

MODELO CONCEITUAL PARA AUXÍLIO A DECISÃO NA INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO
NORM – ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO AMBIENTAL

Rócio Glória dos Reis

2012

Reis, Rócio Glória dos
Modelo Conceitual para auxílio à decisão na indústria de
mineração NORM – aspectos de radioproteção ambiental / Rócio Glória
dos Reis. – Rio de Janeiro: IRD, 2012.
xvi, 102 f. : il. ; 29cm.

Orientador: Dejanira da Costa Lauria
Dissertação (mestrado) – Instituto de Radioproteção e
Dosimetria.

Referências bibliográficas: f. 92-102

1. NORM .2. Modelo Conceitual . 3. , Santa Quitéria . I.
Instituto de Radioproteção e Dosimetria. II. Título.

*Aos meus pais,
pelo incentivo e apoio.*

AGRADECIMENTOS

“A ingratidão é o mais horrendo de todos os pecados”.

Alexandre Herculano.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho, fica a minha sincera gratidão, mas especialmente para:

À Dra. Dejanira da Costa Lauria, pela orientação, pelas incontáveis horas de trabalho e pelo grande aprendizado que eu usufruí.

Ao Dr. Sergio de Queiroz Bogado Leite e especialmente ao Dr. Paulo Fernando Lavalle Heilbron Filho pelo impulso inicial ao tempestivamente escreverem as cartas de recomendação que pedi.

Aos professores do curso de mestrado do Instituto de Radioproteção de Dosimetria pelos valiosos ensinamentos.

Aos colegas estudantes que dividiram a aventura de viver a turma de 2009 do curso de mestrado do IRD.

À Dra. Elaine Rua Rodriguez Rochedo, Dr. Alfredo Victor Bellido Bernedo e ao Dr. Claudio Carvalho Conti, membros da banca, que contribuíram para o aprimoramento da dissertação com seus comentários, críticas e sugestões.

Ao Dr. Jose Marcus de Oliveira Godoy, que aceitou a tarefa de ser o revisor de bom grado, apesar de seus inúmeros compromissos.

Aos muitos colegas e amigos que incentivaram ou ofereceram ajuda na difícil tarefa de produzir esta dissertação, como a Luísa, Rosângela, Laercio, Monica, Sueli, Paulo, Arnaldo, Quinelato, Eduardo, Fernando, Sergio, Paula, Aline, Paulo, entre outros.

A minha família, que sempre me incentivou.

E a minha companheira, Vaneide, que percorreu comigo todo o árduo caminho.

Meu muito Obrigado!

RESUMO

Minação, assim como várias outras indústrias, pode gerar impacto ambiental. Um dos aspectos ambientais que está em foco em diversos países para dimensionar o impacto e regulamentar ou aperfeiçoar a legislação existente é o que trata sobre a ocorrência natural de material radioativo – NORM. Existe um esforço no sentido de mitigar os eventuais riscos causados pela radioatividade através do adequado gerenciamento das atividades destas indústrias, de modo a minimizar a geração de rejeitos, os impactos ambientais e, em consequência, a exposição que os membros do público ou os profissionais possam vir a sofrer. Neste estudo foi desenvolvido um modelo conceitual, um instrumento para auxiliar na tomada de decisão por parte dos gestores de instalações minero-industriais que lidam com NORM. Para o desenvolvimento deste modelo, a legislação brasileira foi confrontada com as legislações de países onde o tema é importante e com aquelas que estão sendo gestadas nas principais entidades de radioproteção. O que resultou na constatação da necessidade de atualização das normas brasileiras em vigor. Nestas mesmas entidades foram observados alguns temas recorrentes e relevantes para o gerenciamento das indústrias NORM, o que resultou na inclusão da avaliação de risco na biota não humana e do envolvimento das partes interessadas (stakeholders), no modelo proposto. O modelo foi aplicado em um caso real, a fábrica de ácido fosfórico e urânio em Santa Quitéria, no estado do Ceará, de modo a detectar os principais pontos críticos do empreendimento sob a ótica do impacto radiológico ambiental, relacionar recomendações e avaliar a adequabilidade do modelo, além de dar subsídios para o seu melhoramento. Ao avaliar o empreendimento foi constatado que o principal termo fonte seria a pilha de fosfogesso, cuja concentração de atividade de ^{226}Ra deverá superar o nível de referência estabelecido para seu uso na agricultura e na indústria cimenteira. A avaliação de impacto em três diferentes cenários: i) o grupo crítico situado nos limites da instalação, ii) o grupo crítico situado sobre a pilha, após abandono da área e iii) trabalhadores. O exercício mostrou que em todos os casos as doses suplantariam os níveis de dose adotados, 1 mSv/a para o público e 6 mSv/a para trabalhadores. A avaliação realizada de uma maneira holística, mostrou que a biota não humana também poderia sofrer efeitos devido á contaminação das águas superficiais. A simulação mostrou a importância da geometria da pilha e do escoamento superficial para a contaminação do ambiente, bem como a importância do

planejamento do descomissionamento da instalação, ainda na fase de planejamento, para subsidiar os estudos de viabilidade do projeto. A metodologia adotada para a estimativa de dose, embora bastante conservadora, é útil para orientar a busca de dados e informações do local, visando uma abordagem mais realista.

Palavras chave: NORM, Modelo Conceitual, Santa Quitéria, Urânio, Fosfato.

ABSTRACT

Mining like many other industries can cause environmental impact. One of aspects that is in focus in many countries concerns to quantify the impact and establish requirements or improve the existing regulation about naturally occurring radioactive material - NORM. By a suitable management of the activities in these industries, there is an effort to minimize the waste production, minimize the environmental impacts and, consequently, the exposure of members of the public and workers. This study developed a conceptual model, a tool to assist in the decision making process for managers of mining and industrial facilities that deal with NORM. To develop this model, the Brazilian regulations were confronted with the regulations of countries where the NORM subject is important and with those that are being established by the principal institutions of radioprotection. The need of updating the Brazilian regulations was observed. Some recurring themes that are relevant to the management of NORM industries were surveyed, which resulted in the insertion of non-human biota risk assessment and the participation of stakeholders in the proposed model. The model was applied to a real case, the phosphoric acid and uranium plant of Santa Quitéria, in the Ceará state, with the aim of identifying the main critical points of the facility from the perspective of the environmental radiological impact and evaluating the adequacy of model, in addition to providing subsidies for its improvement. By the assessment of the process, it was found that the main source would be the phosphogypsum stack, which ^{226}Ra activity concentration might exceed the level established for its use in agriculture and cement industry. The impact assessment was carried out in three different scenarios: i) the critical group located in the facility borders, ii) the critical group located on the stack, after the closure of the area and iii) workers. In all cases, the exercise pointed out the exceeding of the adopted dose levels, 1 mSv /y for public and 6 mSv /y for workers. The assessment carried out in a holistic manner, showed that non-human biota might also be affected by the contamination of surface waters. The simulation spotlighted the importance of the stack geometry and the rainfall erosion index for the environmental contamination, as well as the importance of planning the decommissioning of the facility, still in the planning phase, in order to give support for the feasibility studies of the project. Although quite conservative, the adopted methodology for assessing the dose was useful to guide the second step of the process which is a survey of data and local information, aiming a more realistic approach.

Keywords: NORM. Conceptual Model. Santa Quiteria. Uranium. Phosphate

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Processo simplificado de Produção de ácido fosfórico pela via úmida usando ácido sulfúrico.....	10
FIGURA 2 - O processo de gestão das recomendações da ICRP.....	14
FIGURA 3 - Fluxograma de classificação das indústrias NORM segundo a Norma 4.01.....	35
FIGURA 4 - A empresa e os stakeholders.....	45
FIGURA 5 - Modelo Conceitual para as indústrias NORM.....	53-4
FIGURA 6 - Mapa do Estado do Ceará.....	56
FIGURA 7 - Fluxograma Proposto Inicialmente pela INB.....	58
FIGURA 8 - Fluxograma Simplificado das Operações Unitárias para Concentração do Minerio.....	60
FIGURA 9 - Ciclone.....	61
FIGURA 10 - Flotação.....	63
FIGURA 11 - Divisão do Licenciamento entre Convencional e Nuclear.....	68
FIGURA 12 - Localização relativa da pilha de fosfogesso e do grupo crítico no sítio de Santa Quitéria.....	68
FIGURA 13 - Gráfico da Contribuição dos radionuclídeos para a dose no grupo crítico.....	73
FIGURA 14 - Gráfico da Contribuição das principais vias de exposição para a dose no grupo crítico.....	74

FIGURA 15 - Gráfico da Análise de Sensibilidade do Parâmetro Condutividade Hidráulica (variação de valor de 5 vezes).....	75
FIGURA 16 - – Gráfico da Análise de sensibilidade do parâmetro índice de erosão causado pela chuva (variação de 2).....	76
FIGURA 17 - Gráfico da Análise de sensibilidade do volume das águas de superfície em função da dose.....	77
FIGURA 18 - Contribuição dos radionuclídeos para a dose no grupo crítico situado sobre a pilha.....	79
FIGURA 19 - Contribuição das vias de exposição para a dose no grupo crítico devido ao ²²⁶ Ra.....	80
FIGURA 20 - Gráfico contribuição dos radionuclídeos para a dose no trabalhador.....	82
FIGURA 21 - Gráfico Dose Externa.....	83
FIGURA 22 - Dose na biota aquática em água de superfície próxima ao grupo crítico.....	87
FIGURA 23 - Coeficiente de Risco por Grupo de Organismo.....	88

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Parâmetros da Modelagem Usando RESRAD.....	70
TABELA 2 Dados de entrada para concentração de atividade na água.....	86
TABELA 3 Concentração de atividade no sedimento.....	86

LISTA DE SIGLAS

AECB – Atomic Energy Control Board

ARL - Australian Radiation Laboratory

ARPANSA - Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency

BSS - Basic Safety Standards

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

CNSC - Canadian Nuclear Safety Commission

DNPM - Departamento Nacional da Produção Mineral

EIA – Estudo de Impacto Ambiental

EPA - Environmental Protection Agency

FPTRPC - Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee

IAEA – International Atomic Energy Agency

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

ICRP – International Commission on Radiological Protection

INB – Indústrias Nucleares do Brasil

IRPA – International Radiation Protection Association

ISO – International Organization for Standardization

NORM - Naturally Occurring Radioactive Material

NRC - Nuclear Regulatory Commission

NSB - Nuclear Safety Bureau

ONG – Organização Não Governamental

RAS - Relatório de Análise de Segurança

RASS - Relatório de Análise de Segurança Simplificado

RIMA - Relatório de Impacto Ambiental

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente – Estado do Ceará

TENORM – Technologically-Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material

TENR – Technologically Enhanced Natural Radiation

UNSCEAR – United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

WHO – World Health Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
2 FUNDAMENTOS TEORICOS	3
2.1 Mineração	3
2.2 NORM	4
2.2.1 NORM – As Principais Atividades Industriais	6
2.2.2 NORM – Produção de Fertilizante	8
2.3 Legislação	12
2.4 Instituições Internacionais	13
2.4.1 O Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR - United Nations Scientific Committee on the Effects of atomic Radiation)	14
2.4.2 A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP- International Commission on Radiological Protection)	15
2.4.3 Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA–International Atomic Energy Agency)	20
2.4.4 Legislações no Mundo	23
2.4.4.1 A Legislação nos Estados Unidos da América – EUA	23
2.4.4.1.1 Comissão Reguladora Nuclear (NRC - Nuclear Regulatory Commission)	23
2.4.4.1.2 Agência de Proteção Ambiental (EPA-Environmental Protection Agency)	24

2.4.4.2 Comunidade Europeia	25
2.4.4.3 Canadá	26
2.4.4.4 Austrália	27
2.4.4.4.1 Austrália e o NORM	28
2.4.5 Avaliação Geral da Legislação no Mundo	28
2.5 Brasil-Legislação	29
2.5.1 Histórico da Legislação Nuclear no Brasil	30
2.5.2 CNEN e o NORM	32
2.5.3 O IBAMA e o Licenciamento Ambiental	37
2.5.3.1 Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA)	38
2.5.3.2 Da Concessão das Licenças	39
2.5.4 DNPM – NORM	40
2.5.5 Avaliação Geral da Legislação no Brasil	41
2.6 Sistema de Apoio a Decisão e Modelo Conceitual	42
2.7 Partes Interessadas - Stakeholders	44
2.8 Biota	47
3 MODELO CONCEITUAL	49
4 ESTUDO de CASO – PROJETO SANTA QUITÉRIA	55
4.1 Descrição da Área	56
4.2 Processo	57
4.2.1 Principais Etapas do Processo e Caracterização Radiológica	58
4.2.1.1 Desmonte (Lavra a céu aberto)	59
4.2.1.2 Deslamagem	59

4.2.1.3 Flotação	62
4.2.1.4 Produção do Ácido Fosfórico	64
4.2.1.5 Separação do Urânio	65
4.2.1.6 Extração do Tório	66
4.3 Stakeholders e Santa Quitéria	66
4.4 Avaliação do Impacto Radiológico Ambiental da Pilha de Fosfogesso	69
4.4.1 Avaliação da Dose no Grupo Critico Situado no Lado Externo dos Limites do Sítio de Santa Quitéria.	69
4.4.2 Avaliação da Dose no Grupo Critico Após o Fechamento e o Abandono do Sítio.	78
4.4.3 Simulação da Dose no Trabalhador	81
4.5 Classificando a Instalação de Santa Quitéria Usando a Norma 4.01	83
4.6 Novas tendências de regulação em NORM	84
4.7 Avaliação do Impacto Radiológico na Biota	85
5 CONCLUSÕES e RECOMENDAÇÕES	89
6 REFERÊNCIAS	92

1 INTRODUÇÃO

Os aspectos relacionados à amplitude do impacto radiológico e ambiental das atividades industriais geradoras de NORM ainda não são bem conhecidos. Esse tema tem sido pesquisado em diversos países, pois ainda não se conhece completamente o grau de risco à saúde que trabalhadores e indivíduos do público podem estar submetidos (IAEA, 2007; UNSCEAR, 2008). O gerenciamento da produção, deposição e liberação destes resíduos, rejeitos e efluentes NORM para as indústrias convencionais é um desafio, uma vez que estas não estão preparadas para lidar com a questão da radioatividade e mesmo, muitas vezes, desconhecem que estão produzindo material que contém elementos radioativos em concentrações elevadas. Estas indústrias, então, passam a ter que lidar com conceitos e legislações que são específicos da área nuclear e a ter que compatibilizá-los com conceitos e legislações aplicadas nas áreas dos poluentes convencionais.

Além disto, tanto a legislação quanto os requisitos das áreas nucleares e convencionais estão em constante evolução e a pró - atividade no setor deve favorecer a diminuição do risco de futuros prejuízos causados por passivos ambientais e/ou pela reação negativa da sociedade. Um olhar abrangente sobre como outros países estão lidando com assuntos relevantes para as áreas nucleares e as indústrias NORM, e sobre os assuntos atualmente discutidos em fóruns como a IAEA, pode indicar quais são os tópicos que vão ganhar relevância no futuro e como a legislação brasileira provavelmente irá evoluir no tema. Um plano de trabalho estratégico unificado, um modelo conceitual, potencializa a melhor compreensão dos riscos associados ao projeto. Conhecendo-se os riscos, é possível planejar a melhor forma de lidar com os mesmos e assim evitá-los ou minorar seus efeitos, e, dessa forma, ter os custos e a necessidade de retrabalho minimizados e os benefícios de segurança e ambientais maximizados.

No Brasil as atividades econômicas ligadas à mineração e transformação mineral corresponderam a 5,17% do PIB do país em 2007, (IBRAM, 2011), e são essas as principais atividades econômicas que ocasionalmente se deparam com o problema NORM. Assim, oferecer um sistema de apoio à decisão inédito para lidar com esse potencial problema é pertinente do ponto de vista econômico.

Por outro lado, a jazida de Santa Quitéria, no Ceará, está sendo licenciada pela INB e pela Galvani junto aos órgãos pertinentes, como o IBAMA e a CNEN, entre outros. Para isso o

consórcio de empresas está realizando diversos estudos na área do empreendimento. O consórcio INB e Galvani possui seus objetivos e interesses, que são os objetivos e interesses próprios aos empresários, como por exemplo, o lucro. Por outro lado, os órgãos licenciadores: a CNEN, o IBAMA e a SEMACE, que possuem todo um arcabouço de normas, também possuem os seus próprios objetivos e interesses, como por exemplo, o cumprimento de seus requisitos normativos.

O Projeto de Santa Quitéria é um desafio novo para as empresas do consorcio, pois vários aspectos legais e técnicos são inéditos para elas. E, por estes mesmos motivos, também é um desafio para os órgãos licenciadores. Um estudo acadêmico independente deve enriquecer a compreensão dos problemas de radioproteção e ambientais e a sua relevância perante os especialistas, a população e os demais interessados no Projeto Santa Quitéria; e ser um bom estudo de caso para testar o modelo conceitual proposto para auxiliar a indústria de mineração NORM.

1.1 Objetivo

Essa dissertação tem como objetivo a proposição de uma estratégia metodológica de trabalho para ajudar no processo de tomada de decisão em radioproteção ambiental e assim orientar as indústrias da área de mineração que geram NORM. Visa a criar um modelo conceitual e testar esse modelo em um projeto de mineração e beneficiamento de fosfato associado ao urânio – o Projeto Santa Quitéria. O modelo deverá considerar a legislação nacional pertinente, as normas internacionais sobre o assunto e a literatura contemporânea acerca das demandas relacionadas a esse tipo de empreendimento. O modelo aplicado à mineração de Santa Quitéria deve detectar os principais pontos críticos do empreendimento sob a ótica do impacto radiológico ambiental, relacionar recomendações e avaliar a adequabilidade do modelo, além de dar subsídios para o melhoramento do modelo e com isso contribuir para um melhor gerenciamento ambiental do empreendimento.

2 FUNDAMENTOS TEORICOS

Este capítulo apresenta uma revisão bibliográfica de temas que foram considerados relevantes para o desenvolvimento do modelo conceitual. Apresenta um histórico sobre mineração, descreve NORM (sua ocorrência e sua problemática), as legislações internacionais e nacionais relacionadas ao tema, algumas instituições internacionais e nacionais que atuam na radioproteção e no meio ambiente, e noções sobre tópicos que são ou podem vir a ser relevantes para a sustentabilidade do projeto e as partes interessadas (stakeholders) e para a radioproteção ambiental (non-human biota). Sendo que o termo biota será usado nesta dissertação com o significado que o termo “non-human biota” possui no meio acadêmico internacional

2.1 Mineração

A mineração é uma atividade muito antiga, sua prática data de milhares de anos de idade, como exemplo: o uso de metais, como o cobre, o estanho e o ferro, que na antiguidade, eram minerados e fundidos em escala artesanal (NAVARRO, 2006). De fato, seria impossível imaginar a humanidade, com o atual nível de consumo por parte da população, prescindindo da mineração. A sociedade contemporânea seria impossível sem o acesso a esses recursos naturais.

No entanto a atividade mineradora, assim como várias outras indústrias, pode gerar impacto ambiental. Exemplos desses possíveis impactos ambientais são: a contaminação de aquíferos, rios, riachos e lagos, a erosão, a diminuição de diversidade biológica, a biodisponibilidade de substâncias tóxicas e/ou radioativas, entre outros. Com intuito de evitar ou minorar os possíveis danos provocados pela atividade da mineração, existem atualmente tecnologias e metodologias de trabalho as quais, se colocadas em prática, evitam ou reduzem e, em alguns poucos casos, até promovem melhorias da situação da área explorada em relação à condição inicial da mesma, sob o ponto de vista ambiental e/ou social.

Geralmente a legislação induz ou obriga os responsáveis pelo empreendimento de mineração o uso das melhores tecnologias, embora existam no mundo diversos países que carecem de uma legislação adequada, que proteja a população e o meio ambiente de práticas predatórias. Uma legislação adequada visa não somente ao gerenciamento ambiental adequado

durante a operação do empreendimento, mas também após o fechamento (descomissionamento) da instalação.

No Brasil, historicamente, a mineração teve um papel importante na economia e, atualmente, continua a contribuir com uma parcela significativa da riqueza nacional. O país possui diversas jazidas minerais e algumas são internacionalmente expressivas, como por exemplo: ferro, nióbio, alumínio e manganês.

A mineração no Brasil é regulada nos três níveis estatais, sendo a legislação ambiental pertinente à mineração considerada como extensa e avançada, embora seja também considerada conflitante e de difícil aplicação (FARIAS, 2002).

Os principais impactos ambientais causados pela mineração no Brasil são: a poluição sonora, a poluição do ar e da água e também a subsidência do terreno. Alguns dos principais minerais que causam impacto ambiental durante a sua exploração no Brasil são: ferro, ouro, chumbo, zinco, prata, cassiterita e fosfato (FARIAS, 2002).

2.2 NORM

A radiação é um fenômeno natural ao qual a vida e o ser humano sempre estiveram sujeitos. A radiação está presente na crosta terrestre, porque esta contém elementos radioativos e, também existe a contribuição de radiação que vem do espaço sideral – os raios cósmicos. Existem elementos radioativos no ar, na água, em tudo que nos rodeia e em muito com o que interagimos e aquilo que incorporamos. Na própria constituição do corpo humano encontra-se átomos radioativos, tal como o isótopo ^{40}K . Portanto, a radioatividade é natural.

A radioatividade no ambiente não é constante, varia com o tempo e no espaço. Existem regiões no planeta onde a radiação natural é muito maior do que em outras, como por exemplo, a região de Poços de Caldas, no estado de Minas Gerais (HENDRY et al., 2009). Outro exemplo de local com radiação natural maior que a média mundial é a região de Guarapari e Meaipe no Brasil (PENA-FRANCA, 1977).

A radioatividade no ambiente também varia com o tempo, pois a radioatividade natural atual produzida pelos isótopos radioativos dos elementos constituintes originais da crosta terrestre decaiu nos bilhões de anos que se passaram desde a formação do planeta. Assim, os níveis de

radioatividade natural que observamos no ambiente são menores do que os níveis há bilhões de anos (ROZANSKI, 1996).

A radioatividade natural pode sofrer influência também da atividade antrópica, portanto diversas atividades humanas podem alterar as concentrações de radionuclídeos presentes nos materiais originais e no ambiente.

NORM é uma sigla que se refere somente a materiais que contenham radionuclídeos das séries naturais e não se aplica a elementos ou isótopos criados pelo homem, como por exemplo, o elemento plutônio, que é um elemento artificial, gerado em reatores nucleares.

Os radionuclídeos naturais normalmente presentes em NORM são os pertencentes às séries do urânio e do tório, e o potássio 40 (IAEA, 2003).

Materiais Radioativos de Ocorrência Natural (NORM - em inglês, *Naturally Occurring Radioactive Material*) é a forma mais genérica de se designar este fenômeno. Era normalmente usada a designação de Material Radioativo de Ocorrência Natural Tecnologicamente Aumentada (TENORM - *Technologically Enhanced Naturally Radioactive Material*), para produtos, subprodutos ou rejeitos com a radioatividade natural aumentada devido ao seu processamento. Já o termo TENR – *Technologically Enhanced Natural Radiation* foi proposto para ser usado quando a radiação é aumentada, mas se somente o incremento for devido ao uso de algum processamento tecnológico e não nuclear. Esse termo não é mais utilizado.

Somente o termo NORM será usado nesta dissertação, por sua generalidade e para propiciar certa uniformidade ao texto. Além disto, a IAEA adota e recomenda atualmente somente o uso da sigla NORM (IAEA, 2007). O termo NORM será usado para englobar todas as formas de materiais onde a radioatividade, ocorrendo naturalmente, teve seus níveis de concentração aumentados devido a práticas antrópicas, implicando no aumento potencial de exposições à radiação, se comparadas com o estado inalterado do material (MIRANDA, 2009).

A extensão do risco a que a população e o meio ambiente estão sujeitos não está bem estabelecida no arcabouço legal e no meio científico, não só porque a geração de NORM pode ocorrer em diferentes tipos de indústrias, como também os níveis de radionuclídeos liberados para o meio ambiente ou presentes nos produtos, resíduos e rejeitos são dependentes dos níveis de radionuclídeos presentes nas matérias primas e do processo utilizado.

Existe um esforço no sentido de mitigar os eventuais riscos causados pela radioatividade através do adequado gerenciamento das atividades destas indústrias, de modo a minimizar a geração de rejeitos e os impactos ambientais e, em consequência, a exposição que os membros do público e/ou os profissionais que trabalham nessas indústrias possam vir a sofrer.

Portanto, a ocorrência de NORM está em foco em diversos países para avaliar e regulamentar ou aperfeiçoar a legislação existente (IAEA, 2003).

2.2.1 NORM – As Principais Atividades Industriais

Vários segmentos da economia contribuem para a ocorrência de NORM e, segundo o documento da IAEA (2003), as principais atividades econômicas são:

- Petróleo e Gás;
- Mineração de carvão e sua combustão;
- Energia geotérmica;
- Tratamento de água potável;
- Tratamento de esgoto;
- Água de uso industrial;
- Água de irrigação;
- Mineração e métodos de processamento: alumínio, ferro, cobre ouro, areias minerais e indústrias relacionadas;
- Mineração de fosfato e produção de fertilizantes;
- Argila, cerâmica e material de construção;
- Produção de ácido sulfúrico a partir de queima de pirita;

- Queima de xisto para produzir óleo;
- Dragagem de rio e/ou porto;
- Rejeitos do fechamento de uma planta industrial.

Dentre as indústrias que produzem NORM, estão, por exemplo, aquelas responsáveis pela queima de combustíveis fósseis, especialmente o carvão mineral. Neste caso há a liberação de diversos radionuclídeos nas cinzas para a atmosfera, através da chaminé.

O potencial de ocorrência do problema NORM na indústria do petróleo e gás é significativo. Pode ocorrer em diversas etapas da exploração, do beneficiamento e do transporte do petróleo e do gás natural, com diversos radionuclídeos e em várias situações. Um exemplo do problema NORM na produção do petróleo é a precipitação de sais de bário os quais, ao precipitarem com a injeção de água do mar nos poços, carregam isótopos de rádio, que incrustam nas paredes das tubulações. Dependendo da quantidade de incrustações, da atividade dos radionuclídeos presentes, da quantidade de tubos incrustados, entre outros fatores, pode criar as condições para impactar os trabalhadores, o público e o ambiente, (MATTA, 2001), (PASCHOA et al, 2002), (JEREZ VERQUERIA et al, 2004).

Na mineração é frequente a ocorrência de NORM em diferentes tipos de minérios, com diferentes concentrações e com diferentes radionuclídeos. Um caso típico em nosso país é o da mineração de cassiterita, em que NORM pode ocorrer quando o minério é beneficiado para produzir estanho metálico. Neste caso, a concentração de urânio 238 e filhos ocorre durante o processo siderúrgico que produz um rejeito metálico rico em radionuclídeos e, assim, podem contribuir para um possível incremento da dose externa nos trabalhadores (ROSA et al, 2008).

No Brasil, como a mineração tem muita importância econômica devido à abundante ocorrência de minérios, eventualmente existe a presença de NORM em produtos, subprodutos e rejeitos, que muitas vezes não é identificada ou não é considerada no planejamento da operação da mina ou planta de beneficiamento, podendo criar impacto ambiental durante a operação da planta ou no futuro (PIRES DO RIO et al, 2002).

Uma ocorrência de NORM relevante na indústria de mineração no Brasil é o beneficiamento da monazita, ortofosfato de terras raras que contém urânio e tório que, ao ser processada, produz rejeito e resíduos contendo radionuclídeos das séries radioativas naturais. Estes rejeitos e subprodutos contaminaram alguns terrenos e estão depositados principalmente em Botuxim (no estado de São Paulo) e em Poços de Caldas (Minas Gerais) (LAURIA et al, 2005).

Outro exemplo é a exploração de nióbio, por parte de uma mineradora no Brasil, cujo impacto ambiental, sob o prisma da radioproteção, não é relevante, na fase da operação. No entanto, os estudos demonstraram que, após o fechamento da mina, os rejeitos depositados na área do empreendimento impedirão que esse local seja liberado para uso irrestrito pela população (PIRES DO RIO et al, 2002).

Dentre as principais atividades industriais no mundo, uma das que mais atrai atenção em relação à geração de NORM é a indústria de produção de fertilizante de fosfato, especialmente porque pode gerar grande quantidade de NORM no resíduo de fosfogesso (IAEA, 2003), (BORGES, 2011).

2.2.2 NORM – Produção de Fertilizante

Os processos de gênese de jazidas de minério de fosfato são: sedimentares, magmáticos, intemperismo e processos biológicos. O minério de fosfato de origem sedimentar geralmente possui um maior nível de urânio na sua composição. Entretanto, se o minério de fosfato é de origem plutônica ou ígnea, este normalmente possui níveis mais elevados de tório (IAEA, 2003).

O mecanismo que provavelmente produz a acumulação de urânio no minério fosfatado é a substituição do cálcio pelo urânio na estrutura do mineral de fosfato, devido à similaridade de tamanho dos dois íons (SILVA, 1997 apud RUTHERFORD, 1994).

A mesma similaridade existe entre o raio do cálcio e o raio do tório em seu estado livre na natureza, onde o seu número de oxidação é +4 e, assim, o tório pode substituir o cálcio na apatita. Por esse processo a acumulação ao longo do tempo pode ocorrer tanto para o tório quanto para o urânio na jazida de fosfato (SILVA, 1997).

O minério de fosfato possui concentrações diversas dos radionuclídeos das séries do urânio e do tório, pois as concentrações de fosfato também diferem bastante.

O Brasil possui, em termos mundiais, uma pequena parcela das reservas de rochas fosfáticas, sendo que 80% aproximadamente são formados de minério de fosfato de origem ígnea ou magmática, ocorrendo em Araxá (MG), Catalão (GO) e Jacupiranga (SP). O minério é formado por cloroapatita, fluoroapatita e hidroxiapatita em qualquer proporção. Nos estados do nordeste e em Patos de Minas (MG) estão localizadas as jazidas de origem sedimentar, sendo o minério formado principalmente de fosforita (SILVA, 1997).

