 370 Bq/kg (USEPA, 2010). Em relação ao ^{232}Th , apenas três amostras encontram-se abaixo desta faixa, enquanto que o restante das amostras apresentam valores bem acima do estabelecido, tendo como ressalva porém, que essa faixa é estabelecida para o radionuclídeo ^{226}Ra , proveniente da cadeia do Urânio, servindo como base de análise apenas para o ^{238}U , de forma que não há nenhuma norma que estabeleça o valor limite de atividade para o ^{232}Th .

Tabela 2. Atividade das amostras do processo de produção do fosfogesso cedidas pela Vale Fertilizantes S.A.

Amostras	Atividade (Bq/kg)	
	²³⁸ U	²³² Th
Lama Fina	250,4 ± 8,5	959 ± 23
Concentrado Final Ultrafino	283,7 ± 8,7	387 ± 11
Rejeitado Final Grosso	161,5 ± 9,3	534 ± 14
Alimentação da Usina	204 ± 10	690 ± 17
Lama Final	290 ± 14	965 ± 24
Rejeito Final Ultrafino	207 ± 17	839 ± 21
Rejeito Separação magnética alta Intensidade	195,9 ± 7,7	460 ± 12
Concentrado Final de Sílica	320 ± 11	552 ± 15
Rejeito Final	178 ± 10	546 ± 15
Rejeito Separação Magnética Baixa Intensidade	114,5 ± 5,1	334,4 ± 8,5
Rejeito Final Barita	270,2 ± 9,1	414 ± 12
Concentrado Final	228,7 ± 7,5	500 ± 12
Concentrado final barita	244,9 ± 6,4	166,1 ± 5,8
Fosfogesso Expedição	131,4 ± 9,1	182 ± 12

Na Tabela 3 são apresentados os valores de dose efetiva encontrados para cada uma das amostras analisadas nas 13 etapas do processo de extração do ácido fosfórico.

Tabela 3. Valores de dose efetiva das amostras coletadas nas fases do processo de produção do ácido fosfórico.

Amostras	Dose Efetiva (mSv/ano)		
	²³⁸ U	²³² Th	Total
Lama Fina	0,71 ± 0,02	3,60 ± 0,10	4,30 ± 0,10
Concentrado Final Ultrafino	0,80 ± 0,02	1,43 ± 0,04	2,24 ± 0,05
Rejeito Final Grosso	0,46 ± 0,03	1,98 ± 0,05	2,44 ± 0,06
Alimentação da Usina	0,58 ± 0,03	2,56 ± 0,06	3,13 ± 0,07
Lama Final	0,82 ± 0,04	3,60 ± 0,10	4,40 ± 0,10
Rejeito Final Ultrafino	0,59 ± 0,05	3,11 ± 0,08	3,70 ± 0,10
Rejeito separação magnética alta intensidade	0,55 ± 0,02	1,70 ± 0,04	2,26 ± 0,05
Concentrado Final de Sílica	0,91 ± 0,03	2,05 ± 0,06	2,95 ± 0,07
Rejeito Final	0,50 ± 0,03	2,02 ± 0,06	2,53 ± 0,06
Rejeito Separação Magnética Baixa Intensidade	0,32 ± 0,01	1,24 ± 0,03	1,56 ± 0,03
Rejeito Final Barita	0,77 ± 0,03	1,53 ± 0,04	2,30 ± 0,05
Concentrado Final	0,65 ± 0,02	1,85 ± 0,05	2,50 ± 0,05
Concentrado final barita	0,69 ± 0,02	0,62 ± 0,02	1,31 ± 0,03
Fosfogesso Expedição	0,37 ± 0,03	0,68 ± 0,04	1,05 ± 0,05

Observando os valores apresentados na Tabela 3 é possível afirmar que todas as amostras extrapolaram a faixa da média internacional de exposição do ser humano à radiação gama terrestre, que é de 0,3 a 1,0 mSv/ano, destacando-se as amostras Lama Fina e Lama Final que apresentaram valores de 4,3 e 4,4 mSv/ano.