Para a produção de ácido fosfórico a partir da rocha fosfórica usa-se o processo da via úmida (principalmente ácido sulfúrico ou ácido nítrico ou ácido clorídrico) ou o processo térmico, que também é conhecido como o processo da via seca. O processo da via úmida é o mais usado para produzir ácido fosfórico para uso como fertilizante. Neste processo, o ácido sulfúrico é o reagente mais utilizado na maioria das indústrias de produção de ácido fosfórico em funcionamento no mundo. Um esquema do processamento da rocha fosfática pela via úmida para produzir o ácido fosfórico é mostrado na Figura 1:

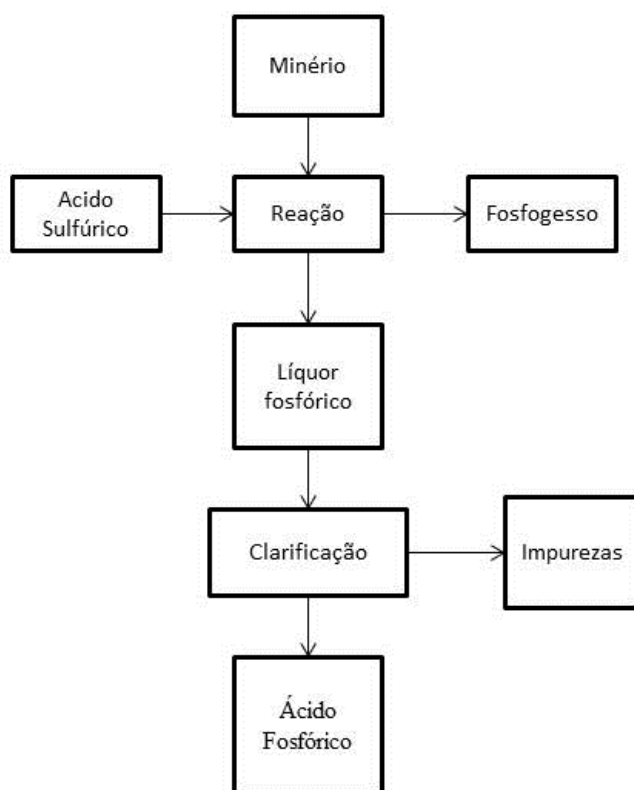


Figura 1 – Processo simplificado de Produção de ácido fosfórico pela via úmida usando ácido sulfúrico.

Após o tratamento físico da rocha, por britagem, peneiramento, etc, é adicionado à um ácido forte, o ácido sulfúrico em 95% dos casos, que irá lixiviar o fosfato (P_2O_5) da rocha, resultando na produção do ácido fosfórico, dando origem aos fertilizantes fosfatados. Além da produção de ácido fosfórico, é produzido através da rota sulfúrica, numa proporção de 4 a 6 unidades para cada unidade de massa de ácido fosfórico, um material considerado como resíduo, cujas características químicas e físicas são semelhantes ao gesso natural (gipsita), chamado de fosfogesso, gesso químico ou gesso agrícola ($CaSO_4$) (SAAD, 1995).

Os radionuclídeos na rocha estão aproximadamente em equilíbrio secular, o qual é rompido pela transformação da rocha do minério em ácido fosfórico. A partir do rompimento, os radionuclídeos seguem diferentes caminhos, em função das suas características químicas, nas diferentes etapas do processamento industrial. A separação que ocorre é seletiva para os radionuclídeos, isto porque as características químicas são parte da identidade de cada elemento

químico. Os isótopos do rádio e o ^{210}Pb são em grande parte co-precipitados junto com o sulfato de cálcio, e seguem para o fosfogesso, enquanto os isótopos do urânio e do tório ficam, em sua maior parte, no licor ácido junto com o ácido fosfórico (SILVA, 1997 apud HORTON, 1988; HULL & BURNETT, 1996; FIPR, 1996). Pesquisas realizadas por MAZZILI *et al.* (2000) encontraram concentrações variando entre 22 e 695 Bq/kg de ^{226}Ra , entre 47 e 894 Bq/kg de ^{210}Pb , entre 53 e 677 Bq/kg de ^{210}Po e entre 7 e 175 Bq/kg de ^{232}Th em fosfogessos provenientes de quatro importantes produtores de ácido fosfórico no Brasil. Segundo FUKUMA (1999) o fosfogesso produzido em Santa Quitéria terá atividades de aproximadamente 1300 Bq/kg para o ^{226}Ra e de 1100 Bq/kg para o ^{210}Pb . O tório, no caso de Santa Quitéria segue junto com o ácido fosfórico, na proporção de aproximadamente 93% do tório contido inicialmente na rocha fosfática (FUKUMA, 1999)

As consequências da concentração de alguns radionuclídeos em efluentes, produtos e subprodutos devem ser mensuradas através da avaliação do impacto radiológico para se estimar a dose e, assim, definir a necessidade ou não de alguma ação no sentido de salvaguardar a população, os trabalhadores e o meio ambiente.

Um grande problema na produção de ácido fosfórico é a produção de grande quantidade de fosfogesso, visto que aproximadamente 4,5 toneladas de fosfogesso são geradas para cada tonelada de ácido fosfórico (SAAD, 1995). Segundo Silva (1997), a indústria de fertilizantes fosfatados no Brasil lança anualmente aproximadamente 2000 toneladas de urânio e seus descendentes, no meio ambiente.

Este material tem potencial de causar detrimento ambiental e à saúde humana pela contaminação atmosférica com fluoreto e outros elementos tóxicos e pela poluição das águas de sub-superfície e superficiais, atingindo o homem pela inalação de radônio e de particulados contendo radionuclídeos, pela ingestão de alimentos irrigados com águas contaminadas, pela ingestão de água e pela exposição direta à radiação gama (SILVA, 1997).

Assim, a necessidade da avaliação do impacto radiológico ambiental na indústria de fertilizantes decorre de ser frequente a presença de radioatividade em níveis acima do normal, ou do que a legislação permite, em várias etapas do processo de produção, nos efluente e nos subprodutos ou rejeitos gerados (SAAD, 1995).

2.3 Legislação

Como nos primórdios da era atômica não se conhecia os efeitos nefastos das radiações ionizantes, ocorria muita exposição desnecessária e, eventualmente, começou-se a perceber uma relação de causa e efeito entre o contato com essas radiações e o aparecimento de lesões e doenças. Assim, em 1928, na cidade de Estocolmo, foi reunida uma comissão de peritos com o objetivo de sugerir limites de doses e outros procedimentos para os profissionais na área de medicina, especialmente os que lidavam com aparelhos de raios X. Essa comissão de peritos deu origem ao que mais tarde recebeu a denominação de ICRP, que atua na proteção radiológica desde então (CLARKE e VALENTIN, 2005).

O conhecimento sobre os efeitos da radiação ionizante tem evoluído com o tempo. Até 50 anos atrás, não era considerado necessário e nem possível o controle da radiação natural.

Na década de 70 aumentou a preocupação em relação as exposições a radiação natural e, como consequência, passou-se a pesquisar mais intensamente a radiação natural uma vez que a mesma não é homogênea, suas fontes diferem, e os seus níveis podem variar de um para outro local (SILVA, 1997). Além disto, começou-se a diferenciar a radiação verdadeiramente natural, sobre a qual não é possível exercer nenhum controle, da radiação natural que foi aumentada, de alguma forma não intencional, devido à intervenção humana.

Na década seguinte o conceito foi evoluindo a partir de novos estudos e discussões sobre exposições à radiação ionizante e da participação de instituições sugerindo limites para os níveis de radiação natural aumentada (SILVA, 1997 *apud* HAMILTON, 1985).

Nos anos 90 a Comissão Internacional de Radioproteção (*International Commission on Radiological Protection-ICRP*) reforçou a recomendação de aumentar o controle da exposição à radiação natural aumentada pela ação humana (ICRP, 1991).

Com o advento da “guerra fria”, a prioridade foi a criação de grandes arsenais de artefatos, bombas de fissão e, depois, bombas utilizando a fusão nuclear. Depois do fim da “guerra fria”, a preocupação com a segurança foi transferida para a “guerra ao terror”, especialmente com relação às chamadas “bombas sujas”, em função da emergência das organizações terroristas que ganharam relevância, principalmente após o atentado de 11 de setembro de 2001, na cidade de Nova York.

Assim, os aspectos de segurança com o enfoque militar sempre foram preponderantes em relação aos aspectos de segurança com o enfoque voltado às aplicações civis da energia nuclear. Mas a radioproteção desenvolvida até a segunda grande guerra, com a finalidade de proteger os trabalhadores e o público em atividades civis, como por exemplo, o radiodiagnóstico, foi utilizada nos grandes complexos com fins militares, que durante e após a segunda guerra desenvolveram artefatos nucleares. Os princípios de radioproteção que foram incorporados às práticas nessas instalações militares foram muito eficientes, pois apesar da grande quantidade de material radioativo e a enorme força tarefa arregimentada para lidar com o objetivo de construir a bomba atômica, o número de acidentes foi relativamente muito baixo (CLARK e VALENTIN, 2008).

No entanto, à medida que o conhecimento científico aumentou com relação aos fenômenos nucleares, a percepção dos possíveis efeitos malefícios da exposição à radioatividade também aumentou – especialmente após as explosões nucleares nas cidades japonesas e nos testes atmosféricos em que o problema da contaminação (fallout) no hemisfério norte foi significativo. Assim, um arcabouço legal foi sendo construído com o intuito de proteger os trabalhadores, a população e o meio ambiente dessa fonte potencial de detrimento (CLARK e VALENTIN, 2008).

2.4 Instituições Internacionais

A legislação nuclear, para ser estabelecida normalmente, segue um processo que é iniciado pelo levantamento de necessidades e de estudos científicos que induzem a UNSCEAR a fazer uma série de avaliações, que servem de base para as recomendações do ICRP, que normalmente são adotadas pela IAEA, que em seguida recomenda a utilização ou implementação das sugestões na legislação dos seus países membros. As recomendações do ICRP também influenciam as normas da WHO e da ISO, entre outras instituições. As análises, avaliações e conclusões produzidas na ICRP também são levadas em consideração em instituições como a IRPA que, por sua vez, também é levada em consideração pelo ICRP. A Figura 2 ilustra esse processo.

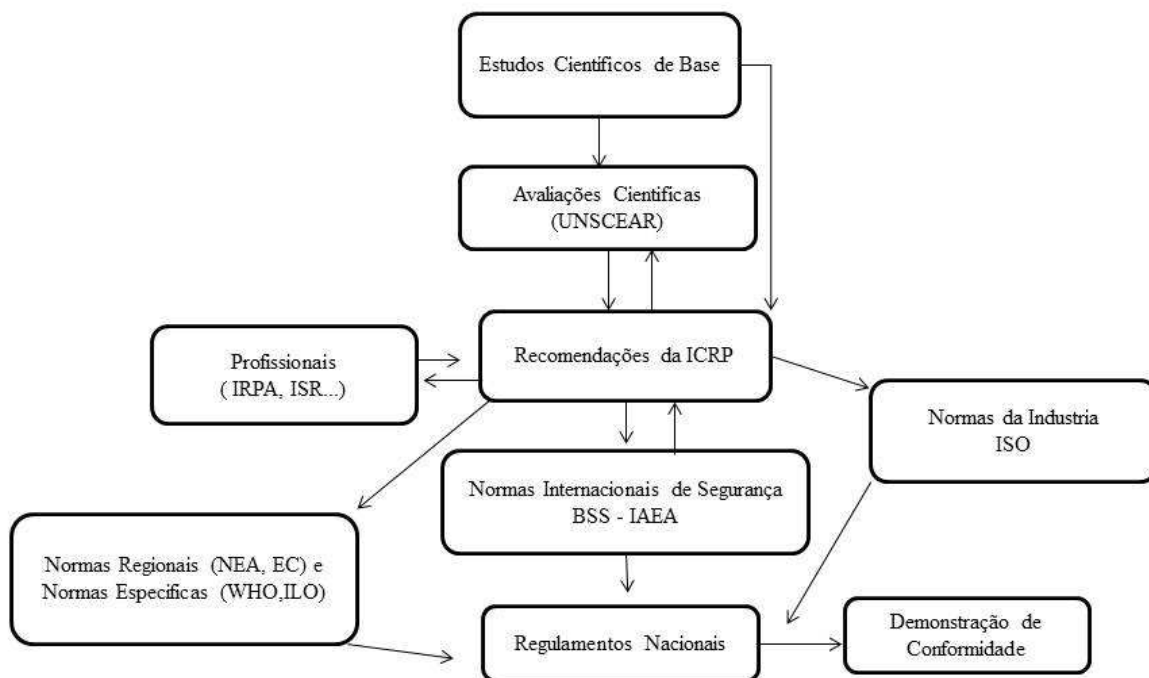


Figura 2- O processo de gestão das recomendações da ICRP. Fonte: CLARK e VALENTIN, 2008.

2.4.1 O Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR-United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

O UNSCEAR foi estabelecido pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 1955. O seu mandato no sistema das Nações Unidas é para avaliar e relatar os níveis e os efeitos da exposição à radiação ionizante (UNSCEAR, 2006). O UNSCEAR tornou-se a autoridade pública internacional sobre os níveis e os efeitos da radiação ionizante usada para fins pacíficos, bem como para fins militares, provenientes de fontes naturais ou de fontes produzidas pelo homem.

O UNSCEAR tem avaliado e relatado estudos, na área de proteção ambiental, que questionam o conceito de que se o ser humano estiver protegido, então o meio ambiente também estaria, pois o homem seria o ser mais radiosensível. Estes estudos em ecossistemas avaliam como este seria afetado pela radiação ionizante, enquanto outros apresentam alguma orientação numérica sobre a seleção de espécies animais e vegetais de referência (UNSCEAR, 1996). Assim, a resposta da exposição à radiação da biota tem sido foco das atenções do UNSCEAR.

Outro tópico que tem sido foco das atenções do UNSCEAR é o NORM, visto que a radiação natural contribui com mais de 80% para a dose coletiva da exposição ocupacional mundial, excluindo a mineração do urânio. Adicionalmente, as doses individuais em trabalhadores expostos ao NORM podem ser significativas (VAN DER STEEN, 2004). Um levantamento feito pela UNSCEAR (2008) concluiu que poucos países mantêm um programa rotineiro de monitoração dos trabalhadores. Além disso, a enorme diversidade de minérios contendo baixas concentrações de radionuclídeos, que podem vir a produzir NORM ao serem concentrados em produtos, resíduos, rejeitos e efluentes, tornam o conhecimento da extensão do problema e a formulação de soluções genéricas um exercício complicado. Assim, de acordo com a UNSCEAR, devido a falta de dados, ainda não é possível ter uma visão consistente da dimensão do problema (UNSCEAR, 2008). Por conseguinte, esta instituição recomenda o desenvolvimento de levantamentos de dados e informações, e o desenvolvimento de metodologias para avaliação de dose, de maneira a se ter uma visão mais adequada dos problemas relacionados à exposição do público.

2.4.2 A Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP- International Commission on Radiological Protection)

A ICRP atua como a instituição internacional na área da radioproteção. Suas recomendações são observadas ao redor do mundo por todos os interessados em proteger da radioatividade as pessoas e o meio ambiente.

Os membros da ICRP são eleitos levando em consideração somente o mérito científico, sem considerar a representação de países ou outras organizações (CLARK e VALENTIN, 2005).

A ICRP possui cinco comitês que cuidam de diferentes aspectos da radioproteção (CLARK e VALENTIN, 2008).

- O primeiro comitê é chamado de Efeitos da Radiação e trata do risco de indução de câncer e de doenças hereditárias junto com os mecanismos fundamentais do efeito da radiação.
- O segundo comitê é chamado de Doses da Exposição à Radiação e trata do desenvolvimento dos coeficientes de avaliação de dose para exposição para a radiação interna e externa, assim como o desenvolvimento de referência biocinética e modelos para a dosimetria e, também, de dados de referência para trabalhadores e indivíduos do público.
- O terceiro comitê é conhecido pela designação de Proteção na Medicina voltado para a proteção de pessoas e fetos quando a radiação ionizante é usada para diagnóstico, terapia ou pesquisa médica e, também, para avaliação de consequências médicas em exposição acidental.
- O quarto comitê é denominado por Aplicação das Recomendações da Comissão e atua providenciando suporte nas aplicações das recomendações do sistema de proteção em todos os âmbitos para a exposição ocupacional e a exposição do público. Esse comitê atua também como ligação entre as outras organizações internacionais e sociedades profissionais ligadas à proteção contra as radiações ionizantes.
- O quinto e último comitê para Proteção do Ambiente promove estudos sobre a proteção radiológica do meio ambiente. Este comitê trabalha no sentido de harmonizar a proteção do ambiente com a proteção radiológica do homem e as outras proteções não radiológicas do ambiente, tentando evitar que as diferentes abordagens da radioproteção e da proteção convencional se tornem incompatíveis.

A evolução dos princípios da radioproteção no contexto internacional foi e é, em grande medida, influenciada pela ICRP que, ao estabelecer e defender seus princípios de radioproteção e níveis de exposição influencia organizações internacionais e nacionais. Em consequência, estes princípios foram transformados, muitas vezes, em leis e, assim, a legislação na área de radioproteção nos diversos países que as possuem está refletindo as considerações da ICRP ao longo do tempo.

No início, por volta de 1928, as recomendações da ICRP tinham como foco a proteção física dos profissionais, que operavam os equipamentos de raios X (CLARK e VALENTIN, 2005). Em seguida, em 1934, foi introduzido o conceito de tolerância de dose (limite de dose), para exposição aos raios X. Na ocasião, o limite de dose implicava em uma dose ocupacional anual em torno de 500 mSv. As recomendações da ICRP, também foram no sentido de que os profissionais que eram expostos aos raios X tivessem anualmente uma avaliação médica, inclusive com coleta de sangue, com o objetivo de limitar, permitir ou recusar a exposição de trabalhadores à radiação ionizante. Inicialmente, essa preocupação era somente em relação aos raios X, mas após 1937 foi estendida também para a radiação gama.

Após a Segunda Grande Guerra, em 1950, a ICRP produziu um novo conceito, que era o da dose máxima permitida. Na ocasião essa dose equivaleria a um limite anual para uma dose ocupacional de 150 mSv/ano. O motivo da diminuição de uma dose de cerca de 500 mSv para 150 mSv/ano ocorreu em função do aumento do conhecimento sobre alguns efeitos biológicos deletérios causados pela radiação ionizante sobre o homem, como a leucemia, tumores malignos, catarata, infertilidade, redução da expectativa de vida e efeitos genéticos.

Em 1954, a ICRP, pela primeira vez, recomendou a restrição da exposição para membros do público em geral pois, anteriormente, a preocupação era focada somente nos profissionais que estavam expostos à radiação ionizante. Outro conceito importante que apareceu nessa época foi o de que nenhum nível de exposição à radiação ionizante maior do que o nível ambiental do local pode ser considerado seguro para o ser humano. No entanto, a ICRP não rejeitou a possibilidade de um limite para os efeitos estocásticos nessa época (CLARK e VALENTIN, 2005).

Por volta de 1956/57/58, foram introduzidos alguns conceitos, um deles foi o da área controlada, e nesse conceito, os trabalhadores que trabalhassem próximos da área controlada poderiam receber, no máximo, 10% da dose que os trabalhadores da área controlada receberiam. Com isso, a ICRP estava estabelecendo que os trabalhadores de áreas próximas à área controlada, receberiam no máximo a mesma dose admissível para o público em geral. Outro aspecto introduzido nessa ocasião foi a radioproteção ocupacional da gestante, isso devido aos estudos em animais que demonstraram a alta radiosensibilidade do embrião e do feto, fazendo-se necessário, então, cuidados especiais para as trabalhadoras nessa condição.

Em 1966, a ICRP começou a publicar recomendações sobre o risco da radiação ionizante e sobre o efeito estocástico da exposição, pois até essa época somente o efeito determinístico era foco de atenção. Dessa forma, aumentaram-se os estudos para determinar o quanto de dose seria necessário para gerar o detrimento relacionado a um efeito somático ou em um efeito genético na população. Além disto, procurou-se estabelecer se o risco era ou não aceitável, visto que se supunha que qualquer incremento de dose, acima da radiação ambiental natural, pode causar algum detrimento. Desta maneira, a filosofia de radioproteção foi definida baseada na hipótese da linearidade entre a dose e o efeito e da ausência de um limiar de dose. Em seguida foi proposto o conceito da otimização, cuja recomendação era:

“Todas as doses devem ser mantidas tão baixas quanto razoavelmente exequível, levando se em consideração fatores econômicos e sociais”.

Na publicação 26 da ICRP, foram reunidos os três princípios da radioproteção: a otimização, a justificação e o princípio da limitação de dose. A ICRP 26 (1977) propôs um sistema de limitação de dose, porque o risco dos efeitos estocásticos foi quantificado pela primeira vez. Foi então assumido que a segurança proporcionada pela radioproteção ao ser humano era também adequada ao ambiente. Por consequência, se o homem estava protegido, toda a biota estaria (CLARK e VALENTIN, 2005).

Em 1991, na ICRP 60, os princípios de radioproteção foram acrescidos de importantes adições, pois estudos recalcularam o risco de detrimento nos sobreviventes das bombas de Hiroshima e Nagasaki devido à dose daquelas exposições e verificaram que era maior do que se supunha até então.

Em relação à radioproteção em geral, desde os anos 90 que a ICRP 60 recomenda que o sistema de proteção fique dividido em “práticas” e em “intervenção”. E assim a ICRP adota os três princípios da radioproteção: justificação, otimização da proteção e a restrição de dose aplicada às práticas – sendo que o princípio da justificação tem o sentido de praticar o “bem” mais do que o “mal”. O princípio da otimização da proteção é aplicado também em caso de intervenção. Mas, no caso do princípio da restrição de dose, em caso de intervenção, esse princípio não é aplicável.

Em 2003, a ICRP 91 reforça a necessidade de que a proteção do ambiente como um todo deve receber mais ênfase e começa a desenvolver uma política de orientação para proteção de outros seres vivos (ICRP 91, 2003).

A publicação do ICRP 103 (2007) que substitui o ICRP 60 redefine as situações de exposição de prática e intervenção para três situações de exposição:

- Exposição planejada ou prevista, que é a situação onde deliberadamente são introduzidas e operadas fontes;
- Exposição de emergência, onde é necessário agir de forma urgente para impedir ou reduzir consequências indesejáveis;
- Exposição existente, que já existe quando a decisão de controlar estas consequências é tomada.

Assim, adotando essa abordagem, a ICRP afirma que seu sistema de proteção pode ser aplicado, em princípio, para qualquer situação de exposição à radiação.

As novas recomendações contidas na ICRP 103 influenciaram a nova norma básica de radioproteção da Comunidade Europeia, assim como influenciaram o novo BSS (IAEA, 2011).

O princípio de limitação de dose é aplicado apenas para situações planejadas, enquanto nas situações existentes e de emergência podem ser adotados níveis de referência. Os limites de dose da ICRP 60 são adotados pela ICRP 103.

A ICRP 103 defende que os padrões de controle ambiental em vigor para proteger o público em geral são adequados também para garantir que outras espécies não sejam colocadas em risco. No entanto, propõe enquadrar todas as possíveis situações potenciais de exposição, visando à proteção do ambiente, à utilização de animais e plantas de referência (WRIXON, 2008). Apesar dessa iniciativa, a ICRP não defende a proposição de qualquer forma de limite de dose para a proteção da biota.

2.4.3 Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA–International Atomic Energy Agency)

O estatuto da IAEA prevê sua atuação promovendo a cooperação internacional, pois o risco de eventos envolvendo a radiação ionizante pode transcender as fronteiras nacionais e, portanto, a cooperação promovida pela IAEA tem o objetivo de incrementar a segurança mundial por meio da troca de experiências ou por aumentar a capacidade de controlar riscos ou de prevenir acidentes.

A IAEA não legisla sobre segurança nuclear, essa é uma atribuição dos estados nacionais. Ao promover a cooperação internacional na área de segurança nuclear, a IAEA ajuda a harmonizar as legislações internacionais pertinentes e, assim, facilita o uso seguro da tecnologia nuclear no mundo, além de facilitar também a cooperação técnica e o comércio. As normas da IAEA também fornecem suporte para os estados nacionais demonstrarem que estão cumprindo com as obrigações, que derivam de tratados, acordos ou convenções. (FISCHER, 1997)

As recomendações da IAEA são desenvolvidas através de um processo de compilação, integração e partilha de conhecimento e experiência, obtido a partir do efetivo uso de tecnologia e aplicação de normas de segurança, incluindo a observação de tendências e questões de importância regulatória. Estas normas contribuem para estabelecer harmonização em segurança nuclear pelo mundo, pois servem de referência a nível global e têm uma função relevante na proteção das pessoas e do ambiente no planeta.

As ações da IAEA foram diversas em relação ao NORM e os esforços foram despendidos no sentido de regular e conhecer atividades industriais ou econômicas com potencial impacto de gerar NORM significativamente. Algumas iniciativas por parte da IAEA para fomentar discussões entre os países membros e que geraram a publicação de alguns documentos são abaixo citados:

- IAEA Safety Report on Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry; 2003.

- IAEA Safety Report on Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries, Vienna, Austria, 2007.

Estas iniciativas visavam, principalmente, a especificar as fontes de NORM, conhecê-las e tentar avaliar, gerenciar e regular seus possíveis impactos ambientais.

Na IAEA é publicado o BSS, (Basic Safety Series), sendo que o número 115, de 1996, deu origem à norma CNEN-NN-3.01, de 2005.

Observando os documentos disponibilizados pela IAEA pode-se destacar alguns temas que estão sendo discutidos para a área nuclear e radioativa e que podem estar relacionados com NORM, tais como:

“Stakeholders”, ou partes interessadas, uma vez que as instituições da área nuclear tornaram-se progressivamente mais conscientes de que conhecimento técnico e a confiança neste conhecimento técnico são insuficientes, por si só, para encontrar soluções, para justificá-las a um público amplo ou vê-las implementadas com sucesso.

Segundo a IAEA, a necessidade do envolvimento destes Stakeholders deriva das mudanças no processo de tomada de decisão na sociedade e do aumento da sensibilidade do público a todos os assuntos relacionados com a proteção ambiental, energia nuclear, radioatividade e, especialmente, aos resíduos e rejeitos radioativos. Assim, qualquer decisão sobre se, quando e como instalar indústrias nucleares/radioativas e sobre a gestão de resíduos e/ou rejeitos tem requerido, cada vez mais, uma análise minuciosa do público e o envolvimento de muitas partes interessadas (IAEA, 2007, 2009).

Outro tema diz respeito à proteção à biota (não humanos). Para o estudo na dose para a biota, a IAEA criou grupos de trabalho (EMRAS II)¹.

O BSS foi recentemente atualizado pela IAEA e, embora não ocorra nenhuma modificação radical no texto, algumas alterações foram admitidas. No limite de dose ocupacional houve alteração no novo em relação ao BSS anterior no valor da dose no cristalino do olho, que

¹ <http://www-ns.iaea.org/projects/emras/emras2/default.asp?s=8&l=63>

passou 150 mSv/ano para 50 mSv/ano. Para dose no público o limite de dose continua sendo 1,0 mSv/ano (IAEA, 2011)

Sobre o conceito de nível de referência e de restrição de dose, estes são usados para aperfeiçoar a proteção e a segurança. O resultado pretendido é que todas as exposições podem ser controladas em níveis tão baixos quanto razoavelmente possível, levando em consideração aspectos econômicos, sociais e ambientais.

A restrição de dose é aplicada para exposição ocupacional, assim como para exposição do público em situações de exposição planejada. A restrição de dose não é limite de dose (que é 1,0 mSv/a). Caso a restrição de dose seja ultrapassada isso não representa uma não conformidade com os requisitos regulatórios. O ajuste da restrição de dose precisa ser considerado em conjunção com outras disposições de segurança e com a tecnologia disponível.

Os níveis de referência são usados para aperfeiçoar a proteção e a segurança em situações de exposição em emergência e em situações de exposição existente. Os níveis de referência são estabelecidos ou aprovados pelo governo, pelo órgão regulador ou outra autoridade.

Em caso de exposição ocupacional ou do público em situação de emergência ou situação de exposição existente, o nível de referência atua como condição de contorno para definir o leque de opções com o propósito de aperfeiçoar a implementação das ações de proteção. O nível de referência representa o nível de dose ou o nível de risco acima do qual é considerado inadequado permitir que as exposições possam vir a ocorrer e abaixo do qual é implementada a otimização da proteção e segurança. O valor escolhido para o nível de referência vai depender das circunstâncias para as exposições em consideração. Ele deve ser usado como referência para julgar se novas medidas de proteção são necessárias e, em caso afirmativo, em priorizar a sua aplicação. E em relação à NORM, os resíduos de atividades passadas de atividades não reguladas são considerados situação de exposição existente.

De acordo com o BSS (IAEA, 2011), que foi aprovado em 12 de setembro de 2011 pela Junta de Governadores, os requisitos para situações de exposição planejadas são aplicados à exposição devido ao material, em uma prática, no qual a concentração de qualquer radionuclídeo das famílias de urânio e tório é maior do que 1 Bq/g ou as concentrações de K-40 são maiores que 10 Bq/g. Ainda de acordo com o novo BSS, para situações de exposição a radionuclídeos de origem natural em commodities, incluindo alimentos, rações, água potável, fertilizantes agrícolas

e corretivos de solo e material de construção, o limite de dose é 1 mSv/a (HEDEMANN-JENSEN, 2011).

2.4.4 Legislações no Mundo

Com a finalidade de conhecer como o tema NORM vem sendo normatizado no mundo, foram escolhidos alguns países relevantes para a economia mundial e grandes geradores de NORM na mineração. Os países selecionados foram: Estados Unidos da América, Comunidade Europeia, Canadá e a Austrália.

2.4.4.1 A Legislação nos Estados Unidos da América – EUA

Os EUA são atualmente a maior economia do planeta e possuem o maior número de usinas nucleares comerciais em operação. Existem duas agências federais: a NRC (Nuclear Regulatory Commission) e a EPA (Environmental Protection Agency), que desempenham atividades na área da radioproteção. A NRC, que é uma agência focada na área nuclear e a EPA, que é uma agência que atua na área ambiental.

2.4.4.1.1 Comissão Reguladora Nuclear (NRC - Nuclear Regulatory Commission)

Em 1946, a regulação da área nuclear nos EUA era de responsabilidade da Atomic Energy Commission – AEC. No entanto, devido a críticas quanto ao fato desse órgão estatal e federal acumular as funções de fomentar e incentivar a nascente indústria nuclear e, ao mesmo tempo, a função de estabelecer a segurança dos projetos e empreendimentos na área atômica, em 1974, decidiu-se extinguir a AEC e separar as funções de promoção da energia nuclear da função regulatória, sendo que essa última ficou a cargo da recém-criada NRC (NRC, 2011).

Desde sua criação a NRC teve como foco a radioproteção em reatores, sempre visando evitar a ocorrência de acidentes que poderiam prejudicar a saúde ou a segurança pública. Dessa forma, especial atenção foi dada para a segurança dos sistemas de resfriamento emergencial do núcleo do reator e para a manutenção da integridade do vaso de pressão. Análise de risco são feitas com o intuito de evitar acidentes nos mesmos.

Mesmo assim, em 1979, ocorreu o acidente de Three Mile Island que, embora não tenha liberado grande quantidade de radioatividade para o meio ambiente, teve como consequência o aumento, por parte da NRC, da atenção aos detalhes, como falhas em pequenos equipamentos.

A NRC também atua na área de segurança e salvaguarda de material nuclear, assim como na gestão de rejeito de alto e baixo nível. Atua ainda, de forma limitada, na medicina nuclear, com o objetivo de assegurar que os pacientes recebam a dose adequada ao seu tratamento.

Os limites de dose adotados nos EUA são de 1,0 mSv/ano para o público e 50 mSv/ano para trabalhadores.

No entanto, a NRC não atua, até o momento, diretamente com NORM.

2.4.4.1.2 Agência de Proteção Ambiental (EPA-Environmental Protection Agency)

A EPA foi criada em 1970, com o objetivo de concentrar em uma agência federal diversas atividades relacionadas à proteção ambiental exercida anteriormente por diversos órgãos do governo Americano (EPA, 2011).

A agência de proteção ambiental dos EUA possui alguns regulamentos sobre NORM, pois a EPA pode regular as fontes de radiação ionizante que não foram ou não são licenciadas pela NRC. No entanto, não existe nos Estados Unidos da América uma legislação específica sobre NORM.

No caso que é de interesse desse trabalho, NORM em mineração, a EPA publicou alguns regulamentos baseados nas conclusões de estudos, assim como informações obtidas em organizações voltadas para a radioproteção, em nível nacional e/ou internacional. Dessa forma, a EPA publicou alguma regulação disciplinando alguns aspectos do problema NORM. Podemos

citar o controle de radionuclídeos (polônio e chumbo) liberados para a atmosfera pela indústria do fosfato, assim como a radiação gama oriunda dos radionuclídeos contidos nas pilhas de fosfogesso. Também sobre o fosfogesso, o seu uso na agricultura não pode exceder a uma atividade de 0,37 Bq/g - (10 pCi/g) sendo que os fazendeiros ou agricultores não são obrigados a manter qualquer registro sobre o fosfogesso aplicado na plantação (EPA, 2011). Adicionalmente, a EPA publicou regulamento sobre o controle de emanações e efluentes da indústria de mineração, especialmente a mineração de vanádio.

Portanto, os EUA, sendo a maior economia do planeta, realiza diversas atividades econômicas e/ou industriais que geram NORM, no entanto, não possuem uma legislação nacional específica para NORM, assim como não possuem um órgão específico para tratar desse tema. O problema NORM está sendo regulado por diversas leis, a nível federal e/ou estadual, assim como diversas agências lidam com diversos aspectos relacionados ao NORM.

2.4.4.2 Comunidade Europeia

Para a Comunidade Europeia, a radioproteção segue o paradigma internacional, pois a nova norma básica de radioproteção será inspirada no ICRP 103.

Em relação ao NORM, o *draft* da nova norma básica de radioproteção da Comunidade Europeia, que está em elaboração, escolheu considerar como situação de exposição planejada ou prevista (HEDEMANN-JENSEN, 2010). Por outro lado, no caso das práticas que envolvem materiais radioativos naturais que não são gerenciados como uma situação de exposição planejada é necessário providenciar informações sobre as concentrações e monitorar as exposições para a tomada de medidas corretivas, no sentido de preservar os requisitos de segurança.

O valor limite de dose a ser adotado para membros do público é 0,3 mSv/ano. Além disso, em materiais sólidos contendo radionuclídeos naturais, como urânio 238 e filhos e tório 232 e filhos, o valor da concentração de atividade por radionuclídeo não deve ser superior a 1 Bq/g.

Nas práticas que envolvem NORM, a dose efetiva para os trabalhadores têm como divisor de águas o valor de 6 mSv/ano. Acima deste valor, uma série de requisitos são exigidos. Igual ou

abaixo deste valor, é necessário, no mínimo, que o responsável mantenha uma constante avaliação da exposição dos trabalhadores (HEDEMANN-JENSEN, 2010).

2.4.4.3 Canadá

O setor nuclear começou a ser regulado no Canadá, em 1946, através do *Atomic Energy Control Board* - AECB, que foi substituído em 2000 *pela Canadian Nuclear Safety Commission* - CNSC. Atualmente, o Canadá estabeleceu e segue uma legislação para regular o setor nuclear baseada nos mais recentes conhecimentos científicos nas áreas da saúde, segurança e proteção ambiental. (CNSC, 2008)

A CNSC é responsável por controlar materiais do ciclo do combustível nuclear e materiais contendo radionuclídeos artificiais. Sobre NORM, a CNSC somente poderá atuar nos casos de importação, exportação e transporte desse tipo de material.

O uso de material com NORM associado e também a exposição à radiação ionizante devida ao NORM é regulado por cada província ou território do Canadá. Assim, com a jurisdição sobre o uso e exposição ao NORM sob a responsabilidade de cada província ou território, ocasionalmente ocorrem inconsistências na interpretação ou na aplicação das normas de segurança radiológica no país. Então, com a intenção de evitar essas inconsistências, foi criado o *Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee* – FPTRPC, cujo objetivo é harmonizar o entendimento e a aplicação das normas de segurança radiológica nos níveis federal, provincial e territorial, no que tange ao problema NORM, junto às agências de proteção radiológica em sua respectiva esfera de poder.

A FPTRPC tem como filosofia de trabalho aplicar o mesmo grau de proteção que é dado às instalações e atividades licenciadas pela CNSC, portanto a FPTRPC busca proteger os trabalhadores e o público em geral, do problema NORM, com os mesmos requisitos das normas de proteção radiológica aplicadas pela CNSC. Desta forma, a FPTRPC orienta as diversas agências de proteção radiológica a seguir limites de dose como, por exemplo, para membros do público, uma dose de 1,0 mSv/ano e um valor para restrição de dose de 0,3 mSv/ano (CANADIAN GUIDELINES, 2000).

2.4.4.4 Austrália

O órgão federal responsável pela proteção da população e do meio ambiente dos efeitos deletérios das radiações ionizante e não ionizante é a *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency* – ARPANSA. No entanto, cada estado ou território da Austrália tem a sua própria legislação sobre a radioproteção.

Antes da criação da ARPANSA em 1998, não existia uma legislação que regulasse a nível nacional as fontes de radiação e as práticas realizadas, embora existisse muita atividade envolvendo fontes e material radioativo. A ARPANSA absorveu duas instituições que atuavam de forma restrita e específica (ARPANSA, 2011): O *Australian Radiation Laboratory* – ARL, que era responsável por fornecer informações e recomendações ao governo e a sociedade sobre os efeitos da radiação na saúde e ainda por realizar pesquisas e prover serviços sobre o assunto, e o *Nuclear Safety Bureau* – NSB, que era responsável por regular os reatores de pesquisa.

A ARPANSA tem uma gama de atribuições, dentre elas podemos citar:

- Criação e manutenção de conhecimento em medição de radiação e avaliação dos impactos na saúde.
- Assessorar o Governo e demais interessados, e prestar informações ao público sobre questões relacionadas com a proteção contra as radiações e com segurança nuclear.
- Utilizar a delegação de poderes dado pelo governo central para realizar o licenciamento de instalações e trabalhar com as instituições para garantir a segurança dos equipamentos e fontes de radiação operados por elas.
- Liderar o desenvolvimento de normas, códigos de conduta, diretrizes e quaisquer material relevante para apoiar a proteção contra as radiações e promover a segurança nuclear em toda a Austrália.
- Atuar como instituição de pesquisa e desenvolvimento em proteção radiológica e em segurança nuclear.

2.4.4.4.1 – Austrália e o NORM

Dentre suas atribuições a ARPANSA tem como objetivo identificar e analisar as opções relacionadas às questões que envolvem NORM na Austrália, ao invés de oferecer soluções. O foco dessa iniciativa é que as precauções propostas para as indústrias NORM devem ser baseadas principalmente em controlar a exposição à radiação.

No entanto, como na Austrália cada ente federativo tem seu próprio arcabouço legal na área da radioproteção e, especialmente quando o assunto é NORM, não existe uniformidade de tratamento no país, visto que em um estado pode não existir regulamentação e em outro estado, o mesmo material pode ser regulado, um dos focos da ARPANSA é lidar com a inconsistência da legislação. Assim, a ARPANSA tem atuado no sentido de promover a uniformização da legislação sobre NORM. Para ilustrar essa necessidade de uniformização, um exemplo citado pela ARPANSA é o transporte de mercadoria contendo material NORM através do país ou entre fronteiras de diferentes jurisdições (ARPANSA, 2011).

A ARPANSA segue as orientações da IAEA e, portanto, utiliza como limite de dose para o público o valor de 1,0 mSv/ano e a concentração de atividade de 1 Bq/g como referência (ARPANSA, 2008).

2.4.5 Avaliação Geral da Legislação no Mundo

As instituições internacionais que lidam com a radioproteção no mundo mantêm uma sistemática para a abordagem do assunto. Recentemente foi aprovado o BSS, fruto do entendimento das recomendações contidas no ICRP 103, que também influencia a futura norma básica de radioproteção da Comunidade Europeia que, no momento, é ainda um *draft*. O novo BSS advoga concentrações da ordem de 1,0 Bq/g como um valor limitante para classificar o tipo de exposição (IAEA, 2011). Se as concentrações forem maiores do que este valor, a prática deve ser considerada exposição planejada, desde que não tenha iniciado suas atividades anteriormente a existência de um arcabouço legal, caso no qual é classificada como situação existente.

Em relação ao NORM, todas as instituições indicam que seu controle não difere das instalações nucleares e devem obedecer aos três princípios da radioproteção. As entidades ainda têm discutido alguns temas como: biota (non-human biota) e envolvimento das partes interessadas (*stakeholders*) que provavelmente poderão gerar futuras recomendações.

Todas as instituições se esforçam para manter a coerência em relação ao paradigma da radioproteção atual, embora ainda existam pequenas diferenças conceituais em algum tema específico.

Uma característica em comum a todos os países estudados é que suas legislações, em relação ao problema NORM na mineração, não estão consolidadas, não possuem uma legislação nacional sobre o assunto, somente leis e regulamentos específicos e regionais.

A conclusão possível é que a legislação está em evolução e que novos regulamentos devem surgir no arcabouço legal desses países à medida que novas situações os tornem necessários, ou um consenso capitaneado por uma agenda posta por agências ou instituições internacionais ligadas a radioproteção force uma tomada de posição pelos entes nacionais.

Dessa forma, podemos declarar que, para as empresas mineradoras, é importante observar a evolução da legislação internacional, pois o arcabouço legal está evoluindo, e sempre pode aparecer uma norma ou regulamento novo e mais restritivo.

2.5 Brasil-Legislação

Para legislar o tema NORM no Brasil, algumas entidades estão envolvidas: a CNEN, relacionada a radioatividade, o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), relacionado ao meio ambiente, o DNPM (Departamento Nacional da Produção Mineral), relacionado às permissões de lavra, e instituições ambientais estaduais que têm um papel regional na segurança e proteção da população e do meio ambiente.

2.5.1 Histórico da Legislação Nuclear no Brasil

A legislação nuclear brasileira iniciou somente após a Segunda Grande Guerra, quando a questão atômica se difundiu entre os intelectuais brasileiros. O direito nuclear, no Brasil, tradicionalmente seguiu as regras estabelecidas pelas convenções internacionais.

Em 1956, devido a uma Comissão de Inquérito Parlamentar, que sugeriu uma série de medidas em relação à energia atômica no Brasil, o governo criou, inicialmente por lei (lei 4118, 1962) e depois por decreto, a Comissão Nacional de Energia Nuclear, assim como a política nacional de energia atômica (VENCATO, 1982).

Em 1974, é promulgada uma lei que rege o licenciamento de instalações nucleares, e nos decretos para regulamentar essa lei, fica estabelecido que a Comissão Nacional de Energia Nuclear é a autoridade competente para proceder esse licenciamento e, dessa forma, é a responsável pela emissão das licenças.

No licenciamento de instalações nucleares estão envolvidos tanto aspectos ligados à legislação quanto aspectos ligados à tecnologia. A legislação necessária ao licenciamento de uma instalação nuclear não se restringe somente ao direito nuclear, passa também por outras esferas da legislação nacional. No entanto, a responsabilidade da Comissão Nacional de Energia Nuclear tem especial relevância no ordenamento jurídico do licenciamento, visto que suas normas devem garantir a proteção do homem e do meio ambiente.

O licenciamento nuclear, pelo aspecto técnico, é realizado à luz da melhor tecnologia disponível. Especialistas verificam os processos e componentes e simulam o comportamento dos sistemas do empreendimento, tanto para o caso de operação normal como para o caso de acidente, empregando, sempre que possível, uma metodologia diferente daquela utilizada pelo operador. Os especialistas da Comissão Nacional de Energia Nuclear procedem dessa forma com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos sistemas e equipamentos que operam e são utilizados no projeto da instalação nuclear (VENCATO, 1982). Além da análise da documentação, inspeções também são realizadas, durante as quais são auditados todos os documentos e aspectos que comprovam o controle de qualidade dos equipamentos e processos empregados no projeto.

Em outubro de 1979 foi criada uma lei sobre a responsabilidade civil por danos nucleares e a responsabilidade criminal por atos relacionados às atividades nucleares.

Uma atribuição importante da CNEN é sobre a ocorrência de urânio ou tório associado à substância mineral pesquisada ou lavrada. A autorização de pesquisa será concedida ou mantida, obedecidas as seguintes disposições:

I - o titular ficará obrigado, quando a CNEN o exigir, a efetuar a separação e a entrega à CNEN do urânio ou tório contido no minério extraído;

II - quando a separação do urânio ou tório impuser despesas adicionais ou quando a entrega do produto separado for feita sob a forma de concentrados ou compostos químicos, o titular fará jus ao pagamento estabelecido pela CNEN, na forma a ser regulamentada;

III - quando a separação for considerada pela CNEN inviável para o concessionário, este devolverá à CNEN, por aquisição no mercado externo, concentrados ou compostos químicos contendo quantidades de materiais físséis ou férteis, estabelecidas pela CNEN, com base nos existentes no material extraído. A devolução deverá ser feita, a critério da CNEN, na forma a ser regulamentada;

IV - quando, na hipótese do item III, não for possível ou conveniente adquirir no mercado externo concentrados ou compostos químicos, a forma de devolução ficará a critério da CNEN que estabelecerá, se for o caso, as condições de recolhimento, em moeda corrente, do valor correspondente.

Assim, pelo que a legislação estabelece devido ao monopólio da União, (lei nº 6189, de 16 de dezembro de 1974), no caso de uma instalação com as características da unidade de produção de fertilizantes de Santa Quitéria, o urânio deverá ser entregue de forma gratuita pela Empresa Galvani, que irá explorar o fosfato, para a INB, que é a empresa estatal responsável por processar o minério de urânio para produzir combustível nuclear. O urânio tem a sua mineração controlada pela União através da supervisão e fiscalização da CNEN (VENCATO, 1982).

2.5.2 CNEN e o NORM

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear – CNEN publicou um arcabouço normativo geral com o objetivo de disciplinar e orientar os operadores, a lidarem com a ocorrência de NORM em suas atividades econômicas. A iniciativa principal é a norma CNEN NN-4.01 - REQUISITOS DE SEGURANÇA E PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA INSTALAÇÕES MÍNERO-INDUSTRIAIS, cujo objetivo é o de estabelecer os requisitos de segurança e proteção radiológica de instalações minero-industriais que manipulam e processam, bem como armazenam minérios, matérias primas, estéreis, resíduos, escórias e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e tório, simultaneamente ou em separado, e que possam, a qualquer momento do seu funcionamento ou da sua fase pós- operacional, causar exposições indevidas de indivíduos do público e de trabalhadores à radiação ionizante.

É importante ter em mente que esta norma não se aplica ao uso ou a industrialização posterior de produtos, subprodutos, resíduos, escórias e demais materiais radioativos provenientes das instalações minero-industriais, e que esta isenta de seus requisitos qualquer instalação que apresentem atividade específica (atividade de um radionuclídeo por unidade de massa do material no qual o radionuclídeo está homogeneamente distribuído) das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas inferior a 10 Bq/g (0,27nCi/g) e a dose a que possam estar submetidos os seus trabalhadores seja inferior a 1 mSv/ano.

Para estar sob os requisitos da norma CNEN NN-4.01, é preciso que a instalação seja enquadrada em uma das três categorias, de acordo com as atividades específicas de radionuclídeos presentes no material ou a dose nos trabalhadores:

- Categoria I: São instalações que apresentam atividades específicas das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas superiores a 500 Bq/g.
- Categoria II: Nesse caso estão instalações que apresentam atividades específicas das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentradas entre 500 e 10 Bq/g.
- Categoria III: São instalações com materiais com atividades específicas inferiores a 10 Bq/g, ou a doses nos trabalhadores são superiores a 1,0 mSv/ano.

Todas as instalações minero-industriais devem, por norma, apresentar a CNEN as seguintes informações:

a) Fluxograma simplificado do processo operacional, acompanhado do respectivo balanço de massa e da planta geral da instalação;

b) Teores medidos ou estimados de urânio, tório, ^{226}Ra , ^{228}Ra e ^{210}Pb nos minérios, concentrados, estéreis, rejeitos líquidos e sólidos, resíduos, efluentes, produtos e subprodutos, ligas e escórias;

c) Capacidade nominal da instalação e estoques máximos das matérias-primas contendo urânio, tório e seus descendentes;

d) Estimativa da solubilidade dos radionuclídeos associados aos resíduos e rejeitos sólidos nos cenários de interesse;

e) Descrição das instalações de armazenamento de matérias-primas, produtos, resíduos e rejeitos, contendo radionuclídeos;

f) Descrição dos sistemas de deposição e contenção de resíduos e rejeitos contendo radionuclídeos das séries naturais do urânio e ou tório, incluindo bacias de rejeitos e pilhas de estéreis; indicando o montante depositado/armazenado, a capacidade de armazenamento e a vida útil prevista para esses sistemas. Descrição das liberações e os fluxos de efluentes desses sistemas para o meio ambiente.

g) Descrição preliminar do ambiente circunvizinho à instalação, com apresentação de mapas, plantas ou desenhos, em escalas adequadas, indicando a existência de corpos receptores (rios e/ou lagos), suas vazões médias anuais, tipos de lavouras desenvolvidas na área de influência da instalação com eventual uso de irrigação, criação de gado de corte ou leiteiro, existência de aquíferos na área de influência da instalação.

Após esse procedimento e a subsequente avaliação para enquadrar a instalação em uma das três categorias previstas pela norma, então, dependendo da categoria em que a instalação for

classificada, novos requisitos devem ser supridos, com exceção para as instalações da categoria III, que basta somente às informações já prestadas anteriormente.

Para as instalações de categoria II, é necessária a apresentação do Relatório de Análise de Segurança Simplificado - RASS. A relação dos tópicos que constituirão este Relatório RASS será encaminhada formalmente pela CNEN à Operadora. E de posse do RASS a CNEN poderá então avaliar se os requisitos de segurança e proteção radiológica foram devidamente atendidos pela instalação.

Para as instalações de categoria I, é necessária a apresentação do Relatório de Análise de Segurança - RAS, que é um documento muito minucioso e os seus diversos requisitos estão listados na norma CNEN NN-4.01 os quais, após serem devidamente atendidos pela instalação, darão à CNEN as condições para avaliar a segurança e a proteção radiológica da instalação. As informações necessárias para os documentos RAS e RASS podem ser encontradas na respectiva norma. A Figura 3 retrata de forma simplificada as principais etapas para contemplar os requisitos estabelecidos pela norma CNEN NN-4.01.

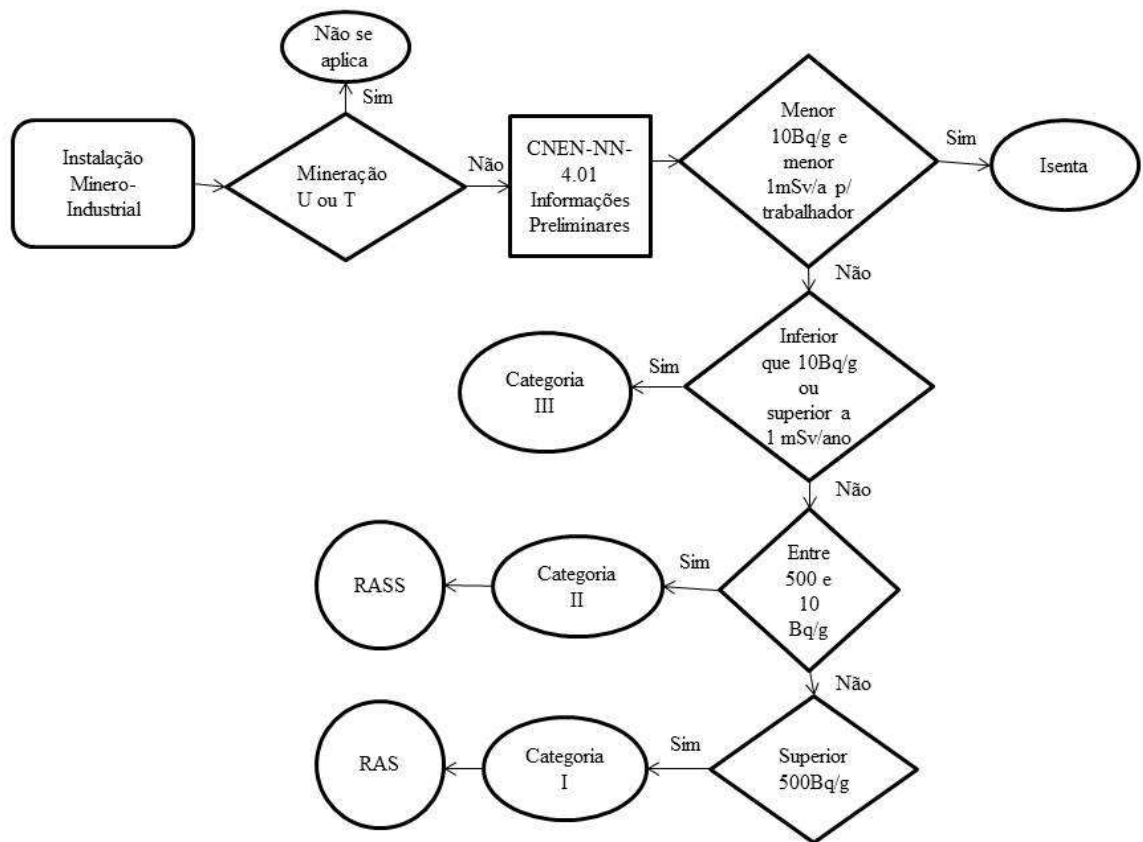


Figura 3 - Fluxograma de classificação das indústrias NORM segundo a Norma 4.01 (as doses são relacionadas aos trabalhadores)

Além disso, a CNEN poderá intervir e determinar a implementação de medidas mitigadoras ou a implementação de ações de remediação nos seguintes casos:

a) quando as doses para indivíduos do grupo crítico excedam 0,3 mSv por ano, devido à liberação de efluentes (aéreos ou líquidos) ou drenagens resultantes de rebaixamento de aquíferos ou desvios de cursos d'água;

b) quando os níveis de ^{222}Rn em locais de trabalho, como galerias de minas subterrâneas e galpões de armazenamento de materiais radioativos, sejam superiores a 1.000 Bq/m^3 .

Chama atenção que não é requisito da NORMA 4.01 uma avaliação por parte do operador do potencial impacto radiológico ambiental decorrente das atividades da empresa.

Outros conceitos que são importantes para NORM e que estão presentes na legislação nacional são: a exclusão, a isenção e a dispensa e situação de exposição crônica.

- i. A exclusão, segundo a Posição Regulatória 3.01/001 de 2011 da norma CNEN-NN-3.01 é um conceito usado para as exposições à radiação ionizante em que a intensidade ou a probabilidade de ocorrência de exposição não pode ser reduzida por ações de proteção radiológica ou naqueles casos que a própria CNEN decidir considerar excluído do seu controle. Ex.: potássio 40 no corpo humano.
- ii. A isenção, segundo a CNEN, considera desobrigar do controle regulatório práticas cujos níveis de exposição à radiação ionizante são tão baixos, que são considerados insignificantes do ponto de vista de radioproteção. Assim, são isentas práticas cujas doses efetivas para o indivíduo do público é menor ou equivalente a $10 \mu\text{Sv}$ em qualquer período de um ano, e a dose coletiva, em qualquer ano de condução da prática, não seja superior a 1 pessoa.Sv , a menos que a relevância social demonstre que a isenção é a solução ótima para aquela prática. Os materiais radioativos não devem ultrapassar os níveis de isenção da posição regulatória 3.01/001 da CNEN e para a isenção a quantidade de material não deve ultrapassar o valor de uma tonelada.
- iii. Os valores utilizados para dispensa incondicional de rejeitos sólidos devem ser no máximo iguais aos níveis de isenção. Os valores para dispensa de grandes quantidades de material (entendendo grandes quantidades como um valor maior que uma tonelada de material), como por exemplo estéreis ou rejeitos de mineração, devem ser estabelecidos pela CNEN, caso a caso. Para o grupo crítico, o limite de restrição de dose, devido à descarga de efluentes radioativos, é de $0,3 \text{ mSv/ano}$.

Sobre os critérios de isenção para resíduos oriundos em instalações minero-industriais, no momento, somente o fosfogesso possui uma resolução CNEN disciplinando o seu uso na indústria cimenteira e na agricultura (Res. CNEN nº 113, 24/08/2011). O nível de isenção estabelecido pela portaria foi de $1,0 \text{ Bq/g}$ para concentração em atividade de ^{226}Ra ou de ^{228}Ra .

A posição regulatória 3.01-007 da CNEN classifica como situação de exposição crônica áreas contaminadas por resíduos de indústrias fora do escopo de regulamentação da CNEN (extração mineral, beneficiamento de minérios ou manipulação de seus produtos e sub-produtos) e estabelece um nível de referência de 50 mSv/a para a intervenção, independente da justificativa, e um nível de 10 mSv/a para avaliação da ação de intervenção visando membros do público. Assim, entre 10 mSv/a e 50 mSv/a a necessidade de intervenção para reduzir a dose para membros do público através da utilização de medidas protetoras e remediação da área deve ser avaliada.

2.5.3 O IBAMA e o Licenciamento Ambiental

O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) é uma autarquia federal com a finalidade de exercer o poder de polícia ambiental, executar ações das políticas nacionais de meio ambiente, referentes às atribuições federais, relativas ao licenciamento ambiental, ao controle da qualidade ambiental, à autorização de uso dos recursos naturais e à fiscalização, monitoramento e controle ambiental e executar as ações supletivas de competência da União de conformidade com a legislação ambiental vigente. Assim, qualquer instalação, inclusive as instalações NORM, deve se submeter a uma série de requisitos com a finalidade de obter uma licença ambiental concedida pelo IBAMA.

O Licenciamento Ambiental é um instrumento da Política Nacional de Meio Ambiente com a finalidade de promover o controle prévio da construção, instalação, ampliação e funcionamento de estabelecimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, considerados efetiva e potencialmente poluidores, bem como os capazes, sob qualquer forma, de causar degradação ambiental (FARIAS, 2002). O Licenciamento é, portanto, um procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais.

Neste contexto, a avaliação de impacto ambiental deve ser uma atividade contínua, antes e posterior à tomada de decisões, procedendo-se a sua revisão e atualização periodicamente, após o pleno funcionamento do projeto ou atividade.

2.5.3.1 Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e Relatório de Impacto Ambiental (RIMA)

O EIA é um documento de natureza técnica, que tem como finalidade avaliar os impactos ambientais gerados por atividades e/ou empreendimentos potencialmente poluidores ou que possam causar degradação ambiental. Deverá contemplar a proposição de medidas mitigadoras e de controle ambiental, garantindo assim o uso sustentável dos recursos naturais.