4. CONCLUSÕES

Através das análises realizadas nas amostras do processo de produção do ácido fosfórico, que têm como subproduto o fosfogesso, obteve-se o mapeamento da radiação natural proveniente aos radionuclídeos ^{232}Th e ^{238}U . A presença de ^{232}Th nas amostras foi mais significativa que a do radionuclídeo ^{238}U . Nesta perspectiva de análise, as etapas mais críticas em relação à atividade foram Lama Fina e Lama Final, que apresentaram valores acima da faixa estabelecida pela USE-PA-EUA que é de 370 Bq/kg, tendo como ressalva, porém, que essa vigência é certificada para o ^{226}Ra , não coexistindo nenhuma legislação brasileira para avaliação específica de cada radionuclídeo, incluindo os elementos da série do ^{232}Th . Vale ressaltar que, de acordo com a resolução no 147/2013 publicada em 25/03/2013, ficam estabelecidos limites pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), apenas para o uso de fosfogesso da agricultura ou indústria cimenteira (PROCEDIMENTO, 2014). Em relação à dose efetiva total, todas as amostras do processo apresentaram valores acima dos valores médios de exposição externa que está entre 0,3 e 1,0 mSv/ano, destacando-se novamente a Lama Fina e Lama Final que apresentam valores mais altos de 4,4 e 4,3 mSv/ano, respectivamente. Com os resultados obtidos, faz-se necessário e eminente uma maior atenção ao que diz respeito ao armazenamento, descarte ou reutilização de tais amostras, pois as mesmas além de acarretar um aumento da exposição a qual a população está sujeita, sendo um produto contaminante de solos e águas nos locais de estocagem, juntamente com maiores riscos para os trabalhadores que as manuseiam e ficam diretamente expostos às atividades dos radionuclídeos e seus efeitos. Portanto, o estudo e a conscientização de efeitos radioquímicos e biológicos que o fosfogesso e os produtos classificados como TENORM, podem acarretar tanto à população quanto ao meio ambiente, é de grande importância, tendo em vista a grande utilização agrícola e civil do fosfogesso nos dias de hoje. Os valores determinados neste estudo servem como base de dados para novas etapas do processo, visando à diminuição da concentração de radionuclídeos no rejeito fosfogesso, possibilitando assim, a reciclagem e utilização industrial de forma ambientalmente correta. Juntamente a esses fatores, é eminente a necessidade de normas que atendam as necessidades de fiscalizar tais produtos e medir seus efeitos junto à

sociedade, unindo tecnologia e pesquisa, visando uma conscientização ambiental ao serviço da sociedade.

5. AGRADECIMENTO

Agradecemos à FAPESP, ao CNPq e ao Centro Universitário da FEI pelo auxílio financeiro e à VALE Fertilizantes S.A. pelo fornecimento das amostras utilizadas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

CANUT, M. Viability study for the substitution of gypsum by phosphogypsum as a building material. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006. (Dissertação de Mestrado).

ERNANI, P.R.; RIBEIRO, M.S. & BAYER, C. Chemical modifications in acid soils caused by addition of gypsum or limestone. *Sci. Agric.*, 58:825-831, 2001

MAZZILLI, B.P.; PALMIRO, V.; SAUEIA, C., NISTI, M.B., Radiochemical Characterization of Brazilian Phosphogypsum. *Journal environmental Radioactivity*, v.49, p. 113 -122, 2000.

MEDINA, N.H., SILVEIRA, M. A. G., R. B. B. Santos, Dynamic distribution of potassium in sugarcane. *Journal of Environmental Radioactivity*. , v.126, p.172 - 175, 2013.

PEREIRA, B. R., SANTOS, P. R. S., SILVEIRA, M. A. G., FONTANA, G., Medina, N.H., RIZZUTTO, M. A. Titanium Extraction from Waste NORM. *Pos Proceedings of Science*. , 2014.

OECD, 1979. Organisation for Economic Cooperation and Development. Exposure to radiation from natural radioactivity in building materials. Report by a Group of Expert of the OECD Nuclear Energy Agency, OECD, Paris.

Procedimento para verificação e análise do fosfogesso para seu uso na agricultura e na indústria cimenteira. Disponível em file:///C:/Users/Public/Documents/Documents/FEI/artigos/fosfogesso/pr488_01.pdf. Último acesso em: 15 de março de 2015.

SILVEIRA, M.A.G., MOREIRA, R.H., PAULA, A.L.C. and MEDINA, N.H., 2009, In: Nuclear Physics 2008: XXXI Workshop on Nuclear Physics in Brazil, American Institute of Physics Conference Proceedings, 1139, p. 153-155

SILVEIRA, M.A.G.et al., 2010, In: VIII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications, American Institute of Physics Conference Proceedings, 1265 p. 465-46.

UNSCEAR. ANNEX B, New York, 2008. Disponível em: <http://www.unscear.org/docs/reports/2008/09-86753_Report_2008_Annex_B.pdf>. Último acesso: 15 de março de 2015.

USEPA - United State Environmental Protection Agency. Radiation Information. Disponível em:< <http://www.epa.gov/radiation/radionuclideos>>. Acesso em: 5 de setembro de 2010.