O estudo de impacto ambiental deverá abordar, no mínimo, os seguintes aspectos:

- Diagnóstico ambiental da área de influência do projeto, contendo descrição dos recursos ambientais e suas interações, caracterizando as condições ambientais antes da implantação do projeto. Este diagnóstico deverá contemplar os meios físico, biótico e socioeconômico.
- Análise dos impactos ambientais do projeto e de suas alternativas, por meio de identificação, previsão da magnitude e interpretação da importância dos prováveis impactos relevantes (diretos e indiretos, imediatos e a médio e longo prazo, temporários e permanentes, seu grau de reversibilidade, e a distribuição dos ônus e benefícios sociais).
- Medidas mitigadoras - são aquelas destinadas a corrigir impactos negativos ou a reduzir sua magnitude. Identificados os impactos, devem-se pesquisar quais os mecanismos capazes de reduzi-los ou anulá-los.
- Programas de acompanhamento e monitoramento, estabelecidos ainda durante o EIA, de modo que se possa comparar, durante a implantação e operação da atividade, os impactos previstos com os que efetivamente ocorreram.

O Relatório de Impacto Ambiental - RIMA deve refletir as conclusões do EIA e tem como objetivo informar à sociedade sobre os impactos, medidas mitigadoras e programas de monitoramento do empreendimento ou atividade. Para que esse objetivo seja atendido, o RIMA

deve ser apresentado de forma objetiva e de fácil compreensão. As informações devem ser apresentadas em linguagem acessível, acompanhadas de mapas, quadros, gráficos etc., de modo a que as vantagens e desvantagens do projeto, bem como todas as consequências ambientais de sua implantação, fiquem claras.

2.5.3.2 Da Concessão das Licenças

Para a concessão da licença ambiental, a instalação deve passar por um processo que envolve a obtenção de licenças em diferentes fases do projeto.

Licença Prévia-LP: A Licença Prévia é concedida na fase preliminar do planejamento de um empreendimento ou atividade, aprovando sua localização e atestando sua viabilidade. Após exame dos impactos ambientais por ele gerados, dos programas de redução e mitigação de impactos negativos e de maximização dos impactos positivos, é necessário que o órgão licenciador competente tenha informações suficientes para análise e a tomada de decisão.

Licença de Instalação – LI: A Licença de Instalação autoriza a instalação do empreendimento ou atividade de acordo com as especificações dos projetos aprovados, constando desses projetos as medidas de controle ambiental e todas as outras condicionantes. A validade dessa licença é de, no máximo, seis anos.

Licença de Operação – LO: O operador solicita a Licença de Operação – LO e apresenta um relatório sobre o atendimento às condicionantes da LI. O prazo de validade da Licença de Operação - LO deverá considerar os planos de controle ambiental e será de, no mínimo, quatro anos e, no máximo, dez anos. O órgão licenciador acompanha a execução dos programas de monitoramento, com vistorias e análise de relatórios periódicos que deverão ser apresentados pelo empreendedor.

2.5.4 DNPM - NORM

O Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM é órgão responsável pela gestão dos recursos minerais brasileiros, promovendo o planejamento e o fomento da exploração mineral (DNPM, 2009), além de controlar e fiscalizar o exercício das atividades de mineração em todo o território nacional, na forma do que dispõem o Código de Mineração, o Código de Águas Minerais, os respectivos regulamentos e a legislação que os complementa.

É o responsável pela outorga ou de propô-la à autoridade competente, quando for o caso, dos títulos minerários relativos à exploração e ao aproveitamento dos recursos minerais e expedir os demais atos referentes à execução da legislação minerária; coordenar, sistematizar e integrar os dados geológicos dos depósitos minerais, fomentar e fiscalizar a produção mineral e estimular o uso racional e eficiente dos recursos minerais, e exercer a fiscalização sobre o controle ambiental, a higiene e a segurança das atividades de mineração, atuando em articulação com os demais órgãos responsáveis pelo meio-ambiente, segurança, higiene e saúde ocupacional dos trabalhadores (DNPM, 2010).

O DNPM, em relação à radioproteção, tem como premissa valer-se da regulação da CNEN, portanto, quando, por exemplo, da utilização de fontes ou medidores radioativos pelas empresas, devem ser obedecidas as normas de radioproteção da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, especialmente nas NE n.ºs 3.01/83; 6.02/84; 3.02/88; 3.03/88 e alterações posteriores. Deve-se manter à disposição da fiscalização seu Plano de Radioproteção, os resultados de exposição dos trabalhadores e dos levantamentos radiométricos, além dos certificados de calibração dos aparelhos de medição. Todas as fontes radioativas e áreas com possibilidade de expor os trabalhadores devem ser mantidas sinalizadas e com acesso restrito. Os trabalhadores sujeitos à exposição de radiações ionizantes e os que transitem por áreas onde haja fontes radioativas devem ser informados sobre os equipamentos, seu funcionamento e seus riscos. Os trabalhos envolvendo radiações ionizantes devem possuir orientação de um Supervisor de Radioproteção habilitado pela CNEN. As fontes radioativas suplementares e as fora de uso devem estar armazenadas segundo as normas da CNEN.

O DNPM não possui uma legislação específica sobre NORM.

2.5.5 Avaliação Geral da Legislação no Brasil

A legislação nacional compartilha a tarefa de zelar pelo meio ambiente e pela proteção aos trabalhadores e o público em geral através de diversas instituições e nos três níveis da administração pública: o federal, o estadual e o municipal.

O arcabouço legal brasileiro é moderno e se esforça para seguir as tendências internacionais relativas ao tema. No entanto, também é confuso e complexo, ensejando diversos conflitos de competência e sobreposição de demandas legais (FARIAS, 2002). No caso específico de NORM a legislação não é clara. A competência legal da CNEN para exercer o controle regulatório sobre as indústrias NORM pode ser questionada. Por outro lado o DNPM, a quem talvez pudesse caber este controle, não possui os instrumentos legais para tal.

Não está contemplado na norma CNEN 4.01 a exigência de avaliação de impacto radiológico ambiental para qualquer das categorias de instalações e, portanto, não é exigência que o operador avalie a exposição do público. Além disto, a norma isenta de seus requisitos as instalações que apresentem atividades específicas das substâncias radioativas sólidas naturais ou concentrada inferior a 10 Bq/g e a dose a que possam estar submetidos os seus trabalhadores seja inferior a 1,0 mSv/ano. Deve-se chamar atenção que tanto o BSS 2011, quanto o futuro BSS europeu já consideram que devem estar sobre controle regulatório, indústrias de mineração que estão iniciando suas atividades, cujo material contenha concentrações específicas de radionuclídeos maiores que 1,0 Bq/g.

Para o trabalhador em situações planejadas a NORMA CNEN 4.01 estabelece o mesmo valor do limite de dose para indivíduos do público, ou seja, 1 mSv/a. De modo geral, os limites de dose preconizada pela CNEN para os trabalhadores nas situações existentes e planejadas são mais restritivos que aqueles recomendados pela IAEA (BSS, 2011). E algumas legislações, como a brasileira, estipulam um limite de dose para o público de 1,0 mSv/ano, para situações planejadas, o que é uma tendência internacional capitaneada pela IAEA.

Harmonizar a legislação atual, estabelecer as competências devidas e descentralizar o licenciamento e a fiscalização dos empreendimentos que potencialmente podem causar dano ou por em risco a população, os trabalhadores ou o meio ambiente, deve ser uma meta para a

administração pública. Como a CNEN segue as recomendações da IAEA, é provável que as suas normas venham a ser atualizadas no futuro segundo o novo BSS (IAEA, 2011).

2.6 Sistemas de Apoio à Decisão e Modelo Conceitual

Sistemas de apoio à decisão são ferramentas que auxiliam na tomada de decisão em problemas estruturados, semiestruturados e não estruturados.

Os problemas estruturados são aqueles que podem ser perfeitamente definidos, pois as suas variáveis são conhecidas. Um exemplo de problema estruturado é aquele problema rotineiro e repetitivo para o qual já existe uma metodologia para se chegar a uma solução.

Os problemas semiestruturados são aqueles que somente parte do problema tem uma solução definida fornecida por uma metodologia aceita, somente algumas partes do problema podem ser resolvidas por um procedimento automatizado.

Os problemas não estruturados são caracterizados pela incerteza, são de difícil automação, podem apresentar variáveis desconhecidas e/ou dados indisponíveis e necessitam do julgamento e intervenção humana para a sua solução. Um programa não estruturado não apresenta um procedimento padrão, não é rotineiro (FERREIRA, 2007).

Existem diversas definições para sistemas de apoio à decisão disponível na literatura. No entanto, nenhuma tem aceitação universal, cada uma dessas definições pode ser adequada para uma ou mais situações e ainda assim, não ser ampla o bastante para suportar todas as possibilidades apresentadas pelas diversas circunstâncias.

A taxonomia dos sistemas de apoio à decisão também não tem aceitação universal, pois os diversos sistemas de apoio a decisão são agrupados pelos autores das mais diversas formas. Entretanto, as diversas classificações permitem que sistemas sejam agrupados por determinado autor e separados por outro.

Os sistemas de apoio à decisão começaram a ser estudados no final da década de cinquenta no Instituto Carnegie, (KEEN e SCOTT MORTON, 1978), onde o enfoque foi sobre estudos teóricos do processo de tomada de decisão organizacional. Na década de sessenta o Instituto de Tecnologia de Massachusetts desenvolveu alguns trabalhos técnicos (SHIM et al, 2002) (POWER, 2003). Antes de 1965, devido aos custos e às limitações dos equipamentos e programas de informática, somente grandes companhias tinham informatizado algumas rotinas

gerenciais, como relatórios de contabilidade (POWER, 2003 apud DAVIS, 1974). No final desta década, se tornou viável o aparecimento de sistemas de apoio à decisão, assim como de sistemas de planejamento estratégico, isso porque no Carnegie Institute of Technology e no Massachusetts Institute of Technology, desde o início da década, já se estudava a teoria da decisão e o uso de computadores suportando estes sistemas (POWER, 2003 apud KEEN e SCOTT MORTON, 1978). Nos anos 70, os sistemas de apoio à decisão passaram a aplicar modelos quantitativos para decidir sobre problemas gerenciais das empresas (TEXEIRA JUNIOR, 2005 apud MARAKAS, 1999).

Dessa forma, os sistemas de apoio à decisão diversificaram suas capacidades de atuação, passaram a ter uso em áreas como: produção, marketing, preços e mercado de ações. Paralelamente estes sistemas ficaram gradativamente cada vez mais sofisticados. A teoria sobre sistemas de apoio a decisão também evoluiu, auxiliada por eventos que divulgavam suas capacidades, como por exemplo, a Conference on Decision Support Systems, em São Jose, na Califórnia, nos Estados Unidos, em janeiro de 1977.

Na década de 80, foram desenvolvidos os códigos computacionais e sistemas de apoio à decisão em grupo, como por exemplo, o PLEXSYS, em 1984. Na década de 90, surgiu o uso de processamento on-line (OLAP). Outra evolução foi a passagem do uso de *mainframes* para o uso da arquitetura *client-server*, devido ao desenvolvimento tecnológico dos equipamentos e programas de informática. Também nesta década, os interessados no desenvolvimento de sistemas de apoio a decisão começaram a convergir a tecnologia desses sistemas para utilizar as facilidades disponibilizadas pela internet (BHARGAVA e POWER, 2001).

Em consequência de todo este desenvolvimento, os sistemas de apoio a decisão (SADs) passaram a ser intensivamente utilizados e vêm sofrendo aperfeiçoamentos contínuos. Suas aplicações são tantas que, com o atual nível de conhecimento da tecnologia, os SADs, podem ser aplicados em praticamente qualquer área do conhecimento. Os sistemas de apoio à decisão evoluíram no sentido de aumentarem a sua complexidade e também, de apresentarem um amplo espectro de aplicações, apoiando a tomada de decisão em um número crescente de áreas de interesse. Os sistemas de apoio à decisão, de uma forma geral, estão tendendo a apresentarem os resultados on-line, mesmo para usuários remotos, acessando a qualquer hora e de qualquer lugar, com apresentações contendo gráficos e fluxogramas, se assim for necessário, e trabalhando sobre uma enorme massa de dados.

Quase qualquer problema e as suas possíveis soluções podem ser descritas em um modelo conceitual, que pode se tornar uma ferramenta para auxiliar na tomada da melhor decisão dentre as possíveis soluções conhecidas para aquele determinado problema.

O objetivo de um modelo conceitual é criar um sistema coerente de relações claramente mapeadas para o domínio da tarefa do usuário. Consta de um conjunto de suposições baseadas no mundo real que indicarão as regras de um sistema, ajudando no entendimento dos processos. Portanto, modelo conceitual é a descrição do sistema proposto na forma de um conjunto de idéias e conceitos integrados, cujo objetivo é ajudar a destacar conexões importantes em processos do mundo real.

2.7 Partes Interessadas - *Stakeholders*

Existem diversas definições para *stakeholder* (partes interessadas) na literatura, (ARAÚJO JUNIOR, 2008), pois é um ramo do conhecimento relativamente recente. A Teoria dos Stakeholders surgiu na década de 80, (MAINARDES et al, 2011), com a obra de Friedman, (1984), intitulada *Strategic Management: A Stakeholder Approach*, e é fundamentada em algumas áreas do conhecimento como o Planejamento Corporativo, a Teoria dos Sistemas, a Responsabilidade Social Corporativa e a Teoria das Organizações.

Stakeholders são as partes interessadas, são todos aqueles interessados ou que podem vir a ser interessados em um processo, como por exemplo, os acionistas de uma empresa petrolífera ou os clientes de uma empresa de tv a cabo ou os moradores de uma cidade na qual a empresa esta instalada. A Figura 4 ilustra alguns *stakeholders*:

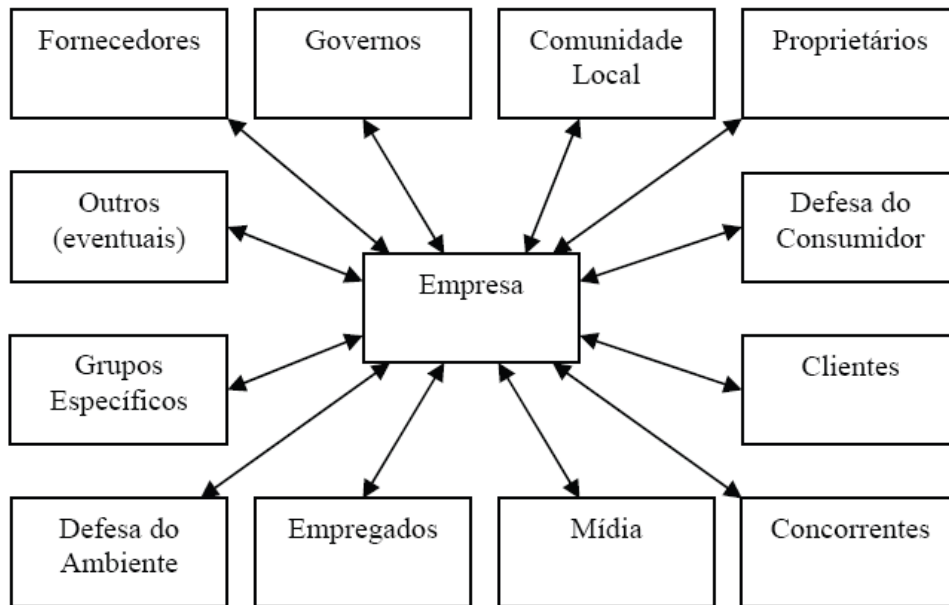


Figura 4: A empresa e os *stakeholders*. Fonte: MAINARDES et al, 2011

Os *stakeholders* estão vinculados aos indicadores de sustentabilidade que, por sua vez, estão vinculados ao desenvolvimento sustentável. O conceito de desenvolvimento sustentável envolve um difícil equilíbrio entre a equidade social, a proteção do ambiente e o crescimento econômico.

Uma definição proposta por Brundtland, 1987, para desenvolvimento sustentável é:

“O desenvolvimento que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazerem as suas próprias necessidades, significa possibilitar que as pessoas, agora e no futuro, atinjam um nível satisfatório de desenvolvimento social e econômico e de realização humana e cultural, fazendo, ao mesmo tempo, um uso razoável dos recursos da terra e preservando as espécies e os habitats naturais.”

Pois a abordagem estratégica para o desenvolvimento sustentável enfoca o potencial de gerar e manter a vantagem competitiva através da integração das questões sociais e ambientais na estratégia corporativa. No entanto, para avaliar o progresso nessa abordagem estratégica é

necessário ter parâmetros, esses são os indicadores de sustentabilidade, que somente fazem sentido quando, de alguma forma, estabelecem um vínculo com *stakeholders*.

É muito importante definir quais são as partes interessadas e qual é o interesse de cada uma dessas partes em relação à empresa, para que a mesma possa se preparar para lidar com as demandas específicas de cada um dos diferentes *stakeholders* e também para identificar uma hierarquia, caso exista, entre as demandas e as ações necessárias para satisfazer essas demandas. Um indicador é algo mensurável, (VILLAS BÔAS, 2009), e essa medida pode ser quantitativa ou qualitativa. O indicador de sustentabilidade deve estar vinculado ao *stakeholder*, de alguma forma. Para definir quem ou quais grupos são os *stakeholders* em determinado processo, existe na literatura diversas metodologias (MAINARDES, 2011).

Uma metodologia utilizada é a dos três atributos: poder, legitimidade e urgência (ARAUJO JUNIOR, (2008) apud MITCHEL, AGLE E WOOD, (1987)). O uso desses atributos para caracterizar as diferentes classes de *stakeholders* também estabelece a sua relevância para o processo. Conhecendo-se a relevância e o impacto que determinados *stakeholders* podem causar, uma política para lidar com cada um deve ser definida pela empresa.

Outra forma de classificar os *stakeholders* (ARAUJO JUNIOR, (2008) apud WOOD, (1992)), é fazê-lo dividindo em duas categorias:

- Os primários: proprietários, clientes, fornecedores empregados e a concorrência.
- Os secundários: governos internos, governos externos, mídia, comunidade, organizações sem fins lucrativos, analistas financeiros e instituições financeiras.

Uma metodologia para análise dos *stakeholders* precisa primeiro identificar os seus interesses e grau de influência. Para tanto pode se usar um questionário genérico retirado da literatura. Em seguida a coleta das respostas e a consequente caracterização do grau de influência de cada *stakeholder*, um especialista sobre assunto deve ser consultado com o fito de evitar que a análise seja tendenciosa (ARAUJO JUNIOR, 2008). Então é possível agrupar os *stakeholders* em classes, (BANERGEE et al, 2011), e caracterizá-los segundo os interesses da empresa ou em

relação a um projeto. Em seguida, estabelecer estratégias diferenciadas para lidar ou tentar satisfazer cada conjunto de *stakeholders*.

Enfim, existem na literatura diferentes formas para classificar os *stakeholders* e verificar as suas expectativas, e relevância para o projeto, sendo importante ter em perspectiva que ao adotar uma metodologia, deve ter em mente o cenário de atuação da empresa ou projeto.

Alguns países já adotam normalmente a participação ativa dos *stakeholders* nas diversas fases de seus projetos nucleares/radioativos (NRC, 2003). Além disto, fica claro pelos trabalhos e discussões desenvolvidos na IAEA que esta participação deverá ser doravante estimulada e amplificada, com vistas a garantir a sustentabilidade da atividade.

2.8 Biota

A radioproteção é historicamente orientada para a proteção dos humanos, pois existe a suposição que se as pessoas estão protegidas, então o meio ambiente estará protegido como um todo. Ou seja, a avaliação do impacto radiológico de instalações nucleares e/ou radioativas é realizada focada no homem como receptor final da dose (ICRP 60, 1991). Entretanto, existe a necessidade de provar esta suposição de forma independente e científica.

Para isso se faz necessário criar uma metodologia para avaliar os impactos da radiação na biota. Essa metodologia para avaliar o risco ecológico deve conter (DELISTRATY, 2008) os limites de dose e a definição ou escolha de organismos de referência para cada ambiente ou região geográfica. Adicionalmente, há o desenvolvimento de modelos dosimétricos para os organismos de referência que necessitam ser reavaliados periodicamente por especialistas, na medida em que novos conhecimentos forem sendo apresentados.

Atualmente, existem diversas iniciativas para aumentar o conhecimento científico sobre a influência da radioatividade na biota, tal como o ICRP que criou o quinto comitê em 2003, que é voltado para a proteção a biota. O quinto comitê começou sua missão em 2005 e publicou em 2008 o ICRP 108, que introduz o conceito de plantas e animais de referências, define um pequeno conjunto destes animais e plantas e deriva um conjunto de dados tabulados de fatores de conversão de dose que permite calcular a dose para 75 radionuclídeos para estes organismos (ICRP 108, 2008).

No entanto, essas iniciativas não refletiram sobre o arcabouço legal dos órgãos responsáveis pela regulação dos limites de dose permissíveis, porque não existe um consenso internacional sobre os efeitos da radioatividade na biota, mas as pesquisas continuam e a IAEA esta promovendo discussões sobre o tema².

A proteção do meio ambiente necessita ser demonstrada com a presença ou ausência de pessoas no bioma, visto que valores relativos à biodiversidade e à sustentabilidade ambiental estão se tornando cada vez mais preciosos. Alguns países já introduziram, em seu arcabouço legal, a proteção a biota e organismos internacionais vinculados à radioproteção, como já mencionados anteriormente nesta dissertação, vêm estudando e discutindo a propriedade de recomendar a sua introdução na legislação nuclear.

² <http://wwwns.iaea.org/projects/emras/emras-biota-wg.htm>

3 MODELO CONCEITUAL

A proposta de trabalho da dissertação é descrita neste capítulo e está estruturada com o objetivo é produzir um modelo conceitual para apoio à tomada de decisão para empresas de mineração e beneficiamento de minério que eventualmente lidam com NORM.

Desse modo, foi feita uma revisão bibliográfica sobre NORM, as principais indústrias que o produzem e sobre a indústria de fertilizantes e dos seus rejeitos. Foi feita ainda uma avaliação da legislação em vigor, no mundo e no Brasil, e uma busca sobre os principais temas ora em discussão nas principais entidades da radioproteção, que poderiam vir a impactar uma indústria NORM.

Visto que no desenvolvimento do modelo ficou clara a necessidade de avaliar a exposição do público e da biota, foi necessário o uso de ferramentas para avaliação de impacto radiológico ambiental para o indivíduo do público, bem como para biota.

A avaliação do impacto radiológico ambiental da pilha de fosfogesso foi realizada utilizando os programas de simulação RESRAD OFFSITE e RESRAD ONSITE (6.5). Esses códigos foram desenvolvidos pelo Argonne National Laboratory, com contribuições do Oak Ridge National Laboratory. Ambas as instituições são consagrados centros de pesquisa e isso orientou a escolha de dois de seus produtos, os códigos da família RESRAD, para serem utilizados como ferramentas nestas avaliações. Estes códigos estão disponíveis no endereço <http://www.evs.anl.gov/resrad> e são **gratuitos**, assim como os seus manuais.

RESRAD 6.5 e RESRAD 2.6 são códigos extensivamente testados, verificados e validados na área de avaliação de risco ambiental. São os códigos de computador designados pelo DOE (Departamento de Energia EUA) para a avaliação de sítios radiológicos contaminados. Nos EUA, a Comissão Reguladora Nuclear (NRC) também aprovou o uso de RESRAD para a avaliação da dose no descomissionamento de instalações nucleares (EVS, 2011).

Para a biota, foi utilizado o código ERICA, que vem a ser um código computacional desenvolvido para avaliar o risco radiológico de plantas e animais selecionados em: água superficial, ambiente marinho e terrestre. A ferramenta foi desenvolvida com modelos de transporte simples para permitir estimativas conservativas, partindo da presença de substâncias radioativas no meio ambiente (FACILIA, 2011).

A metodologia acima descrita foi aplicada para o desenvolvimento do modelo conceitual para lidar com o problema NORM em instalações industriais de mineração e beneficiamento de minério no Brasil. Este modelo conceitual se propõe a orientar os tomadores de decisão e demais interessados que, ao implantar uma indústria a princípio convencional, se depara com o problema de NORM. Para a formulação deste modelo conceitual, algumas decisões foram tomadas:

- i. Como valor de referência para isentar as indústrias NORM de controle regulatório em relação a NORM, foi escolhido o valor de 1,0 Bq/g, uma vez que a literatura especializada e as normas internacionais indicam esta tendência.
- ii. Foi ainda decidido adotar a terminologia *grupo crítico*, considerando que, segundo o novo BSS (IAEA, 2011) o conceito de *grupo crítico* continua válido, muito embora a ICRP-101 (ICRP, 2006) adote o conceito de *indivíduo representativo*, no lugar de *grupo crítico*.

O primeiro passo é verificar se a instalação é nuclear, pois o modelo não se aplica se a instalação for dedicada à mineração e ao beneficiamento de urânio e/ou tório, uma vez que no Brasil esse tipo de empreendimento é sujeito a uma legislação específica para instalações nucleares.

Uma indicação importante sobre quais instalações podem vir a ter problemas relacionados à NORM é dada por uma lista de empreendimentos com maior probabilidade de ocorrência de NORM, compilada pela IAEA e disponível nesta dissertação.

Para fazer uso do modelo conceitual, o responsável na empresa deve observar os preceitos na sequência informada a seguir:

- A instalação minero-industrial que pode utilizar este modelo conceitual é toda aquela que está em situação de exposição planejada ou em situação de exposição existente. No primeiro caso, a instalação está em fase de planejamento. No segundo caso a instalação está em funcionamento ou desativada ou com as operações suspensas.
- Sendo uma instalação minero-industrial convencional, então deve-se proceder ao levantamento das informações preliminares. Deve-se caracterizar o processo de beneficiamento (operações unitárias e processos químicos) verificando em que etapa do processo de produção da instalação industrial pode ocorrer à formação de NORM, lembrando que o descomissionamento da instalação também é uma etapa

importante e deve ser levada em consideração nesse momento. É importante, também, nesta etapa, fazer um levantamento de seus *stakeholders*.

- Após a caracterização do processo e não havendo uma concentração de atividade superior a 1,0 Bq/g, em nenhum material processado na instalação, então a instalação deve ser considerada isenta de controle regulatório em função de NORM. Esta informação deve ser repassada para os *stakeholders*.
- Caso seja detectado um ou mais radionuclídeos com concentrações de atividade superiores a 1,0 Bq/g em qualquer material processado, então é necessário proceder a um levantamento de informações básicas sobre o local e hábitos de sua população.
- De posse desses dados, deve-se proceder à avaliação da dose no grupo crítico (a população teoricamente mais exposta) e no trabalhador. Para isso é importante estabelecer os cenários e as vias de exposição e, usando códigos computacionais apropriados e parâmetros genéricos e abordagens conservativas, avaliar a dose.
- Se a dose não for superior aos critérios de níveis de dose³, então a instalação esta isenta de controle regulatório em função de NORM. Os *stakeholders* devem ser informados.
- Adicionalmente, é sugerido ao responsável pela instalação um comportamento proativo no sentido de estimar a dose para a biota, que até o momento não possui um limite de dose. Caso as doses de referência⁴ para a biota sejam ultrapassadas, então uma estratégia para evitar ou minimizar este detrimento deve ser implementada, levando em consideração os interesses dos *stakeholders*.
- Caso os níveis de dose para humanos sejam suplantados, é necessário realizar uma abordagem mais realista na avaliação da dose e pesquisar sobre as condições críticas responsáveis por essa dose. Essa pesquisa é realizada através de uma

³ O critério de níveis para a dose sugerido nesta dissertação é 0,3 mSv/ano devido a liberação de efluentes, retirado da norma CNEN-NN-4.01 e 1 mSv/ano acima do background nos demais caso, que é preconizado pela IAEA (IAEA, 2011). Para trabalhador o nível de dose é 6 mSv/ano.

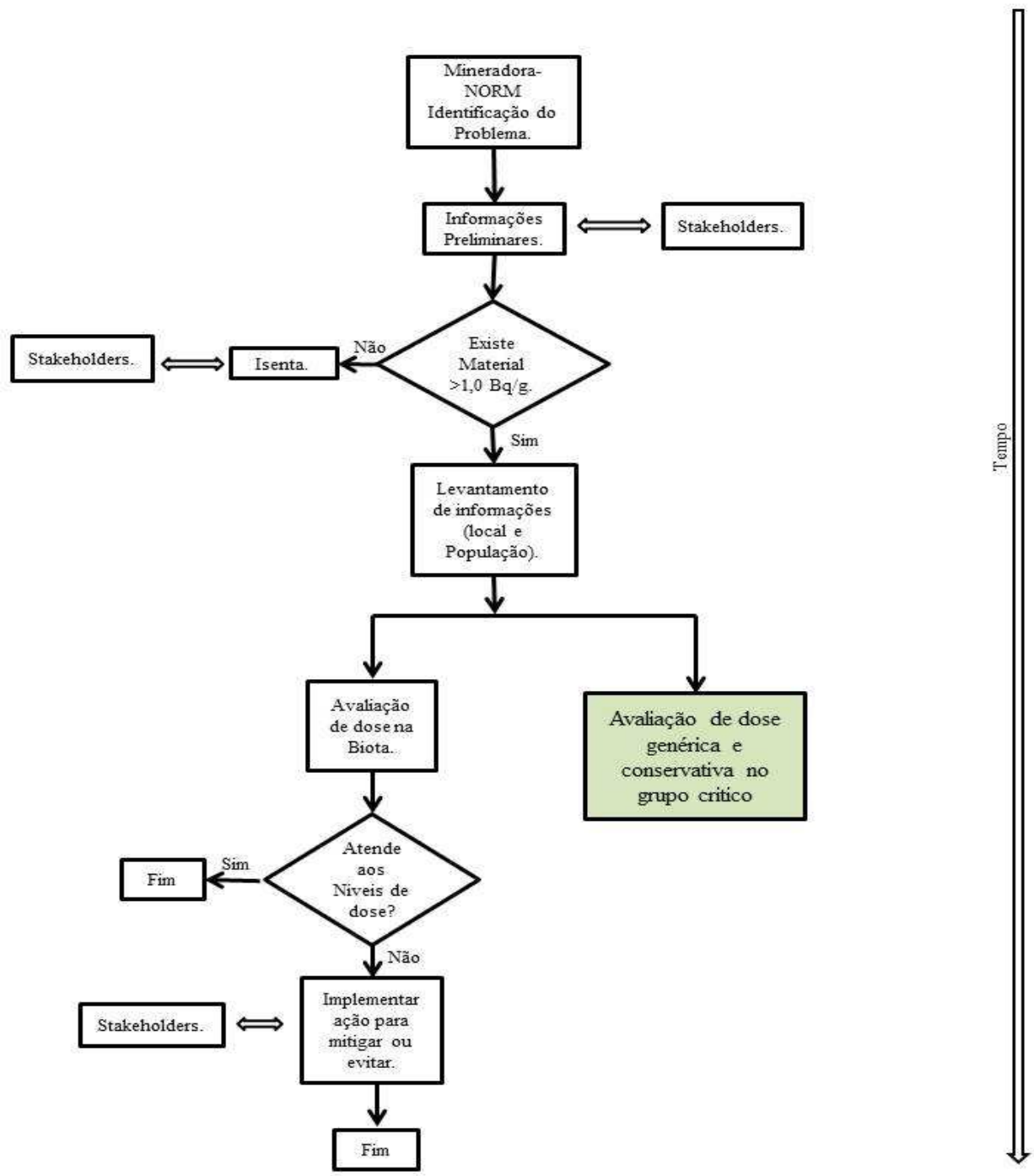
⁴ No caso da biota, as doses de referências sugeridas por esta dissertação são as preconizadas pela UNSCEAR e pela IAEA (40 µGy/h para animais terrestres e 400 µGy/h para plantas terrestres e biota aquática).

caracterização mais detalhada, do local e de sua população, e da análise de sensibilidade, para identificar os parâmetros de maior influência para a dose. Depois de estabelecidas as variáveis de maior impacto na dose, os dados relativos àquelas variáveis devem ser, se possível, determinados. Os dados dos levantamentos do local e os parâmetros específicos devem ser aplicados nos mesmos modelos para avaliar novamente. Se a dose estimada for inferior aos critérios de níveis de dose, então a instalação esta isenta de controle regulatório em função de NORM.

- É fundamental esgotar o procedimento de obtenção de informações sobre as variáveis críticas em um cenário de exposição mais realista. Verificar quais variáveis do modelo utilizado no código são mais importantes para a dose e determinar o seu peso no processo. E se a dose ainda permanecer acima dos níveis então deve-se passar para o próximo passo.
- Deve-se aperfeiçoar o processo de produção e beneficiamento da planta, como por exemplo, alterando um insumo, de uma etapa no processo ou a geometria do depósito de resíduos. A escolha da opção a ser adotada deve considerar diversos fatores como custo, tempo e também o interesse das partes interessadas (*stakeholders*), que são também um referencial nesse processo de decisão.
- Caso as alternativas não resultem, após as devidas simulações, numa dose de valor inferior aos critérios de níveis, então a decisão a ser tomada deve envolver as partes interessadas. Os tomadores de decisão devem avaliar a viabilidade do empreendimento em vista do atual e futuro paradigma da radioproteção, a tecnologia disponível e o custo social e econômico envolvido.

Deve-se ressaltar que, ressaltando os limites preconizados pela IAEA (BSS, 2011) e pela CNEN (Norma 4.01), os níveis de dose a serem adotados pelos responsáveis pelas instalações minero-industriais devem ser os que satisfaçam a uma avaliação relativa às necessidades presentes e futuras das partes interessadas.

A figura 5 apresenta um esquema simplificado que ilustra o funcionamento do modelo conceitual proposto.



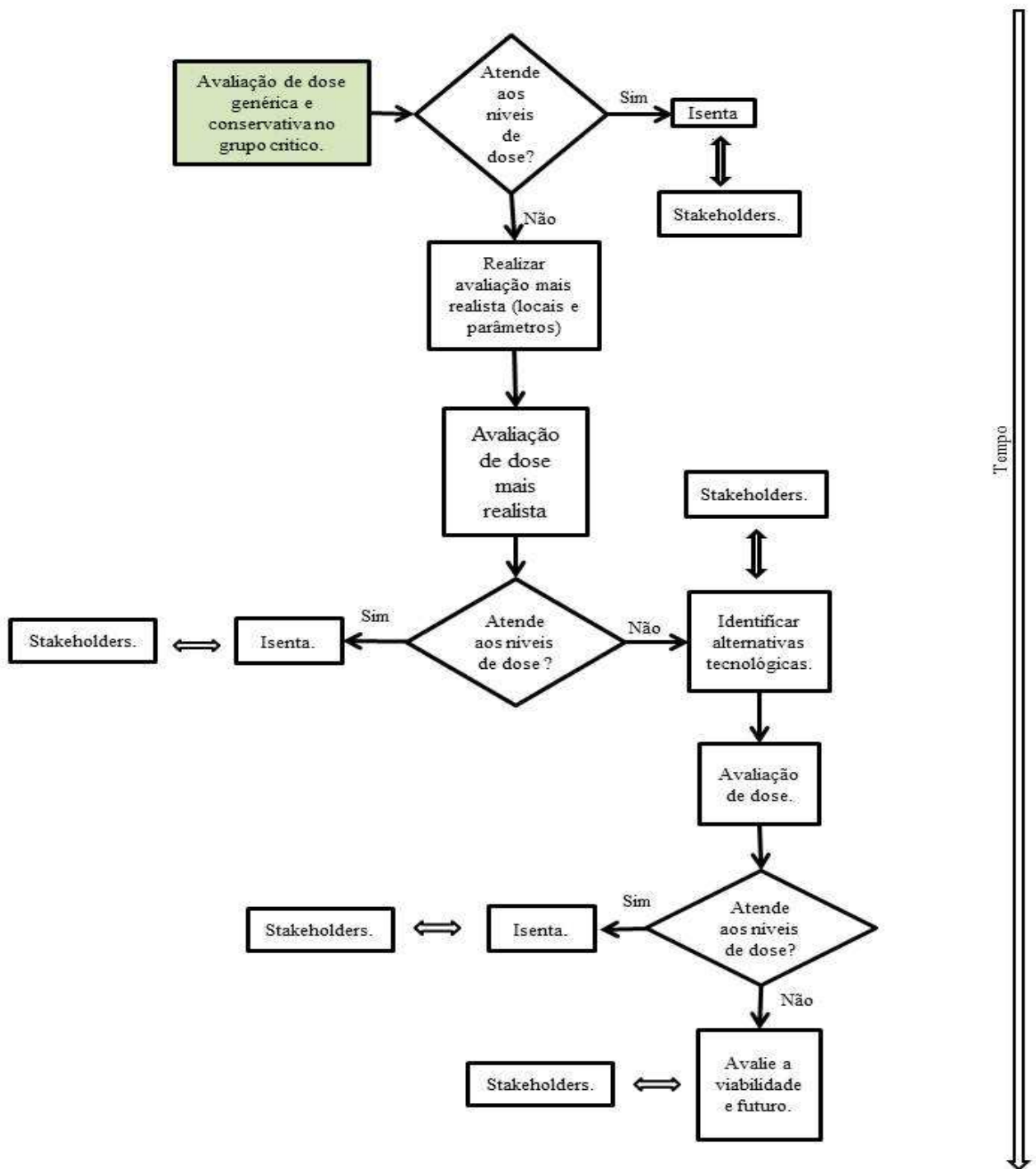


Figura 5 – Modelo Conceitual para as indústrias NORM

4 ESTUDO DE CASO – PROJETO SANTA QUITÉRIA

Neste capítulo é apresentado um estudo de caso aplicado para testar e realimentar o modelo conceitual estabelecido nesta dissertação. A instalação minero-industrial de Santa Quitéria foi escolhida, devido às altas concentrações de radionuclídeos no minério a ser processado em comparação com seus congêneres nacionais, o que possibilita o exercício dos critérios de radioproteção. Outro motivo importante para a escolha de Santa Quitéria é a sua grande importância como instalação nuclear, pois será a maior mina de urânio do país, e como instalação convencional, pois será responsável por cerca de 10% da produção nacional de ácido fosfórico.

O Projeto Santa Quitéria começou por volta de 1976, com a antiga Nuclebrás, que descobriu e cubou a jazida de urânio, fósforo e rochas ornamentais, em Santa Quitéria, no estado do Ceará. Durante anos o projeto de prospecção do urânio foi postergado, porque não era interessante do ponto de vista comercial e, assim, as atividades foram descontinuadas.

No entanto, as condições econômicas atualmente estão diferentes das daquela época, o projeto foi reiniciado e está em desenvolvimento (INB, 2010). A seguir, algumas considerações relacionadas ao projeto que atualmente tornam a instalação competitiva para ser implementada:

- O preço do urânio subiu de cotação nos últimos anos e, com o aumento nos preços dos combustíveis fósseis, a energia nuclear está mais atraente.
- O crescimento econômico do Brasil, necessitando de mais energia elétrica e mais fertilizante fosfatado.
- O custo de transporte, com o crescimento do consumo de fertilizante na área de influência do Projeto Santa Quitéria (região norte e nordeste), é mais competitivo produzir localmente do que buscar fertilizantes em outras áreas.
- A união de duas empresas, a estatal INB para produzir o concentrado de urânio e a empresa privada Galvani para produzir o fertilizante de fosfato, cada qual atuando em seu respectivo nicho comercial e sendo ambas financiadas pelo banco do Nordeste.

Assim, o Projeto Santa Quitéria se tornou viável economicamente e este capítulo da dissertação visa a fazer um estudo da situação futura do empreendimento, no que diz respeito à caracterização qualitativa e/ou quantitativa dos principais termos fontes e seus potenciais impactos radiológicos ambientais. Os impactos poderão resultar da operação dessa instalação minero industrial, que em princípio deverá começar a operar em 2014 (INB, 2011), poucos anos depois da defesa dessa dissertação – 2012.

4.1 Descrição da Área

A jazida de urânio e fosfato associado está localizada no município de Santa Quitéria, no centro norte do estado do Ceará, a aproximadamente 210 km da capital do estado, a cidade de Fortaleza. As coordenadas aproximadas da localização da área da instalação são: 4° 34' 27. 03" S, 39° 47' 19. 28" W



Figura 6 – Mapa do Estado do Ceará. Fonte: GuiaNet, 2012

A jazida está em uma fazenda de propriedade da INB, sendo esta jazida atualmente a maior reserva uranífera do Brasil. Geologicamente, o minério é uma associação de fósforo e urânio sob a forma de apatita uranífera (FUKUMA, 1999 apud NETTO, 1984) contendo 80 milhões de toneladas de minério, 8,9 milhões toneladas de fosfato e 62,9 mil toneladas de óxido

de urânio (FUKUMA, 1999 apud SCHIMMELPFENG & HOLANDA, 1986). A concentração de urânio no minério de Santa Quitéria é aproximadamente 10 vezes maior (1125 ppm) que os concentrados comerciais de rocha fosfática das demais jazidas nacionais de minério fosfático (FUKUMA, 1999), (SAAD, 1995).

Na área de influencia da instalação do Projeto Santa Quitéria, o clima é típico do semiárido, com período chuvoso, compreendido entre os meses de fevereiro e abril, e outro seco, entre julho a dezembro. Temperaturas elevadas com media anual de 27 °C, mínima de 21,5°C e máxima de 33 °C. A vegetação de caatinga é característica desse clima. Os riachos da área são intermitentes e fazem parte da bacia do rio Groaíras e existe a barragem Quixaba, que não seca (23000000 m³). O lençol freático tem profundidade media de 30 metros e a condutividade hidráulica varia muito, pois o aquífero é fraturado e a rocha matriz é impermeável. A população é rarefeita e rural, (CONDESSA, 1982), (CENACHI, 1988), (FIEC, 2001), (SILVA, 2004).

4.2 - Processo

O processo para produzir o ácido fosfórico no Projeto Santa Quitéria é a rota da via úmida, que é o processo mais utilizado no mundo. Ao concentrado fosfático é adicionado ácido sulfúrico, para produzir ácido fosfórico na forma de um dihidrato, pois essa tecnologia evita as dificuldades de filtração quando produzido pelo processo anidrido e hemidrato. (FUKUMA, 1999 apud BECKER, 1983). As principais etapas deste processo são:

- Desmonte
- Deslamagem
- Flotação
- Produção do Acido Fosfórico
- Separação do Uranio
- Extração do Tório

A Figura 7 apresenta o fluxograma proposto pelo INB para o processo do Projeto Santa Quitéria.

PROJETO SANTA QUITÉRIA

Fluxograma simplificado

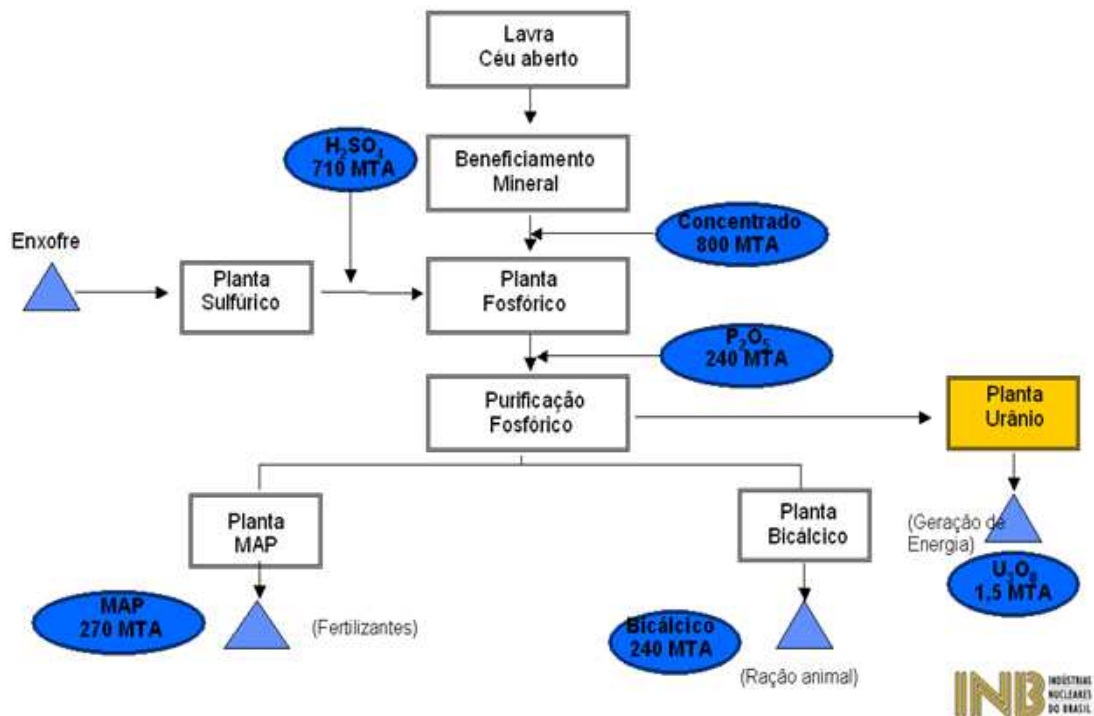


Figura 7 – Fluxograma Proposto Inicialmente pela INB. Fonte: CNEN, 2012.

4.2.1 – Principais Etapas do Processo e Caracterização Radiológica

Neste item da dissertação são descritas as principais etapas para a produção do ácido fosfórico usando a via úmida, descrita no projeto desenvolvido INB (INB, 2011). A abertura do minério de fosfato será realizada usando ácido sulfúrico, pois esse é o processo mais utilizado no mundo e no Brasil, o que motivou sua escolha. Além disto, é apresentada nesta dissertação a identificação dos possíveis termos fontes com sucinta caracterização radiológica, qualitativa e eventualmente quantitativa.

4.2.1.1 - Desmonte (Lavra a céu aberto)

O desmonte da jazida de fosfato e urânio será em lavra a céu aberto, em bancadas. Ou seja, a mina será uma cava aberta, com bermas e taludes, portanto não será uma mina subterrânea, com túneis e galerias.

Esta cava será um possível termo fonte, pois a atividade de caminhões e tratores transitando e executando tarefas, levanta material particulado que, devido a grande concentração de radionuclídeos das séries naturais, podem fazer parte da composição dessas poeiras, partículas e aerossóis, que podem depositar nas pessoas e equipamentos e/ou serem inalados ou, ingeridos pelos trabalhadores ou pela população do entorno ou de alguma forma, interagir com o ambiente. A cava, também poderá ser um termo fonte, à medida que é aberta e alargada expõe o minério rico em radionuclídeos, que podem vir a ser mobilizados pelo vento ou pela chuva. Sendo, portanto, a cava da mina uma possível fonte de radioatividade do empreendimento em Santa Quitéria. Na frente de lavra, o teor de corte deverá ser de 3% em fosfato, o material com teor menor ou igual a 3% deverá ser depositado em pilha de esteril (bota-fora).

O Projeto Santa Quitéria, segundo (SAAD, 1995), produzirá em média 1.700.000 metros cúbicos de minério, que deverão ser retirados da cava para produzir o P_2O_5 . Estabelecendo uma recuperação de lavra em torno de 90%, então a jazida deverá produzir em torno de 1.500.000 toneladas/ano de minério de fosfato para a planta de beneficiamento e em torno de 220.000 toneladas/ano de material não aproveitado (pilha de esteril). A pilha de esteril se torna um segundo termo fonte, pois as águas da chuva e o vento podem interagir com esse depósito, mobilizando e transportando para o meio ambiente os radionuclídeos que ali se encontram.

4.2.1.2 - Deslamagem

Em seguida, o minério fosfatado deverá ser submetido ao beneficiamento físico, onde poderá passar por três etapas de britagem, uma pré-concentração do minério intermediário e uma moagem antes do fosfato ser concentrado por flotação direta para remoção da ganga silicatada e depois por flotação reversa visando à remoção da ganga carbonatada. Como ilustrado na Figura 8.

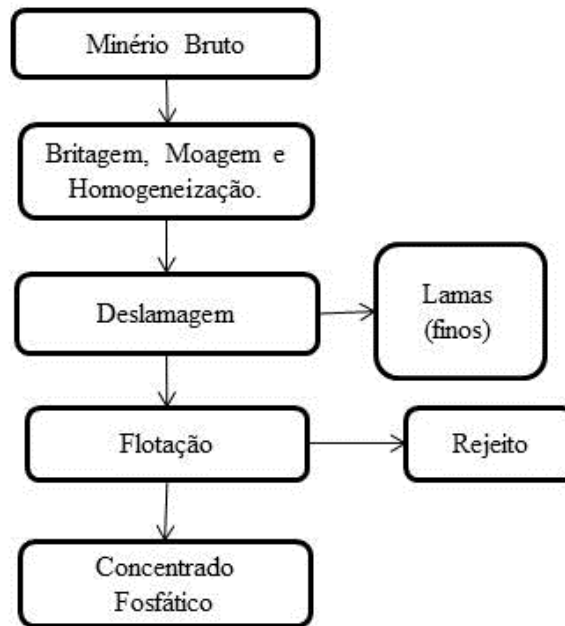


Figura 8 – Fluxograma Simplificado das Operações Unitárias para Concentração do Minerio

Na deslamagem, pode ser utilizado o hidrociclone como equipamento para realizar essa operação unitária, que funciona através da força centrífuga devido à alimentação tangencial, que assim forma um movimento em espiral, arrastando as partículas menores para o centro e as maiores para as paredes, onde descem e saem por baixo (*underflow*), e as partículas menores, que estão tendendo ao centro, sobem e saem por cima da espiral (*overflow*), como ilustrado na Figura 9.

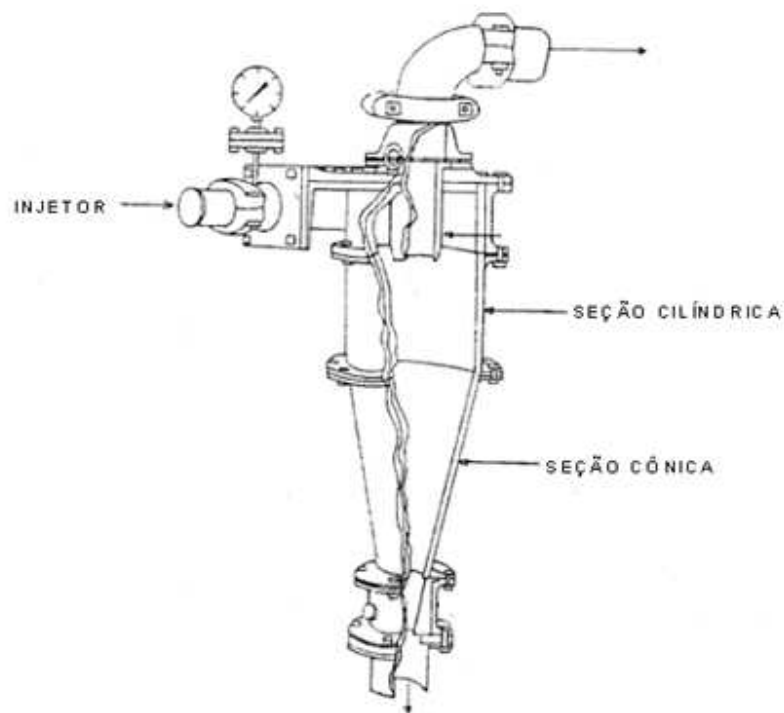


Figura 9 – Ciclone. Fonte: Peres et al, 2002.

Em Santa Quitéria, os finos são retirados, pois podem prejudicar a flotação. Esses finos têm baixa probabilidade de colisão e adesão entre partículas e bolhas: i) por serem menores que as demais partículas sólidas na mistura sólido-líquido, ii) pela dificuldade para superar a barreira energética entre elas, porque essas partículas têm alta energia superficial; iii) pela facilidade do seu arraste mecânico, porque os finos têm pequena massa, iv) pela elevada adsorção de reagentes, pois a superfície específica é comparativamente elevada em relação às partículas maiores e v) pela baixa seletividade na adsorção de reagentes. Todos esses fatores contribuem para uma diminuição na cinética de flotação, uma menor recuperação e maior consumo de reagentes (CAPPONI et al, 2005).

Para estimar a quantidade de urânio que é descartada nesta etapa do processo de produção do ácido fosfórico e do óxido de urânio, foi adotado após pesquisa bibliográfica o valor percentual de 14% do U_3O_8 do minério original que é descartado junto aos finos (FURTADO, 1985).

Nesta etapa do processo, a quantidade de U_3O_8 por kg do minério é de aproximadamente 1125 mg (SAAD, 1995). Se 14% do U_3O_8 do minério é descartado junto aos finos, aproximadamente 158 mg de U_3O_8 estão sendo descartados nos finos após tratamento de 1 kg de minério. De acordo com Furtado (1985), 16 % em massa do minério processado são descartados como finos. Considerando ambas as informações, teríamos 160 g de finos por kilograma de minério, contendo 157,5 mg de U_3O_8 , correspondendo a uma concentração de 0,98 mg, ou seja, aproximadamente 1 mg de U_3O_8 por grama de finos.

A relação mássica $U_3O_8/^{238}U$ é de 1,18, assim em 1,0 mg de U_3O_8 tem-se 0,85 mg de ^{238}U . Considerando a atividade específica de ^{238}U , 1 g de urânio 238 corresponde a aproximadamente 12000 Bq, sem considerar os filhos, então, tem-se 10,2 Bq de urânio 238 por grama de finos. E essa seria, caso esta estimativa seja representativa da realidade, a concentração na barragem de finos.

Com 10,2 Bq/ g de ^{238}U a barragem de finos seria classificada na Categoria II pela norma CNEN NN 4.01.

Esse depósito, a barragem de finos, é um possível termo fonte da instalação de Santa Quitéria, visto que a água da chuva, ao percolar esse material, pode mobilizar os radionuclídeos presentes e transportar para o lençol freático, e o arraste superficial, caso ocorra, pode transportar NORM para os lagos, açudes e riachos, podendo contaminar a água, o solo e os alimentos da região. Assim como o vento que, ao transportar particulados, gases e poeira oriundos desse material retido na barragem de finos, pode transportar radionuclídeos para a circunvizinhança, gerando uma possível contaminação do meio ambiente e a conseguinte exposição do público.

4.2.1.3 Flotação

A flotação é uma operação de beneficiamento físico de minério, que consiste na separação de misturas, do tipo sólido-líquido, onde o sólido é tornado imiscível com a água através da adição de substâncias apropriadas e, então, devido às diferenças nas propriedades superficiais das partículas, o material sólido se agrega às bolhas de ar e sobe, onde forma uma espuma que é recolhida (Furtado, 1985). Na flotação reversa, o material de interesse é o que fica no fundo do equipamento. A Figura 10 ilustra o equipamento de flotação.

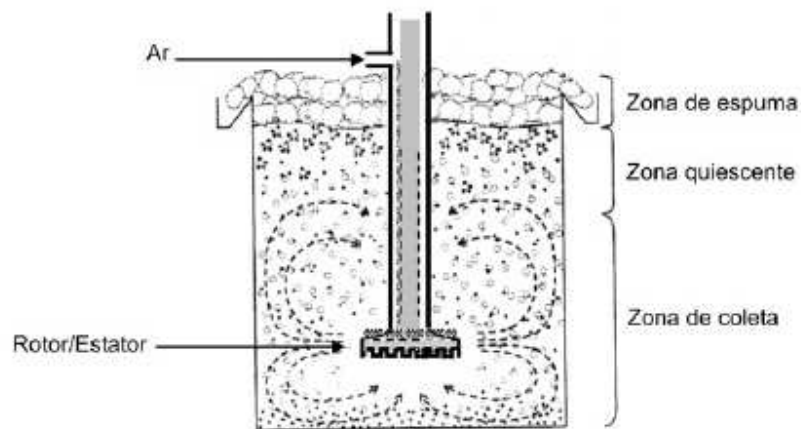


Figura 10 – Flotação. Fonte: Lima et al, 2006.

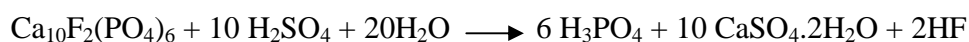
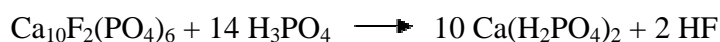
Nesta etapa do processo é produzido o rejeito, que no caso da instalação minero-industrial de Santa Quitéria, (CONDESSA, 1982), corresponde a 57,7% em massa do minério bruto. Este rejeito da flotação e mais as lamas em conjunto correspondem a 72,7% em massa do minério extraído da cava e processado na cominuição. O rejeito da flotação é constituído de uma canga sílico-carbonatada, separada consecutivamente por flotação direta e posteriormente por flotação reversa. Esse rejeito deve ser depositado em uma barragem especialmente designada para segregá-lo.

Estima-se a concentração de urânio na barragem, caso ambos os rejeitos (silicatos e calcita) sejam depositados juntos, em aproximadamente 297 ppm de U^3O^8 (REIS JUNIOR et al, 1987). Nessa barragem, as intempéries podem mobilizar os radionuclídeos presentes nesse material, a chuva deve percolar e lavar as camadas de rejeito e eventualmente essa água pode carrear consigo radionuclídeos para o lençol freático ou para os corpos de água superficial. O vento pode suspender particulado, radônio e poeiras provenientes dessa barragem de rejeitos e, eventualmente, levar radionuclídeos para áreas próximas e, assim, poluir o meio ambiente. Dessa forma, a barragem de rejeitos, resultado da operação física de flotação, é um possível termo fonte da instalação minero-industrial de Santa Quitéria.

4.2.1.4 Produção do Ácido Fosfórico

Após a etapa de concentração física, ocorre o ataque de ácido sulfúrico ao concentrado fosfático-uranífero. Devido a esse processo químico há a formação da lixívia (ácido fosfórico contendo urânio) e do fosfogesso. Sendo que este último, após ser filtrado, é encaminhado para deposição em pilhas.

Equação global para produção de ácido fosforico pelo processo dihidrato, (FUKUMA apud HURST & ARNOLD, 1999):



Segundo FUKUMA, 1999, cada tonelada de ácido fosfórico produzida em Santa Quitéria gera aproximadamente 4,2 toneladas de fosfogesso. Caso as características da rocha fosfatica da jazida do Projeto Santa Quitéria se mantenham com os mesmos teores médios durante toda a sua vida útil e considerando que a jazida tem 8,9 milhões de toneladas de P_2O_5 , então deverá ser produzida uma quantidade de 37 milhões de toneladas de fosfogesso. Com uma atividade em concentração de radio 226 de aproximadamente 13 Bq/g no fosfogesso, (FUKUMA, 1999) e 11 Bq/g de chumbo 210.

O fosfogesso será depositado em uma pilha e, caso as concentrações de rádio e chumbo se confirmarem quando a planta de Santa Quiteria estiver produzindo uranio e acido fosforico, a pilha de fosfogesso poderá enquadrar a instalação minero-industrial de Santa Quitéria na Categoria II, segundo a norma CNEN NN 4.01.

Essa pilha de fosfogesso terá o seu impacto radiológico ambiental avaliado através de modelagem e simulação em códigos computacionais apropriados. Isto porque a pilha de fosfogesso, normalmente, é o termo fonte mais importante em uma planta de produção de ácido fosfórico.

Assim, cenários de exposição para o grupo crítico e trabalhador serão aplicados para esse termo fonte com a finalidade de avaliar os possíveis impactos ambientais e sinalizar as características mais relevantes sob o ponto de vista da radioproteção para a pilha de fosfogesso da planta de Santa Quitéria.

Outro aspecto interessante sobre a pilha de fosfogesso é que esse resíduo muitas vezes encontra utilização como material de construção ou como insumo na agricultura (gesso agrícola) (BORGES, 2011) (CANUT, 2006). Entretanto, a publicação da Resolução CNEN n° 113, de 24 de agosto de 2011, dispõe sobre o nível de isenção para o uso do fosfogesso na agricultura e na indústria cimenteira, esta resolução estabeleceu o valor médio de 1.0 Bq/g para o rádio-226 ou o rádio 228. Então, como no fosfogesso de Santa Quitéria a concentração de atividade desses isotopos deverá ser maior do que o nível de isenção, o resíduo pode vir a ser legalmente impedido de ter seu uso tradicional e se tornar uma pilha de rejeito.

4.2.1.5 Separação do Urânio

A lixívia é então submetida ao processo hidrometalúrgico, que consiste na extração por solventes em que uma fase aquosa contendo as espécies de interesse a serem purificadas é misturada com uma fase orgânica, imiscível na fase aquosa e que possui um reagente para extrair as espécies de interesse seletivamente, (FUKUMA, 2004). Assim, ocorre a separação do urânio do ácido fosfórico através da extração por solventes, cujas etapas são: oxidação do ácido fosfórico, extração do urânio, remoção de ferro, lavagem de extrato orgânico, reextração de urânio e regeneração do solvente orgânico. (FUKUMA, 1999). Essas etapas apresentaram rendimento de extração do urânio contido no ácido fosfórico de aproximadamente 99% (FUKUMA *apud* DUARTE & SANTOS, 1999).

É possível que nos equipamentos, dutos e locais onde o urânio será concentrado a dose nos trabalhadores exceda o nível recomendado, logo o acompanhamento dosimétrico dos trabalhadores nessas áreas pode vir a evitar detrimento devido à radioatividade nos mesmos.

4.2.1.6 Extração do Tório

O ácido fosfórico oriundo de Santa Quitéria possui aproximadamente 40 vezes mais tório (sendo que mais de 95% de ^{230}Th) que os demais congêneres nacionais, (FUKUMA, 1999) dessa forma, é recomendável que um processo de purificação seja executado. Assim, caso exista uma decisão nesse sentido, o tório extraído pode vir a ser um resíduo do processo. (FUKUMA, 2004) (RIBEIRO *et al*, 2008). Esse resíduo, eventualmente, será depositado e segregado de algum modo na área da instalação e, dependendo da maneira que for armazenado ou reciclado, esse material poderá ser uma fonte de contaminação para o público e o meio ambiente. Dessa forma, é interessante que desde já se planeje a solução para esse resíduo, com vista à escolha da melhor opção de deposição e segregação ou reciclagem do material.

Caso o tório não seja retirado e permaneça nos produtos da planta minero-industrial de Santa Quitéria, no caso o fertilizante e/ou a ração animal, então deve ser realizado um estudo visando a assegurar que esta decisão não terá efeitos danosos sobre a população e o meio ambiente, tendo em vista o atual paradigma de radioproteção e a evolução dos limites de dose para o futuro.

4.3 Stakeholders e Santa Quitéria

Sob o prisma da radioproteção, os *stakeholders* em relação ao Projeto Santa Quitéria seriam: a população potencialmente afetada, a CNEN, a SEMACE, o IBAMA, as Indústrias Galvani, a INB e outros.

- A população potencialmente interessada e/ou afetada em relação ao projeto, sob o prisma da radioproteção, é a que acha e/ou pode vir a sofrer algum tipo de detrimento em função da atividade radioativa proveniente da instalação minero-industrial de Santa Quitéria.
- A CNEN verifica se o projeto da instalação atende aos requisitos de radioproteção e segurança e que a planta de Santa Quitéria, ao operar, não irá comprometer o meio ambiente, os trabalhadores e o público.

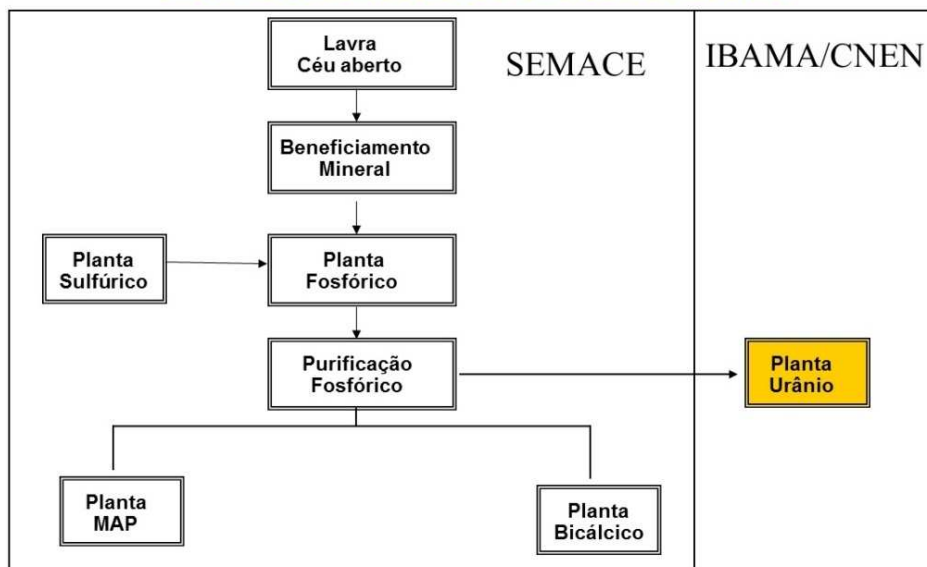
- A SEMACE, a Superintendência Estadual do Meio Ambiente, tem a responsabilidade de executar a política ambiental do Estado do Ceará e cuja missão é “defender o Meio Ambiente, assegurando a melhoria da qualidade de vida das gerações presentes e futuras”. A SEMACE atua no licenciamento, monitoração e fiscalização ambiental. No Projeto Santa Quitéria irá atuar avaliando a conformidade das ações dos operadores em relação às suas normas.
- O IBAMA, O Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, atua exercendo o poder de polícia ambiental; executando ações das políticas nacionais de meio ambiente referentes às atribuições federais, relativas ao licenciamento ambiental, ao controle da qualidade ambiental, à autorização de uso dos recursos naturais e à fiscalização, monitoramento e controle ambiental; e executando as ações supletivas de competência da União de conformidade com a legislação ambiental vigente. Em Santa Quitéria, irá atuar avaliando a conformidade das ações dos operadores em relação às suas normas.
- Indústrias Galvani é uma empresa privada, cujo objetivo é produzir produtos fosfatados.
- INB, Indústrias Nucleares do Brasil, é uma empresa estatal, cujo objetivo é produzir óxido de urânio.
- Outros: a prefeitura de Santa Quitéria, ONGs, Academia e a Mídia.

Eventualmente ainda podem vir a ser *stakeholders* os agricultores que fizerem uso dos produtos fosfatados produzidos em Santa Quitéria, especialmente se esses produtos contiverem uma concentração de tório muito maior que os seus congêneres, devido a não remoção do tório por parte da indústria durante o processo de produção. Esse possível impacto ambiental, caso ocorra, poderá, no futuro, vir a causar algum tipo de estigma sobre os agricultores que fizerem uso dos produtos fosfatados produzidos no complexo industrial de Santa Quitéria.

O Licenciamento é uma etapa muito importante em um projeto minero-industrial, e o modelo de licenciamento inicialmente proposto pelo operador para o Projeto de Santa Quitéria previa que toda parte convencional seria licenciada junto a SEMACE e somente as instalações nucleares seriam objeto de licenciamento do IBAMA e da CNEN, conforme a Figura 11.

PROJETO SANTA QUITÉRIA

Licenciamento Ambiental



INB
INDÚSTRIAS
NUCLEARES
DO BRASIL

Figura 11 – Divisão do Licenciamento entre Convencional e Nuclear. Fonte: CNEN, 2012

No entanto, esse modelo de licenciamento não prosperou, foi objeto de contestação por parte do ministério público que, em conjunto com o IBAMA, questionaram no judiciário esse formato e obtiveram sucesso em sua ação. O licenciamento do Projeto Santa Quitéria junto ao SEMACE se tornou nulo e o IBAMA é de fato e de direito o órgão competente para proceder ao licenciamento (MPF, 2011)

Portanto, no caso específico de Santa Quitéria, o IBAMA não foi devidamente contemplado no modelo utilizado pelas empresas responsáveis pelo empreendimento, o que se refletiu em atrasos no cronograma de implantação e em custos pelo atraso nas obras para começar a produzir. Adicionalmente, o fato produziu um descrédito em relação à capacidade das empresas em responder satisfatoriamente os desafios de segurança do projeto. Algo que poderia ter sido evitado caso uma análise mais aprofundada sobre os *stakeholders* durante o planejamento da instalação tivesse sido realizada, o que teria resultado numa diminuição no grau de incerteza de todo o processo.

Assim, a empresa não identificou corretamente os interesses dos seus *stakeholders*. Portanto, a INB e as Indústrias Galvani, foram obrigadas a reformular o modelo de

licenciamento, atrasando o processo, o que com certeza deve ter acarretado prejuízo. Além disto, foi enviada uma mensagem de insegurança para a população afetada pelo empreendimento, pois se o primeiro modelo estava “incorreto”, então, a imagem de competência dos empreendedores perante a população sobre o tema da segurança ambiental fica um pouco comprometida.

Como conclusão, a importância de verificar quais os interesses e as necessidades dos *stakeholders* no licenciamento do projeto, para planejar adequadamente o modelo a ser seguido, evitando assim os prejuízos decorrentes em não atender essas demandas, é evidenciada.

4.4 Avaliação do Impacto Radiológico Ambiental da Pilha de Fosfogesso

Em virtude da pilha de fosfogesso não existir, assim como a instalação industrial que lhe dará origem, o objetivo deste exercício é desenhar um cenário conservativo do que normalmente é considerado o principal termo fonte em uma instalação minero-industrial de produção de ácido fosfórico. Deve-se considerar que no caso do Projeto Santa Quitéria, a atividade do rádio 226 no fosfogesso pode chegar a ser 130 vezes maior que os congêneres gerados no Brasil, (FUKUMA, 1999), (BORGES, 2011).

Para esta simulação, sempre que disponíveis, as informações preliminares sobre os usos da terra, hábitos populacionais e parâmetros locais foram introduzidos no modelo.

4.4.1 Avaliação da Dose no Grupo Crítico Situado no Lado Externo dos Limites do Sítio de Santa Quitéria.

Para simular o impacto radiológico causado pela pilha de fosfogesso no público foi utilizado o RESRAD OFFSITE e um cenário hipotético e conservativo de exposição.

Neste estudo foi considerado um cenário de exposição bastante conservativo: População morando na cerca da instalação, predominantemente rural, consumindo água subterrânea (poço), vegetais e produtos de origem animal produzidos localmente. Foi considerado, de uma maneira bastante conservativa, que todo o fluxo de água subterrânea se direcionava da pilha para o grupo crítico, assim como o grupo crítico se localizava na direção preferencial dos ventos. Todas as vias

de exposição do código RESRAD foram consideradas (exposição externa, ingestão e inalação de poeira e de radônio).

Vias de Exposição: Exposição externa devido à radiação Gama, inalação de radônio e de poeira, ingestão de vegetais, carne, leite, água, solo; alimentos aquáticos.

Os parâmetros de entrada locais, quando disponíveis, e parâmetros relacionados à fonte específica (fosfogesso) foram utilizados e apresentados na tabela 1. Para os parâmetros locais não disponíveis ou foram levantados parâmetros correspondente à meios similares (solos) ou foram utilizados aqueles presentes no banco de dados do RESRAD (“default”).

Assim, como os parâmetros físicos e químicos variam por uma ampla faixa de valores, os valores “defaults” do RESRAD foram substituídos sempre que a literatura apresentava valores muito diferentes para condições brasileiras. Deste modo, os valores das condutividades hidráulicas foram substituídos considerando os valores reportados na literatura para solos brasileiros.

Tabela 1 – Parâmetros da Modelagem Usando RESRAD

Parâmetro	Valores	Referência
Condutividade Hidraulica em Solo Saturado	24,2 cm/hora = 2120 m/ano	Ferreira, M.M. et al. (1999)
Condutividade Hidraulica em Solo Não Saturado	3,97 mm/dia = 1,45 m/ano	Klein et al.(2002)
Condutividade Hidraulica na Pilha de Fosfogesso	220 cm/dia = 803 m/ano	Van Alphen et al. (1971)
Comprimento da Zona Insaturada	15 metros	Estimada
Evaporação	2000 mm/ano	Cenachi, N. C.(1988)
Precipitação Media	550 mm/ano	Cenachi, N. C.(1988)
Concentrações de radionuclídeos na pilha	Pb-210=11,0 Bq/g; Ra-226 = 13Bq/g; Ra – 228 =	Fukuma, H. T., (1999).

	Th-228 = 0,41Bq/g	
Pilha de Fosfogesso	37 milhões de toneladas	Fukuma, H.T. , (1999).
Geometria da Pilha de fosfogesso	3400 metros por 500 metros por 50 metros	Estimado, Kleinschmidt, D., (1992) e em Kedainiai.
Espessura da zona saturada	30 metros	Estimado
Velocidade do vento Sentido nordeste-sudoeste	2,46 m/s, 1-5 m/s	Estimado, Amarante, 2001.
Porosidade do fosfogesso	0,7	Duenas et al. (2007)
Densidade do fosfogesso	1,05	Van Alphen et al. (1971)
Temperatura	23 C	Estimada

A geometria da pilha de fosfogesso foi inferida usando como parâmetro a massa total ao fim da exploração da jazida de Santa Quitéria, 37 000 000 de toneladas (FUKUMA, 1999). E, para determinar o volume da pilha, foi feita uma analogia com a pilha de fosfogesso de Kedainiai, que ocupa uma área de 84 hectares e tem uma altura de 60 metros, com 22 000 000 toneladas de fosfogesso. Assim, estima-se que a pilha de fosfogesso de Santa Quitéria terá 85 000 000 metros cúbicos, com 50 metros de altura e 1 700 000 metros quadrados.

A Figura 12 representa o modelo esquemático usado no RESRAD OFFSITE com a localização da pilha de fosfogesso e do grupo crítico na planta de Santa Quitéria.

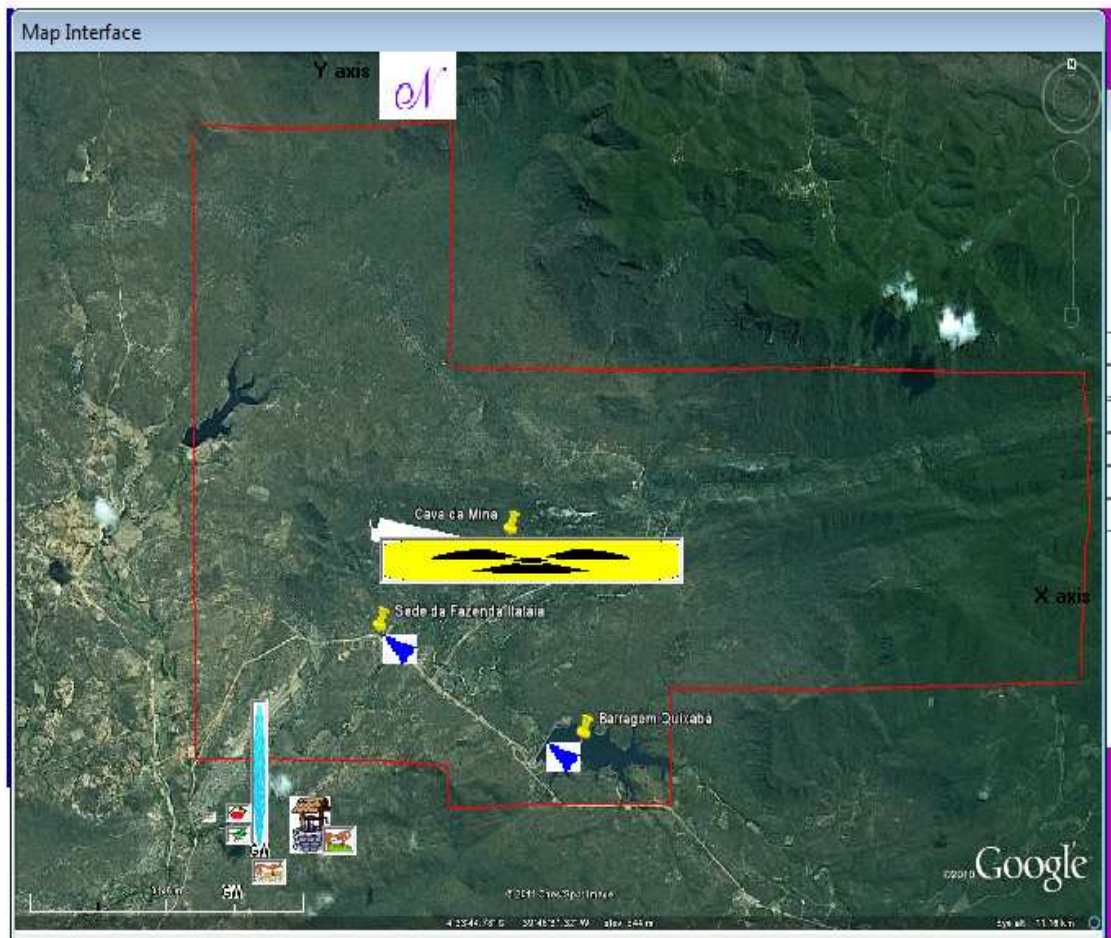


Figura 12 – Localização relativa da pilha de fosfogesso e do grupo crítico no sitio de Santa Quitéria

A simulação do código RESRAD OFFSITE, considerando as condições acima descritas resultou numa dose potencial no grupo crítico para este termo fonte em torno de 2,5 mSv/ano. O radionuclídeo que mais contribui para a dose é o ^{226}Ra , Figura 13, e a via de exposição principal é o consumo de peixe, Figura 14, seguido pela inalação do radônio.

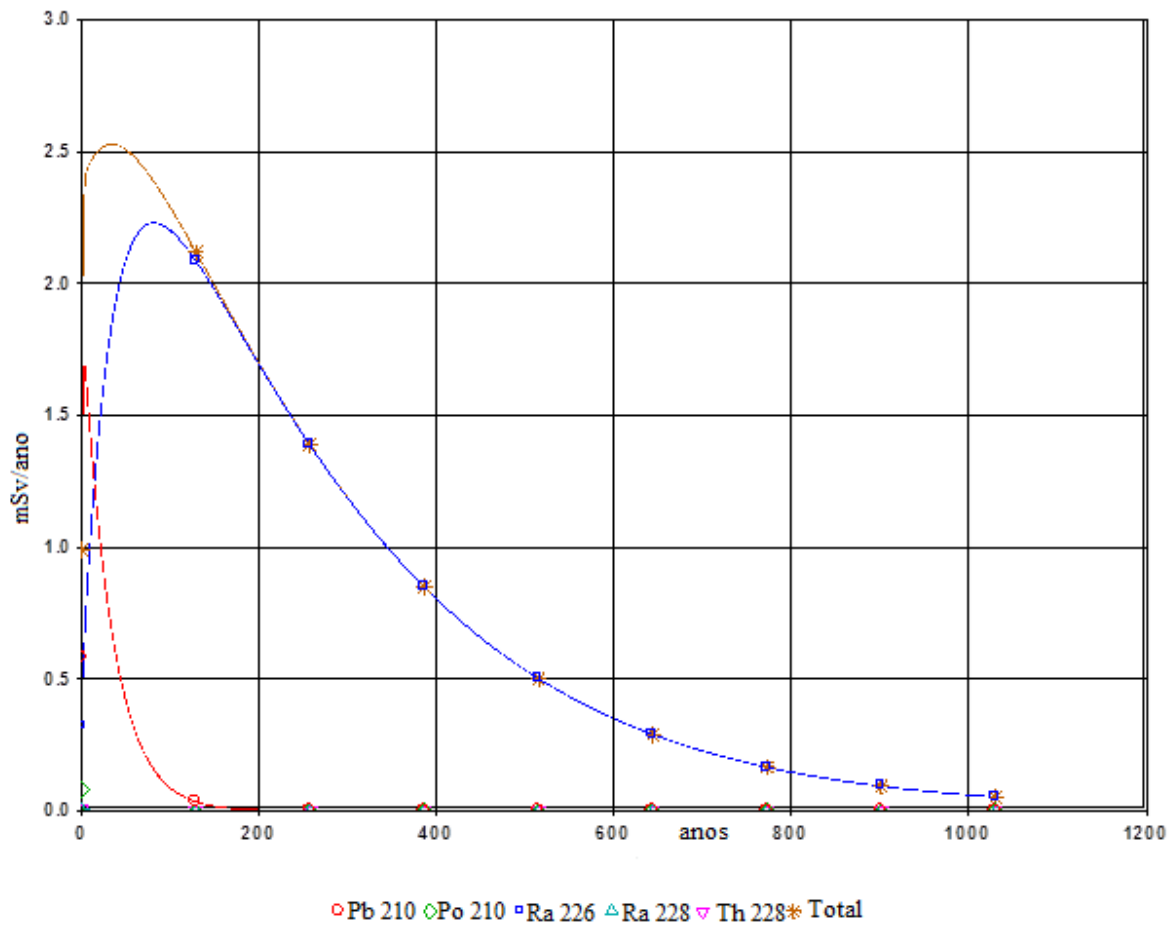


Figura 13 – Gráfico da Contribuição dos radionuclídeos para a dose no grupo crítico.

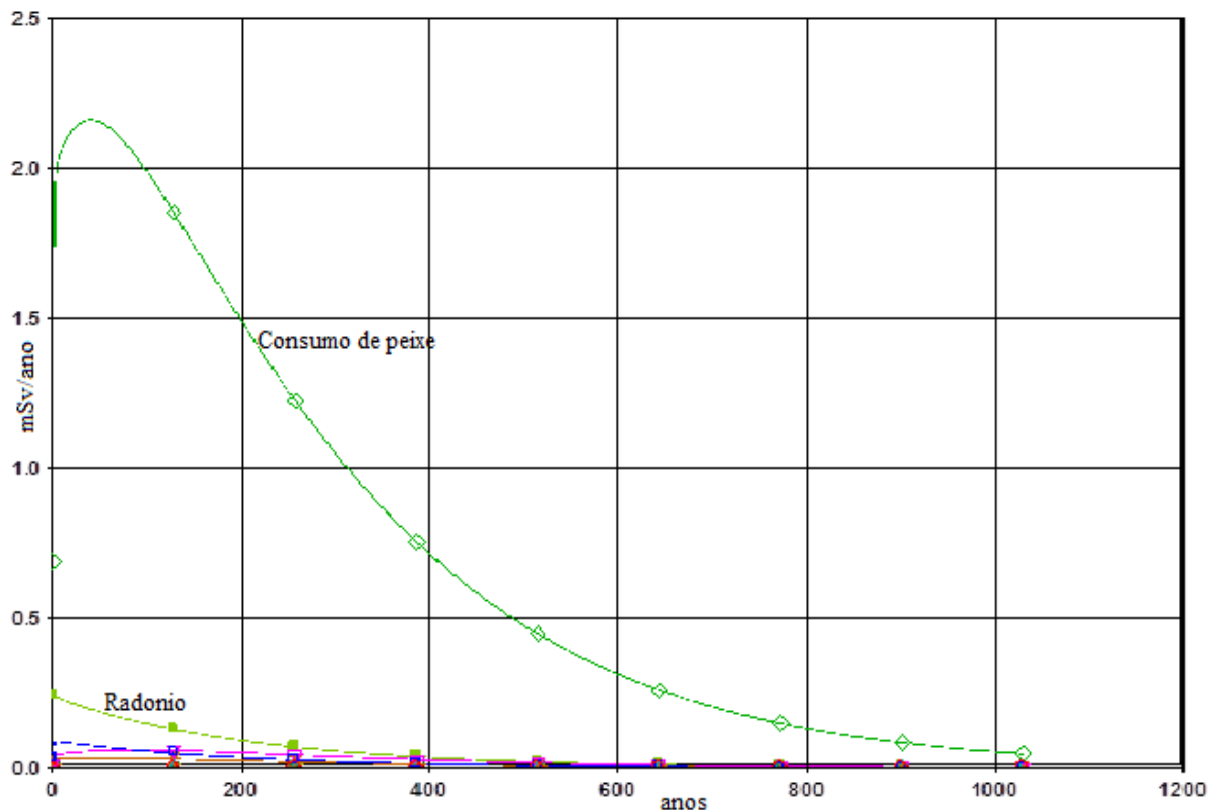


Figura 14 - Gráfico da Contribuição das principais vias de exposição para a dose no grupo crítico.

Assim, considerando a contribuição de somente um termo fonte, a dose no grupo crítico ultrapassaria o limite da dose permitida para o público, que é 1,0 mSv/ano, segundo a norma CNEN NN-3.01, Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.

É interessante ressaltar que embora tenha sido considerado o vento no sentido da fonte diretamente para o grupo crítico, direção norte – sul, apesar do sentido preferencial dos ventos naquela região, segundo a bibliografia ser do nordeste para o sudoeste, (CONDESSA, 1982), esta via de exposição não foi apontada pela simulação como muito importante.

A contaminação da água de superfície foi assim apontada como o meio responsável pela contaminação dos peixes e, portanto, da principal via de exposição à radiação do grupo crítico.

Após este exercício de simulação e utilizando uma ferramenta presente no RESRAD para análise de sensibilidade, foi feita uma avaliação crítica da importância dos principais parâmetros de transporte para a avaliação da dose no grupo crítico. Como resultado, a análise de

sensibilidade mostrou que a espessura, a densidade e a porosidade da camada insaturada não influenciaram na dose no cenário estudado. Este resultado é consistente com o comportamento da variável condutividade hidráulica nessa mesma camada, pois a análise de sensibilidade mostra que uma variação de cinco vezes no valor da condutividade da camada insaturada, não implica em nenhuma alteração na concentração de radionuclídeos na água de poço ou na água de superfície, e conseqüentemente, na dose, como mostra a Figura 15.

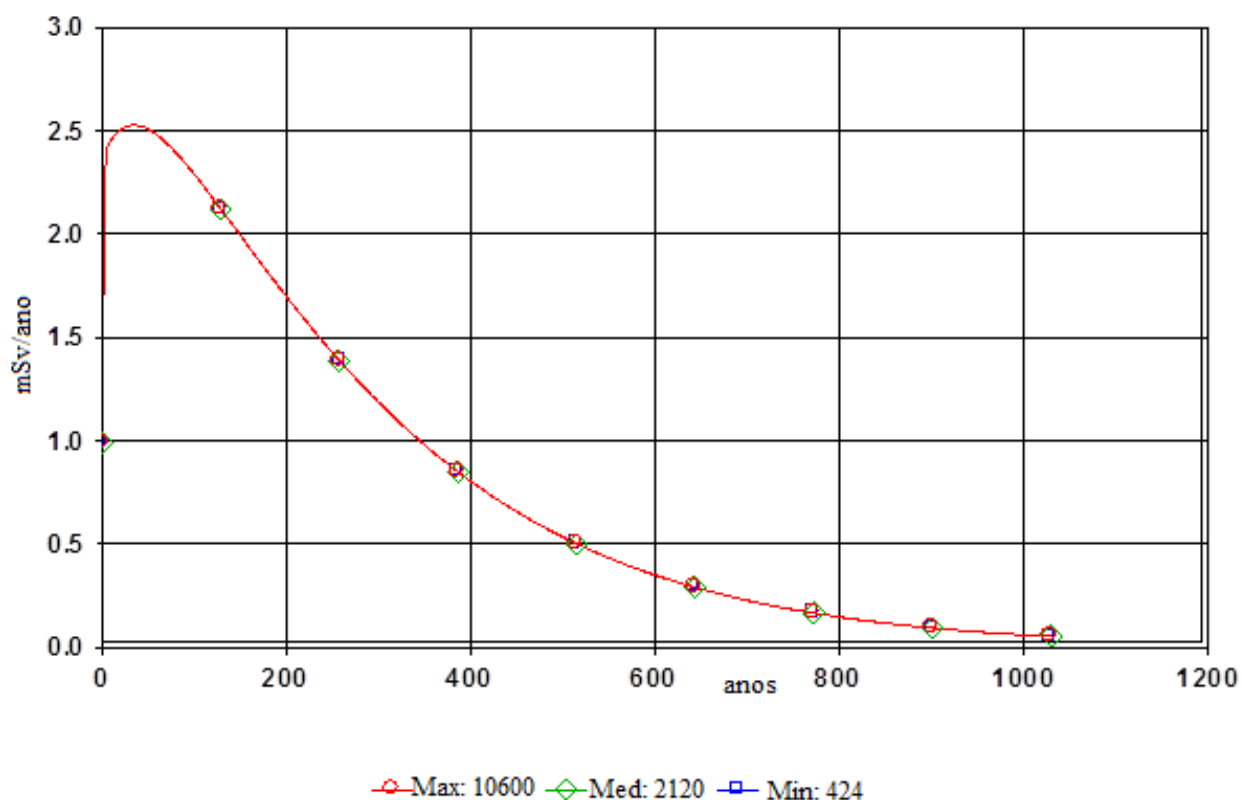


Figura 15 – Gráfico da Análise de Sensibilidade do Parâmetro Condutividade Hidráulica (variação de valor de 5 vezes).

O parâmetro de maior influência para o valor da dose foi o índice de erosão devido à chuva, aquele relacionado ao escoamento e carreamento superficial. Assim, a contaminação das águas de superfície ocorreria principalmente através da lavagem e carreamento do termo fonte pela chuva. Este exercício indicou, por conseguinte, que é importante considerar a geometria da

pilha de fosfogesso, pois o escoamento superficial, *runoff*, é, nesse cenário, o aspecto determinante para a contaminação do ambiente, como apontado pela análise de sensibilidade mostrada na Figura 16.

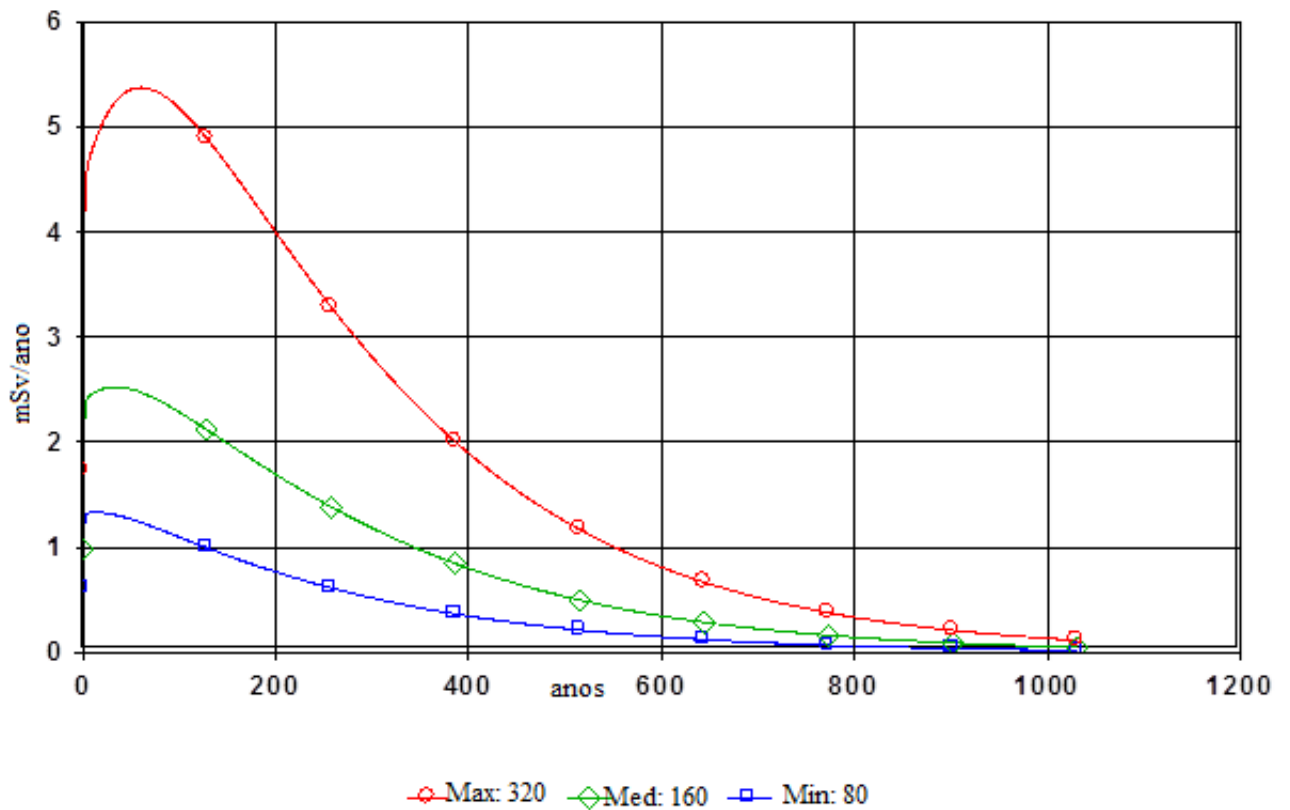


Figura 16 – Gráfico da Análise de sensibilidade do parâmetro índice de erosão causado pela chuva (variação de 2)

A variável índice de erosão pela chuva é, neste exercício de simulação, muito importante, pois afeta outras variáveis. Observando através da análise de sensibilidade no código RESRAD OFFSITE o comportamento da dose em função do volume dos corpos de água de superfície, como riachos e represas, pode-se observar que, quanto menor o volume, maior a dose, como ilustra a Figura 17. Assim, o escoamento superficial da pilha de fosfogesso tem maior impacto sobre os corpos de água de superfície com menor volume, do que os de maior, pois nesses a diluição do material contendo radionuclídeos arrastados a partir da pilha é maior.

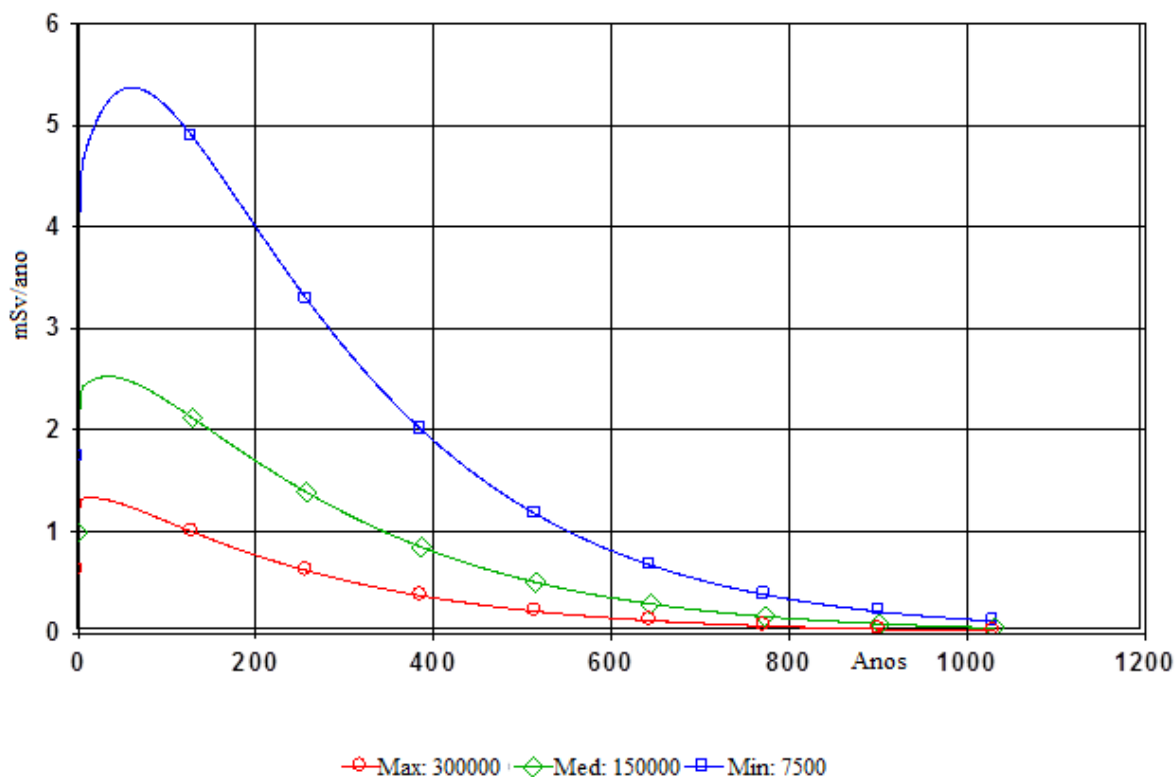


Figura 17 – Gráfico da Análise de sensibilidade do volume das águas de superfície em função da dose.

Desse modo, esta avaliação indica que parâmetros como fator de escoamento superficial tem uma grande influência para a dose e que estes parâmetros deveriam ser preferencialmente estabelecidos para o local. Estes dados de parâmetros específicos do local diminuiriam as incertezas associadas a esta simulação, melhorando a qualidade da previsão do modelo.

Embora o cenário utilizado seja muito conservativo, o arraste dos finos da pilha de fosfogesso, seguido da dissolução do material nos corpos d'águas, não é pouco provável tendo em vista o coeficiente de solubilidade das diferentes formas de sulfato de cálcio existentes no fosfogesso, onde de 2,8 g de fosfogesso seria totalmente solubilizado em 2000 l de água (SANTOS, 2002).

Se confirmadas estas simulações utilizando-se parâmetros específicos do local que tenham maior influência na dose, as barreiras físicas e uma eventual estação de tratamento químico das

águas provenientes da pilha de fosfogesso poderiam vir a fazer parte do leque de opções que talvez sejam necessárias, com o fito de reduzir a contaminação radiológica ambiental proveniente do termo fonte em tela.

Como pode ser observado na Figura 14, a via de exposição mais importante é o consumo de peixe, que seria afetado pela contaminação da água de superfície. No cenário considerado, a população local consome peixe. No entanto, não se tem informações sobre o consumo deste alimento na dieta da população. Porém, é importante ter em perspectiva uma futura mudança de hábitos da população. Caso ocorra uma mudança dos hábitos alimentares da população de interesse, passando a consumir ou aumentando o consumo de pescado, então essas medidas já deveriam ter sido implementadas, sob a ótica da radioproteção, visando a salvaguardar a saúde e o bem estar do público e do meio ambiente.

Deve-se chamar a atenção que a abordagem aqui apresentada, é uma abordagem bastante conservativa e que, no modelo conceitual proposto, tem o objetivo de: isentar a instalação do controle regulatório, caso em uma situação tão extrema seja comprovado que os níveis de dose não são atingidos, ou, em caso contrário, orientar a busca de dados e informações para uma simulação de impacto no grupo crítico mais realista, evitando assim o desperdício de recursos humanos e financeiros. Portanto, a abordagem prospectiva da avaliação da dose num grupo crítico hipotético, mesmo com poucas informações do local, é uma ferramenta útil para orientar as avaliações do impacto causado pela instalação.

4.4.2 Avaliação da Dose no Grupo Crítico Após o Fechamento e o Abandono do Sítio.

Na abordagem aqui proposta, um cenário bastante conservativo foi desenhado. Neste cenário pós-fechamento da empresa a área é abandonada e indivíduos se instalam exatamente em cima da pilha de fosfogesso. Para este cenário rural, a família dispõe de hortas e criação de subsistência, de onde retira toda a sua alimentação e um poço foi aberto para acesso a água. Assim, as vias de exposição consideradas foram: Exposição externa devido a radiação gama, inalação de poeira e radônio e ingestão: água, de vegetais, carne, leite, solo.

Esta simulação foi realizada com o RESRAD 6.5 (ONSITE), cujos parâmetros “defaults” inicialmente adotados são os mesmos do RESRAD OFFSITE. Para esta simulação foram adotados os mesmos valores de parâmetros e dados de entrada utilizados na simulação com o RESRAD OFFSITE e citados na Tabela 1.

A dose para esse grupo crítico, nesse cenário é o que se segue na Figura 18.

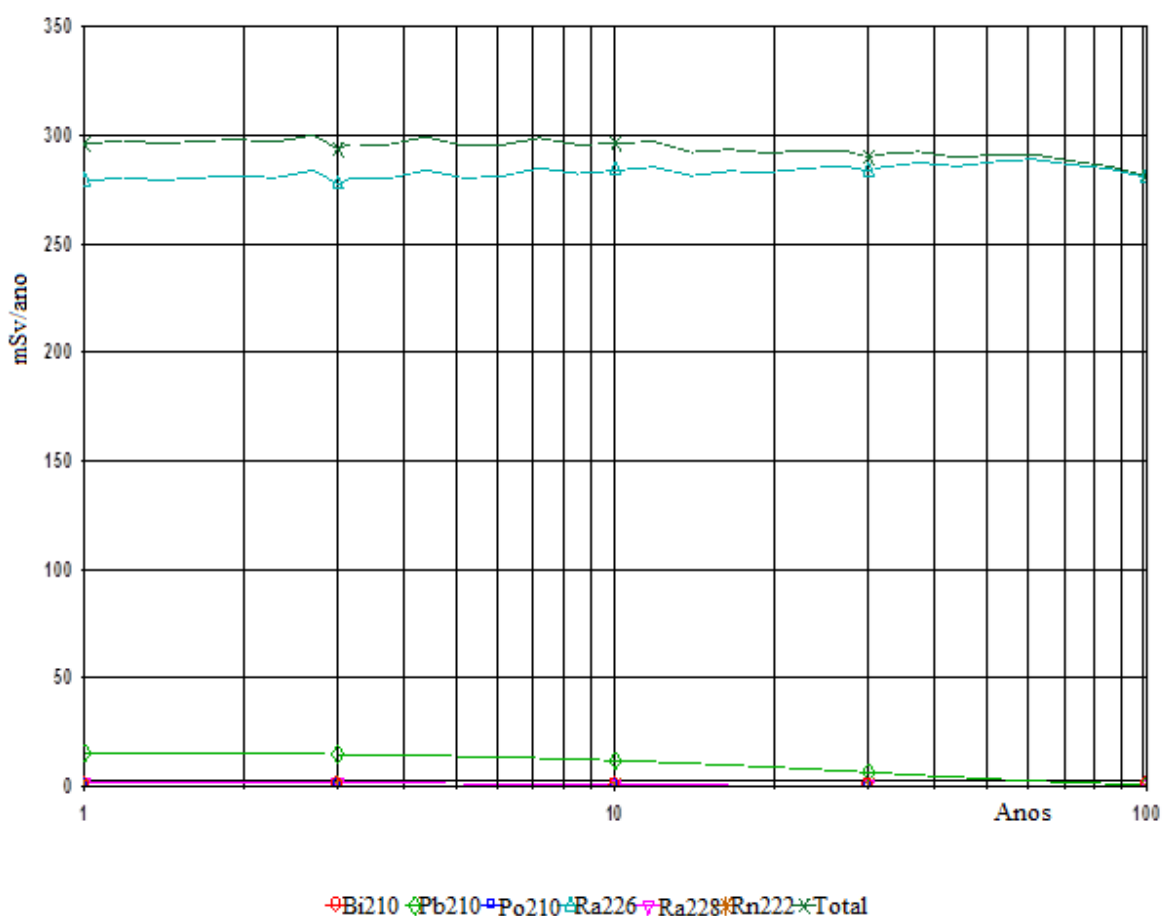


Figura 18 – Contribuição dos radionuclídeos para a dose no grupo crítico situado sobre a pilha

Neste caso, a dose total atinge um valor em torno de 300 mSv/ano. A maior contribuição para a dose é do radionuclídeo ^{226}Ra , seguido pelo radionuclídeo ^{210}Pb , sendo a inalação de radônio a principal via de exposição, contribuindo com 240 mSv/a, seguida pela dose externa que

é responsável por uma dose de aproximadamente 25 mSv/a. A contribuição do ^{226}Ra é expressa pela Figura 19:

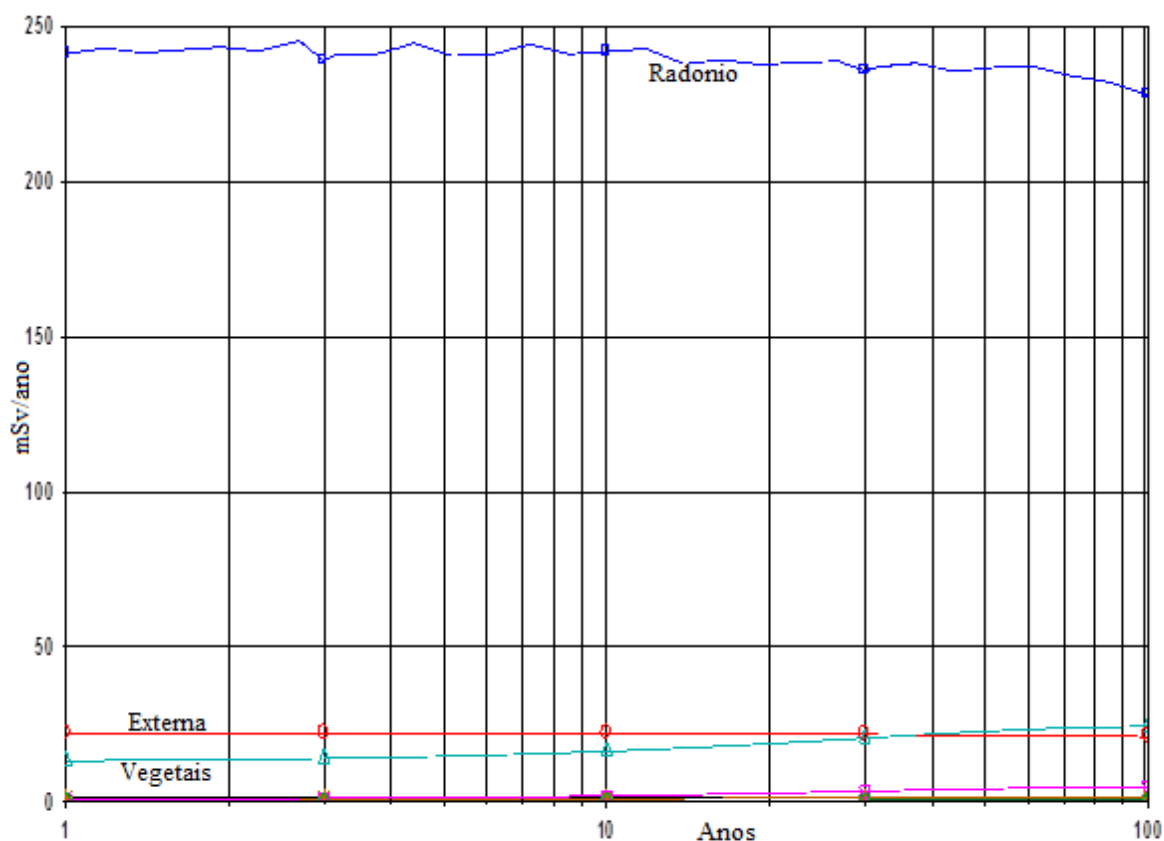


Figura 19 – Contribuição das vias de exposição para a dose no grupo crítico devido ao ^{226}Ra .

A modelagem mostra a importância de começar a planejar a deposição ou a reciclagem desse rejeito para uma situação pós-operacional, visto que o abandono da instalação e a sua ocupação poderiam resultar em grande dose para população que, por ventura, se instale sobre a pilha de fosfogesso.

Dessa forma, o exercício enfatiza a importância de uma avaliação visando o futuro da reutilização da área, de modo a planejar o gerenciamento dos resíduos gerados e prevenir a geração de passivos. Enfatiza, ainda, a necessidade do planejamento do descomissionamento da

área ainda na fase de planejamento da instalação, pois os custos e as opções para minimizar o passivo devem ser considerados.

O descomissionamento da instalação minero-industrial de Santa Quitéria, provavelmente, deverá levar em consideração as implicações da formação deste passivo. Ou seja, que sob o ponto de vista radiológico, a área deve ser restrita. Os limites de dose estão, nesse exercício, bem acima do recomendável e, se isso se confirmar na instalação real, é interessante que as opções já tenham sido estudadas de forma proativa, visando ao futuro descomissionamento da instalação.

4.4.3 Simulação da Dose no Trabalhador

Outro aspecto que deve ser considerado é a dose no trabalhador da instalação. Para esta avaliação foi utilizado o código RESRAD 6.5 (ONSITE), em um cenário onde um trabalhador cumpre parte de sua jornada de trabalho em atividades na pilha de fosfogesso (4 horas por dia). As vias de exposição consideradas foram: ingestão de solo, inalação de radônio e poeira e exposição externa. Na Figura 20, a distribuição da dose por radionuclídeos pode ser visualizada.

Como pode ser observado na figura 20, o valor da dose recebida pelo trabalhador ficou em torno de 6,5 mSv/ano. Nessa simulação, o radionuclídeo que mais contribui para a dose foi o radio 226, sendo a via de exposição mais importante a dose externa, figura 21. Portanto, em vista desse resultado, a dose para os trabalhadores está acima do recomendável para a exposição do público para situações planejadas. De acordo com o novo BSS (IAEA, 2011), este valor estaria dentro da faixa de dose recomendada para trabalhadores da indústria NORM (< 20 mSv/ano), assim como para a CNEN 3.01, enquanto que para a CNEN (4.01) este valor é ligeiramente superior ao nível de referência (6 mSv/a), que é um limiar para providencias específicas de radioproteção.

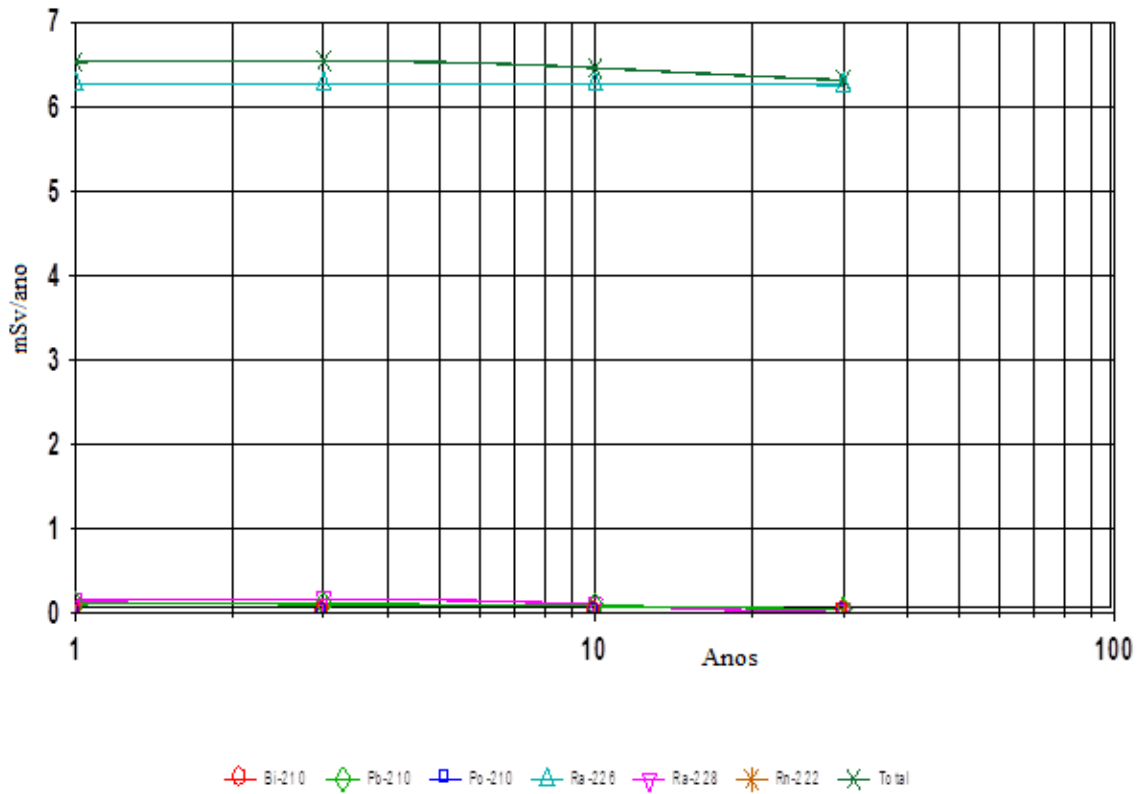


Figura 20 - Gráfico contribuição dos radionuclídeos para a Dose no Trabalhador

É importante considerar que apesar da pilha de fosfógeno ser parte de uma instalação convencional, pois se trata de uma fábrica de ácido fosfórico, protocolos de radioproteção, com o fito de salvaguardar a saúde das pessoas que irão trabalhar nesse empreendimento deverão ser adotados, caso esse exercício de modelagem e simulação se mostre realista.

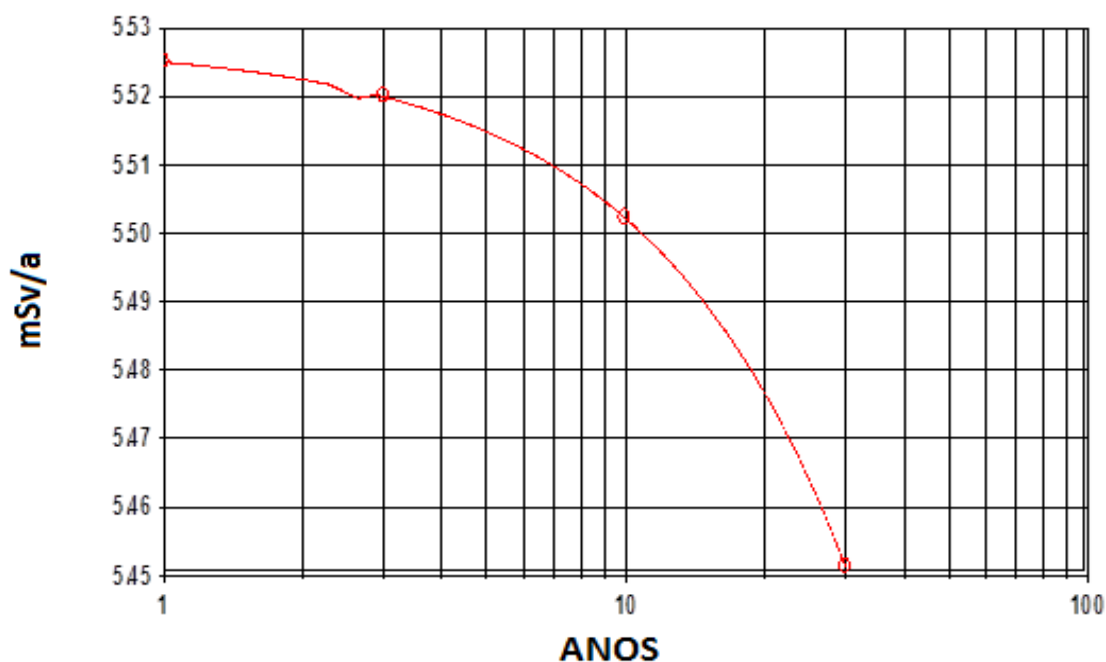


Figura 21 - Gráfico Dose Externa

4.5 Classificando a Instalação de Santa Quitéria Usando a Norma 4.01

Para classificar uma instalação minero-industrial sob o ponto de vista da radioproteção, utilizamos inicialmente a legislação nacional e, portanto, os requisitos da norma CNEN NN 4.01, pois é a norma específica para este tipo de instalação.

Então, segundo essa norma, a instalação minero-industrial de Santa Quitéria deverá ser classificada como de categoria II, pois, na barragem de finos, a atividade específica do ^{238}U seria de 10,2 Bq/g, o que é ligeiramente superior ao nível de referencia de 10 Bq/g para estar nessa categoria. As concentrações na pilha de fosfogesso, onde a atividade específica do ^{226}Ra é de 13 Bq/g e a do ^{210}Pb é de 11 Bq/g também sobrepujam o valor de referencia de 10Bq/g. Assim, a instalação de Santa Quitéria seria classificada como de categoria II, usando o critério da atividade específica previsto em norma.

No cenário de abandono do local, a pilha de fosfogesso não poderia ser considerada como uma área de uso irrestrito após o fim das atividades industriais da planta de Santa Quitéria, pois a norma CNEN NN 4.01, em suas disposições complementares (11.4), estabelece que áreas

contaminadas por resíduos indústrias com doses superiores a 100 mSv/ano devem sofrer remediação obrigatória. E a posição regulatória preconiza que é obrigatória a intervenção quando a dose existente for superior a 50 mSv por ano. Como no segundo cenário a simulação no código RESRAD ONSITE teve como resultado uma dose em torno de 300 mSv/ano, então é importante planejar opções para lidar com esse possível passivo ambiental desde a concepção do projeto do empreendimento.

No terceiro cenário, que é um cenário voltado ao trabalhador, a dose verificada no exercício de simulação foi ligeiramente superior a 6,0 mSv/ano, o que, nas disposições complementares da norma CNEN NN 4.01 (11.5), enseja que as instalações devem conduzir um programa de monitoração dos locais de trabalho.

4.6 Novas tendências de regulação em NORM

Na legislação brasileira atual, norma CNEN NN 4.01, isenta do controle regulatório instalações com material com atividade específica inferior a 10 Bq/g e dose no trabalhador inferior a 1,0 mSv/ano.

Uma tendência internacional é a adoção do critério de concentração de atividade de 1,0 Bq/g para qualquer radionuclídeo da série do urânio e do tório e 10 Bq/g para o potássio 40, como limite acima do qual seria previsto algum tipo de regulação. Para o valor de dose para o público em situação planejada, o valor de 1,0 mSv/ano é uma tendência mundial e é o que deve prevalecer (IAEA, 2011).

Portanto, segundo as tendências atuais, a pilha de fosfogesso com concentrações previstas em torno de 13 Bq/g de ^{226}Ra , deverá ser motivo de avaliações radiológicas ambientais e ocupacionais, (FUKUMA, 2004). Adicionalmente, também outros resíduos gerados na instalação, como os finos que serão gerados na cominuição e separados e segregados em uma barragem, para o qual foi estimada uma concentração de atividade de 10,2 Bq/g de ^{238}U , também enquadram a instalação entre aquelas cujas doses para o público e trabalhador devem ser avaliadas.

Uma tendência internacional sobre depositar o fosfogesso em pilhas, quando da produção de ácido fosfórico, é que esta não seria a solução ótima, e que o uso do fosfogesso em aplicações, como seu uso como corretivo de solo na agricultura, deveria ser tido como solução preferencial (IAEA, 2007). No entanto, dados os valores de concentração de radionuclídeos estimados para o fosfogesso que estará depositado na pilha do Projeto Santa Quitéria essa solução não será possível.

4.7 Avaliação do Impacto Radiológico na Biota

A necessidade de introduzir no arcabouço legal a comprovação de que a biota, como um todo, está protegida, vem sendo motivo de discussões em diversos países. Assim, foram estimados a dose e os riscos para a biota decorrentes da presença do principal termo fonte da planta de ácido fosfórico, a pilha de fosfogesso.

Para tanto, foi utilizado o código ERICA (Environmental Risk from Ionizing Contaminants: Assessment and Management) que vem a ser um programa que tem uma estrutura baseada na abordagem integrada para avaliar o risco radiológico de plantas e animais selecionados em: água superficial, na biota marinha e em ambiente terrestre. A ferramenta tem incorporado modelos de transporte simples para permitir estimativas conservativas na avaliação de descargas de substâncias radioativas para o meio ambiente.

Para esta simulação foram utilizados os resultados de concentração de atividade no meio aquático estimados na modelagem do cenário ambiental, no qual o grupo crítico está localizado na cerca da instalação, e usado o código RESRAD OFFSITE. Os dados se referem a um intervalo de tempo de cinco (5) anos, após a formação da pilha de fosfogesso, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 – Concentração de radionuclídeos em água de superfície.

Radionuclideo	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
Bq/litro	2.3	2.3	2.4	0.04	0.0030

Como resultado da simulação o ERICA estimou a partir das concentrações nas águas as concentrações de atividade no sedimento, obtidos do mesmo modo descrito acima e que estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Concentração de atividade no sedimento

Radionuclideo	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	²²⁸ Th
Bq/Kg d.w.	2.3×10^5	4.6×10^7	1.92×10^2	6.08×10^2	5.52×10^4

Como os valores de concentração estimados para esses radionuclídeos em sedimento são bastante elevados, então é importante salientar que, se confirmados estes valores, o uso de material retirado do fundo dessa massa de água não poderia ser permitido. Portanto, caso as altas concentrações sejam confirmadas, é recomendável a não utilização desse sedimento de fundo.

Para a simulação com o ERICA no corpo de água próximo ao grupo crítico, foram considerados todos os organismos aquáticos listados pelo código, uma vez que as informações existentes do local dão conta da existência de peixes, mas nenhuma informação foi encontrada sobre os demais organismos aquáticos. Os resultados de dose na biota estimados são os mostrados na Figura 22.

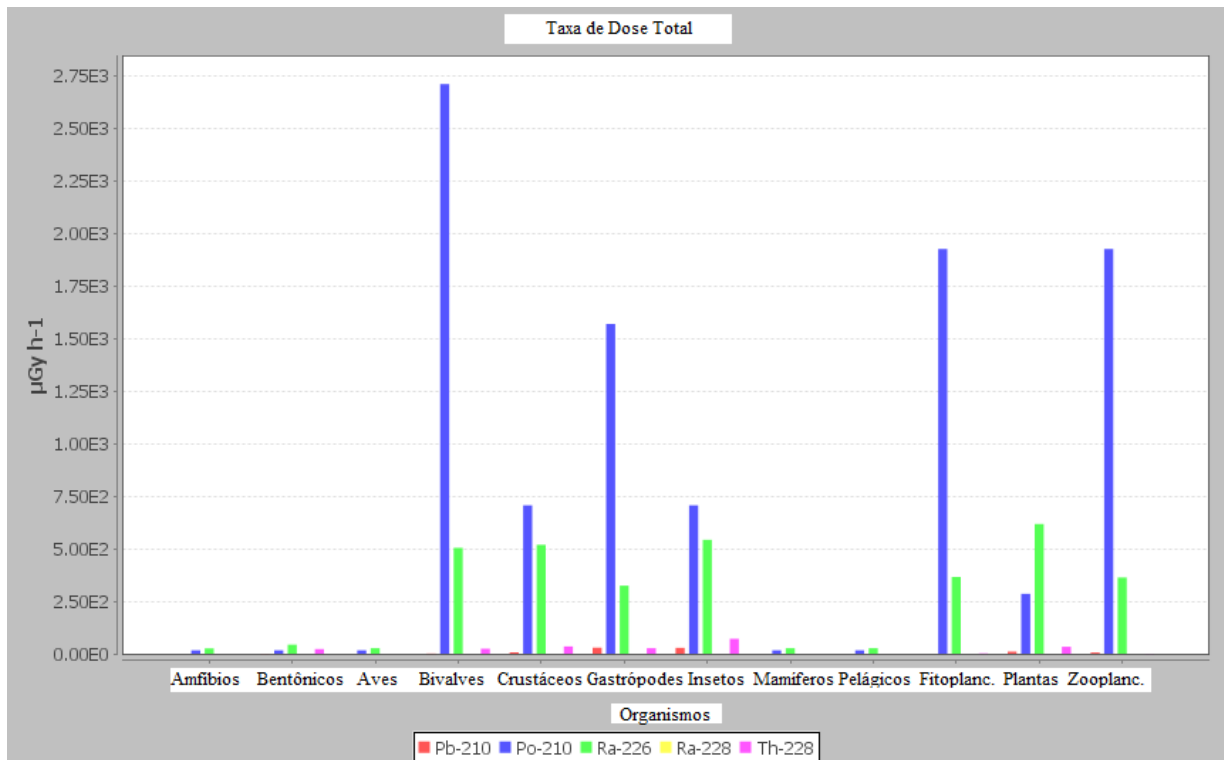


Figura 22 – Dose na biota aquática em água de superfície próxima ao grupo crítico.

O resultado da simulação para o coeficiente de risco para cada grupo de organismos, mostrado na Figura 23.

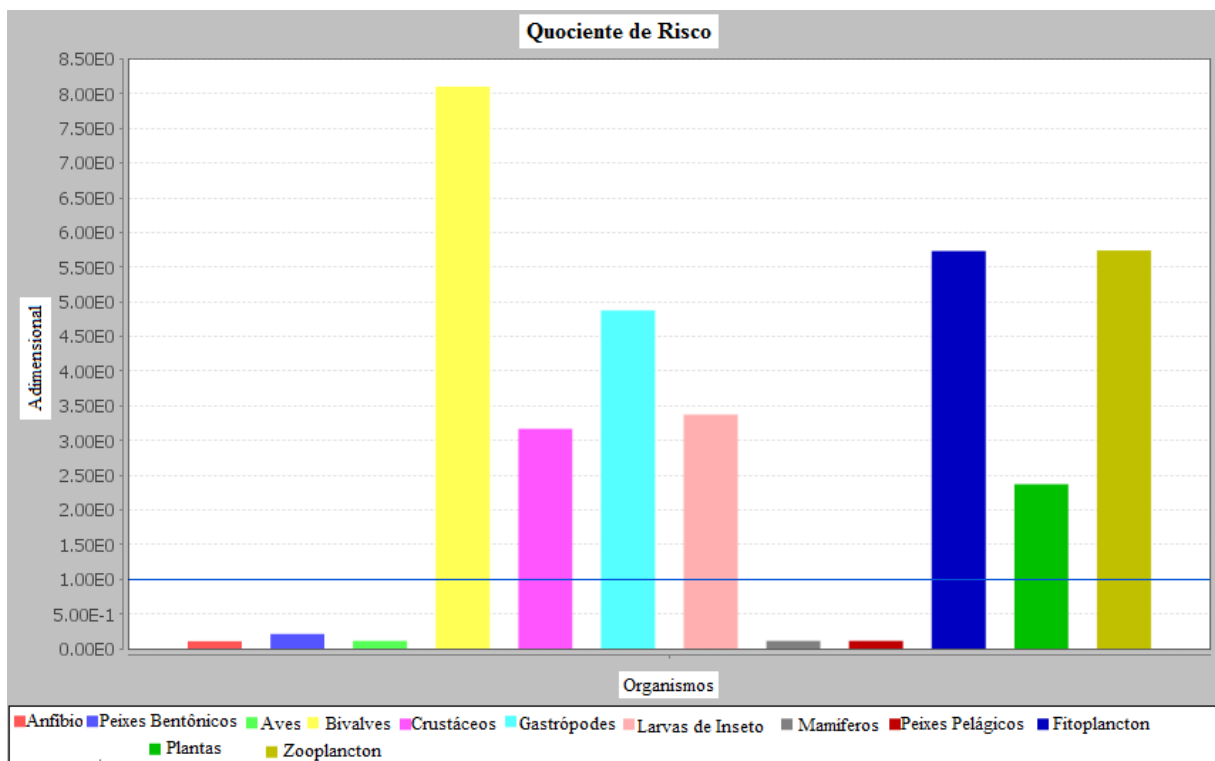


Figura 23 – Coeficiente de Risco por Grupo de Organismo

Os valores referência de dose adotados foram 40 $\mu\text{Gy/h}$ para animal terrestre e 400 $\mu\text{Gy/hora}$ para plantas terrestres e para a biota aquática. Esses valores estão em acordo com a UNSCEAR-1996, que sugere que abaixo desses valores (de exposição crônica) não é possível detectar efeitos na população.

Os resultados da modelagem e simulação utilizando o código ERICA expostos nas Figuras 22 e 23 mostram que os organismos: moluscos bivalves, crustáceos, gastrópodes, larvas de insetos, fitoplancton, plantas e zooplanton são organismos que correm o risco de serem afetados pela exposição à radiação.

Dessa forma, o exercício de simulação indica que é possível ocorrer algum dano ao ecossistema estudado e que uma estratégia para verificar e/ou evitar esse detrimento deve ser implementada.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O modelo conceitual proposto é uma estratégia metodológica de trabalho para auxiliar no processo de tomada de decisão e, assim, orientar as indústrias mineradoras que geram NORM. O modelo orienta os tomadores de decisão e chama atenção para ações que deve ser implementadas com a finalidade de evitar o retrabalho e poupar recursos. Esse modelo conceitual não foi proposto como ferramenta para ser aplicada a toda ou qualquer atividade antrópica que produza NORM, mas apenas as atividades de mineração e o beneficiamento de minérios.

Para a concepção do modelo conceitual foi importante estudar a atuação das instituições internacionais para verificar quais tendências em relação ao NORM estão se formando. Desta forma, foi possível verificar que devido à falta de informações, os problemas potenciais relacionados à radioproteção nas indústrias NORM não estão ainda dimensionados. Existem estudos e discussões sobre a conveniência de recomendar a introdução da proteção à biota no arcabouço legal, no entanto, nenhum limite de dose para a biota foi estabelecido até o momento. A necessidade da participação dos stakeholders, como um fator importante para a sustentabilidade de projetos em que a radioatividade esteja de alguma forma envolvida é um consenso e as recomendações são no sentido de estimular e amplificar esta participação.

A legislação sobre NORM no mundo foi pesquisada através do estudo da legislação de alguns países representativos: EUA, Comunidade Europeia, Canadá e a Austrália. Uma característica em comum é que a legislação nestes países sobre NORM não está consolidada, mas existe uma tendência a seguir o que é proposto na agenda internacional. A Agência Internacional de Energia Atômica aprovou recentemente o novo BSS, onde preconiza um nível de dose para o público de 1,0 mSv/ano para situações planejadas e um nível de referencia de até 20 mSv/ano para situação de exposição existente e assim verificar a viabilidade de implementar medidas de proteção/remediação, utilizando processos de otimização da proteção radiológica. O valor da concentração de atividade para radionuclídeos específicos, abaixo do qual a instalação está isenta de controle regulatório, é de 1,0 Bq/g.

A legislação nacional sobre NORM tem na norma CNEN NN 4.01 sua principal representação. Atualmente, o critério de concentração de atividade que esta sendo recomendado pelo BSS para isentar indústria NORM de controle regulatório é de 1,0 Bq/g; enquanto que a

norma CNEN adota o valor de 10 Bq/g. Para a liberação de uso do resíduo fosfogesso na agricultura ou na indústria cimenteira, a concentração de atividade do rádio deve ser de, no máximo, 1,0 Bq/g, segundo resolução publicada pela CNEN.

O BSS classifica como situação existente, tanto a instalação em operação quanto aquela desativada e áreas contaminadas com resíduos de atividades passadas. Para esta situação, o nível de dose aceitável para o público deve ser menor que 20 mSv/a, sendo que o princípio da otimização deve ser utilizado com o objetivo de atingir o menor valor. Contudo, a legislação nacional designa como exposição crônica áreas contaminadas por práticas não reguladas e estabelece a faixa de níveis de dose para avaliar a necessidade de intervenção, visando diminuir a dose, uma faixa entre 10 e 50 mSv/a incluindo o valor da radiação de fundo do local. Logo, a legislação nacional deverá ser atualizada, provavelmente seguindo as sugestões das instituições internacionais competentes sobre o tema.

Os níveis de dose estimados para o público e para trabalhadores para a pilha de fosfogesso da instalação de Santa Quitéria foram superiores aos níveis de dose de 1 mSv/a para o público e para trabalhadores (6 mSv/a). O carreamento de material da pilha pela água de chuva, seguido pelo ingresso do material nas águas de superfície foi apontado como fator primordial para contaminação da água e dos peixes e, conseqüentemente, dos humanos e da biota. Esta informação indica que a localização e a geometria da pilha são fatores importantes para a contaminação do ambiente e, portanto, devem ser estudados e considerados. Além disto, para uma avaliação mais realista da dose, o parâmetro de escoamento superficial da pilha deve ser determinado.

O sítio de Santa Quitéria dificilmente poderá vir a ser liberado para utilização irrestrita do público após o fechamento da instalação, a se considerar a situação tecnológica e regulamentar atual: o abandono do local e assentamento de pessoas na área poderia levar a doses altíssimas da população e o teor alto de rádio no material impossibilita o seu uso na indústria cimenteira e agricultura e, por conseguinte, a sua retirada da área.

As abordagens para as simulações aplicadas para avaliação de dose na instalação de Santa Quitéria foram conservadoras, alguns parâmetros são “defaults” dos códigos computacionais utilizados e as incertezas não foram avaliadas. Atualmente a instalação não existe, está em fase de planejamento. No entanto, o estudo apresentado é útil para estimar os riscos para o público, os

trabalhadores e o meio ambiente, auxiliando o processo decisório relacionado ao planejamento, viabilidade e sustentabilidade do projeto. As simulações assim realizadas orientam a busca de dados e informações relevantes para avaliações mais realistas, deste modo otimizando recursos e tempo. Em suma, este estudo enfatiza a importância de se realizar uma avaliação dos riscos ambientais e ocupacionais antes do início do funcionamento da instalação, incluindo nestas avaliações não só a fase operacional como também a fase de descomissionamento.

REFERÊNCIAS

AMARANTE, O.A.C., *et al.* **Atlas do Potencial Eólico do Estado do Ceará**, 2001. Disponível em:<<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/downloads/category/6energia?download=16%3Ap>>, Acesso em: 17 de nov. 2011.

ARAÚJO JÚNIOR, J.P.. **Análise de Stakeholders: um estudo exploratório**, Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI, v. 2. N° 4, 2008, São Paulo.

AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION and NUCLEAR SAFETY AGENCY – ARPANSA. 17 October 2011. Disponível em:< <http://www.arpansa.gov.au/index.htm>>. Acesso em: 10 de nov. 2011.

AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION and NUCLEAR SAFETY AGENCY – ARPANSA. 2008. Safety Guide: Management of Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) – Radiation Protection Series n° 15.

BANERJEE, S.B., BONNEFOUS, A-M. **Stakerolder Management and Sustainability Strategies in the French Nuclear Industry**, In: Business Strategy and The Environment, v. 20, p. 124-140, 2011.

BHARGAVA, H., POWER, D.J.. **Decision Support Systems and Web Technologies: A Status Report**. In: **Proceedings of the Americas Conference on Information Systems**, 2001, Boston, MA, p. 3-5.

BORGES, R. C..2011, *Caracterização Química e Radiológica do Fosfogesso de Imbituba-SC e Aspectos Ambientais do Uso na Recuperação de Solos Agrícolas*. Tese de D.Sc, UFF, Niterói, RJ.

CANADIAN GUIDELINES for the MANAGEMENT of NATURALLY OCCURRING RADIOACTIVE MATERIALS (NORM). 2000.In: Canadian NORM Working Group of the Federal Provincial Territorial Radiation Protection Committee.

CANADIAN NUCLEAR SAFETY COMMISSION-CNSC. 2008. Disponível em:<<http://www.nuclearsafety.gc.ca/eng/about/past/1970s/index.cfm>>. Acesso em 10 de nov. 2011.

CANUT, M.M.C.. **Estudo do Uso do Fosfogesso como Material de Construção**. UFMG, Belo Horizonte, MG, 2006, Tese (Mestrado).

CAPPONI, F., MATIOLO, E, RUBIO, J.. **Flotação Extensora de Finos de Minérios de Cobre e Molibdênio**, In: Proceedings of the XXI ENTMMME – Natal , RN, 2005.

CENACHI, N. C.. **Environmental Control and Radioprotection in Itataia and Lagoa Real Uranium Mines**. SEMINÁRIO DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA E CONTROLE AMBIENTAL, CDTN, Belo Horizonte, MG, Brasil, 1988.

CLARK, R.H., VALENTIN, J.. **History of the International Commission on Radiological Protection**. HEALTH PHYSICS, v.88, p.407-422, 2005.

CLARK, R.H., VALENTIN, J.. **The History of ICRP and the Evolution of its Policies**. ICRP publication 109, p.37, 2008,

CNEN, **MISSION: To supply nuclear fuel cycle and related products and services**. Disponível em:< www.cnem.gov.br/lapoc/bra3013/03_INB.pps>. Acesso em:24 de jan. 2012.

CONDESSA, M.L.M.B.. **Programa de Monitoração Ambiental para o Complexo Industrial de Itataia – Fase Pré-Operacional**. Relatório, CDTN, MG, Brasil, 1982.

DELISTRATY, D.. **Radioprotection of Nonhuman Biota**. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, v.99, p. 1863-1869. 2008

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – DNPM, Relatório de Gestão 2009. Brasília, 30 de março de 2010. Disponível em:

http://www.dnppm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=4094. Acesso em: 16 de nov. 2011.

ENVIRONMENTAL SCIENCE DIVISION – EVS, Resrad Family of Risk Codes. Disponível em: < http://www.evs.anl.gov/project/dsp_topicdetail.cfm?topicid=21>. Acesso em: 16 de nov. 2011.

EUROPEAN COMMISSION, Effluent and dose control from European Union NORM industries Assessment of current situation and proposal for a harmonised Community approach, v. 1: Belgium, 2003.

FACILIA, **Erica: risco ambiental de contaminantes ionizantes, avaliação e gestão**. 2011 Disponível em:< <http://www.facilia.se/projects/erica.asp>>. Acessado em: 25 de novembro de 2011.

FARIAS, C.E.G., COELHO, J.M.. **Mineração e meio ambiente no Brasil**. Relatório preparado para o CGEE PNUD – Contrato 2002/001604, Disponível em < http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo011_02.pdf >.Acessado em 04/11/2011.

FERREIRA, J.M.P., 2007, **Sistema Inteligentes – Fundamentos de Aplicações**, capítulo 2. Organização: Solange Oliveira Rezende, ed. Manole, 2005. Disponível em: <http://www.din.uem.br/~jmpinhei/SI/07%20SBC.pdf>, Acesso em: 16 de nov. 2011.

FERREIRA, M.M., FERNANDES, B., CURTI, N.. **Influência da Mineralogia da Fração Argila nas Propriedades Físicas de Latossolos da Região Sudeste do Brasil**. Revista Brasileira da Ciência do Solo. v. 23, p. 515-524, 1999.

FIEC, Palestras Realizadas no Sistema FIEC, 2001. Disponível em:< <http://www.sfiec.org.br/palestras/>>. Acesso em 26 de jan. 2012.

FISCHER, D.. **History of the International Atomic Energy Agency: The First Forty Years**. In: Division of Publications, Vienna, Austria. IAEA, 1997.

FUKUMA, H.T.. **Distribuição de Radionuclídeos Naturais nos Produtos Obtidos na Fabricação de Ácido Fosfórico a Partir da Rocha Fosfática de Itaitaia – Ceará.** Tese (Mestrado) – USP, Piracicaba, SP, Brasil, 1999.

FUKUMA, H.T.. **Purificação de Ácido Fosfórico de Itaitaia, Ceará: Remoção de Tório e outras Espécies Químicas.** Tese de D.Sc., USP, Piracicaba, SP, Brasil, 2004.

FURTADO, J.R.V.. **Recuperação de Finos do Minério Fosforo-Uranífero de Itaitaia-CE.** Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 1985.

GUIANET. **Mapa Rodoviário do Estado do Ceará.** Disponível em:<<http://www.guianet.com.br/ce/mapace.htm>>. Acesso em 24 de jan. de 2012.

HEDEMANN-JENSEN, P.. **Naturally occurring radiation sources: existing or planned exposure situation?**. JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION, v.30, p. 781-787, 2010.

HENDRY, J.H., SIMON, S.L., WOJCIK, A., *et al.* **Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks?**. JOURNAL OF RADIATION PROTECTION, v 29, p. A29-A42, 2009.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, Disponível em:<<http://www.ibram.org.br/sites/700/784/00001367.pdf>> Acesso em 04/11/2011.

INDÚSTRIAS NUCLEARES do BRASIL – INB, 2010, Relatório Anual 2009. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/webforms/RelAtividades.aspx?secao_id=11, Acesso em: 16 de nov. 2011.

INDÚSTRIAS NUCLEARES do BRASIL – INB, 2011, Relatório Anual 2010. Disponível em: http://www.inb.gov.br/inb/webforms/RelAtividades.aspx?secao_id=11, Acesso em: 16 de nov. 2011.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-IAEA, **Naturally Occurring Radioactive Material (NORM V)**. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Naturally Occurring Radioactive Material Organized by the University of Seville in Cooperation with the International Atomic Energy Agency, The Spanish Nuclear Safety Council and the University of Huelva and Hendi, p. 288, Seville, 19–22 Mar, 2007.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY.- IAEA **Safety Reporty Series n° 51, Radiation Protection and NORM Residue Management in the Zircon and Zirconia Industries**. Vienna, Austria, 2007.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY - IAEA. **Safety Reporty Series n°: 34, Radiation Protection and the Management of Radioactive Waste in the Oil and Gas Industry**. Vienna, Austria, 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY- IAEA., **Extent of Environmental Contamination by Naturally Occurring Radioactive Material (NORM) and Technological Options for Mitigation**. In: Technical Reports Series n°. 419. Vienna, 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Draft 4.0 Safety Requirements DS379**. Vienna, 2010.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY-IAEA, **International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources Draft Safety Requirements DS379**. Disponivel em: < <http://www-ns.iaea.org/committees/bss/default.asp?fd=1035> >, Acesso em 25 de novembro de 2011. Draft 5.0, Vienna, 2011.

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP, 1977. Recommendations of the ICRP. ICRP Publication 26. Ann. ICRP 1 (3).

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP 60, International Commission on Radiological Protection; 1990 recommendations of the International Commission on Radiological Protection, 1991.

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP, 2006. Assessing Dose of the Representative Person for the Purpose of the Radiation Protection of the Public. ICRP Publication 101a. Ann. ICRP 36 (3).

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP, 2008. Environmental Protection - the Concept and Use of Reference Animals and Plants. ICRP Publication 108. Ann. ICRP 38 (4-6).

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION.- ICRP, **A Framework for Assessing the Impact of Ionising Radiation on Non-human Species.** Publication 91, 2003.

INTERNATIONAL COMMISSION on RADIOLOGICAL PROTECTION - ICRP. Recommendations of the ICRP. Publication 103, 2007.

JEREZ VERQUERIA, S.F.; GODOY, J.M.. **Application of analytical methods for environmental evaluation of natural radionuclides in the vicinity of the produced water discharges into the sea.** In: Proceedings of the International conference on isotopes in environmental studies - Aquatic Forum 2004, p. 483, Monte Carlo, Monaco, 25-29 Oct, 2004.

KEEN, P.G.W., SCOTT MORTON, M.S.. Decision Support Systems: An Organization Perspective. Addison-Wesley Pub. Co., 1978.

KLEIN, V.A, LIBARDI, P. L.. **Condutividade Hidráulica de um Latossolo Roxo, Não Saturado, Sob Diferentes Sistemas de Uso e Manejo.** Ciência Rural, v.32, n.6, 2002.

KLEINSCHMIDT, D.. **Phosphogypsum Stack Closure,** In: Proceedings of the Workshop Phosphate Fertilizers and the Environment, p. 185-192, USA, 1992.

LAURIA, D.C.; ROCHEDO, E.R.R.. **The Legacy of Monazite Processing in Brazil.** In: Radiation Protection Dosimetry, v. 114, n. 4, p. 546-550, 2005.

LIMA, O.A., LEAL FILHO, L.S., BARBOSA, F.S..Caracterização hidrodinâmica de células mecânicas de flotação: capacidade de bombeamento de célula denver de laboratório, In: Revista Escola de Minas, v. 59, n. 4, p.415-419, Dez. 2006.

MAINARDES, E.W.; ALVES, H., RAPOSO, M.; DOMINGUES, M.J.C.S.. **Um Novo Modelo de Classificação de Stakeholders**, In: V Encontro de Estudos em Estratégia, Porto Alegre, RS, 2011.

MATTA, L. E. , 2001, *Avaliação dos Problemas Radiológicos Devidos aos Radionuclídeos Naturais, em Estações de Extração e Produção de Petróleo*. Tese de D.Sc. – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

MAZZILLI, B.P. *et al.* **Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum**. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, v. 49, n. 1, p. 113-122, 2000.

MINISTÉRIO PÚBLICO FEDERAL – 2011, Disponível em : <http://www.prr5.mpf.gov.br/prr5/index.php?opcao=9.5.1&pagina=exibeNoticias_2011¬ic=2011_042_05_19>. Acesso em 29 de dez. 2011.

MIRANDA, M. V.F.E.S. , 2009, *Estudos dos Níveis de Emissão de RN-222 Presente nos Materiais Radioativos de Ocorrência Natural-NORM*. Tese de M.Sc. – COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

NAVARRO, R.F.. **A Evolução dos Materiais. Parte1: da Pré-história ao Início da Era Moderna**. In: Revista Eletrônica de Materiais e Processo, v. 1, p. 01-11, 2006.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION - NRC. May, 2011. History. Disponível em :<<http://www.nrc.gov/about-nrc/history.html>>. Acesso em 10 de nov. 2011.

NUCLEAR REGULATORY COMMISSION - NRC. 2003. Report of the Public Communications Task Force. Disponível em :< <http://www.nrc.gov/public-involve/stakeholder-involvement/final-report.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2012.

PASCHOA, A. S., STEINHAEUSLER, F.. **Comparative assessment of the European and Latin American scenarios for NORM/TENORM exposure.** In: Proceedings of an international symposium Technologically Enhanced Natural Radiation – (TENR II), IAEA Tecdoc 1271, p. 70-76, Feb., 2002.

PENNA-FRANCA, E.. **Review of Brazilian Investigations in Areas of High Natural Radioactivity Part II Internal Exposure and Cytogenetic Surveys,** In: International SIMPOSIUM ON AREAS OF HIGH NATURAL RADIOACTIVITY, p. 29-48, Poços de Caldas, Brazil, June 16-20, 1977.

PERES, A.E.C., CHAVES, A.P., LINS, F.A.F., TOREM, M.L., “Beneficiamento de Minérios de Ouro”, In: CETEM/MCT e PUC-Rio, *Extração de Ouro: Principios, tecnologia e Meio Ambiente*, capitulo 2. Rio de Janeiro, Brasil, 2002.

PIRES do RIO, M.A., *et al.* **Environmental Radiological Impact Associated With Non-Uranium Mining Industries: a Proposal for Screening Criteria,** JOURNAL OF ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY, v. 59, p. 1-17, 2002.

POWER, D. J.. **A Brief History of Decision Support Systems.** version 2.8, May 31, 2003. Disponível em : <http://DSSResources.COM/history/dsshistory.html>. Acesso em: 16 de nov. 2011.

REIS JUNIOR, J.B., AQUINO, J.A., LUZ, I.L.O., 1987, *Estudo em Planta Piloto do Minério Fósforo-uranífero de Itataia* – CE. NUCLEBRÁS/CDTN.

RIBEIRO, V.A.L., *et al.* **Extração líquido-líquido de urânio (VI) do colofanito de Itataia (Santa Quitéria, Ceará) por extratantes orgânicos em presença de ácido fosfórico.** Química Nova, v. 31, n° 8, SP, 2008.

ROSA, R., NASCIMENTO, U.C.S.. **Characteristics of external dose distribution in the metallic tin production.** In: Proceedings of the International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA): Strengthening radiation protection worldwide, Buenos Aires, Argentina, 19-24 Oct, 2008.

ROZANSKI, K., FROEHLICK, K.. **Radioactivity and earth sciences: Understanding the natural environment.** In: IAEA Bulletin, v.2, p.9-15., 1996.

SAAD, S.. 1995, *Alguns Aspectos do Impacto Radiológico na Indústria de Fertilizantes Fosfatados - Estudo de um Caso-Itataia (Ce)*. Tese de Msc., Instituto de Engenharia Militar, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

SANTOS, A.J.G., 2002, *Avaliação do Impacto Radiológico Ambiental do Fosfogesso Brasileiro e Lixiviação de ^{226}Ra e ^{210}Pb* . Tese de D. Sc., IPEN, São Paulo, Brasil.

SHIM, J. P., *et al.* **Past, present, and future of decision technology.** In: Decision Support Systems, n. 33, p. 111-126, 2002.

SILVA, J.R. de A., **Caracterização Hidrogeologia da Jazida de Itataia-CE**, In: XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Cuiabá – MT, 2004.

SILVA, L. H. da C.. , 1997, *Aspectos Econômico- Ambientais do Uso do Fosfogesso na Agricultura*. Tese de M.Sc. – COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

TEIXEIRA JUNIOR, R. F.. , 2005, *Sistema de Apoio à Decisão para Programação da Produção em Fundições de Mercado*. Tese de D.Sc. – UFSCar, São Carlos, SP, Brasil.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE on the EFFECTS of ATOMIC RADIATION – UNSCEAR 2006, Disponível em: < <http://www.unscear.org/unscear/index.html>>. Acesso em 08 de nov. 2011.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE on the EFFECTS of ATOMIC RADIATION – UNSCEAR 1996 Report – Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly, with scientific annex. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE on the EFFECTS of ATOMIC RADIATION – UNSCEAR 2008 – Report to the General Assembly, with scientific annexes. Volume I: Report to the General Assembly, Scientific Annexes A and B.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. **Fertilizer and Fertilizer Production Waste**. July, 8 – 2011.. Disponível em : < <http://www.epa.gov/radiation/tenorm/fertilizer.html>>. Acesso em 10 de nov. 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – EPA. EPA History. Nov., 9, 2011. Disponível em:< <http://www.epa.gov/history/>>. Acesso em 10 de nov. 2011.

VAN ALPHEN, J.G., LOS RIOS ROMERO, F.. **Gypsiferous Soils, Notes on their Characteristics and Management**. In: Bulletin 12, International Institute for Land Reclamation and Improvement, 1971.

VAN der STEEN, J.; VAN WEEN, A.W.. **Radiation Protection in NORM Industries**. IRPA 11, 2004.

VENCATO, A.C.B.. , 1982, *Direito Nuclear e Proteção Ambiental*. Tese de M.Sc. – Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.

VILLAS BÔAS, R.C.. **Indicadores de Desenvolvimento Sustentável para a Indústria Extrativa Mineral: Guia Prático**. Rio de Janeiro: CETEN-MCT, p. 28. 2009.

WRIXON, A.D.. **New ICRP recommendations**, JOURNAL OF RADIOLOGICAL PROTECTION, v. 28, p.161-167, 2008.