

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

VALQUIRIA MIRANDA BULHOSA

RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE CÂNCER SÓLIDO E SUA RELAÇÃO COM AS
CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA DE PASQUILL-GIFFORD EM
CENÁRIOS RDD

Rio de Janeiro

2018

VALQUIRIA MIRANDA BULHOSA

RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE CÂNCER SÓLIDO E SUA RELAÇÃO COM AS
CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA DE PASQUILL-GIFFORD EM
CENÁRIOS RDD

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares do Instituto de Engenharia Nuclear da Comissão Nacional de Energia Nuclear como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Ciências e Tecnologias Nucleares.

Orientador: Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc

Orientador Externo: Edson Ramos de Andrade, D.Sc

Rio de Janeiro

2018

BULH Bulhosa, Valquiria

Dependência do risco de desenvolvimento de câncer sólido para diferentes classes de estabilidade atmosférica em cenários envolvendo dispositivos de dispersão radiológica / Valquiria Miranda Bulhosa. -- Rio de Janeiro: CNEN/IEN, 2018.

xii, 59 f.: Il.; 31cm

Orientadores: Zelmo Rodrigues de Lima e Edson Ramos de Andrade

Dissertação (mestrado) – Instituto de Engenharia Nuclear, PPGIEN, 2018

1. Dispersão Radiológica 2. Indução de Câncer 3. Risco Relativo.

RISCO DE DESENVOLVIMENTO DE CÂNCER SÓLIDO E SUA RELAÇÃO COM AS
CLASSES DE ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA DE PASQUILL-GIFFORD EM
CENÁRIOS RDD

Valquiria Miranda Bulhosa

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E TECNOLOGIA NUCLEARES DO INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR DA
COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS E
TECNOLOGIA NUCLEARES

Aprovada por:

Prof. Zelmo Rodrigues de Lima, D.Sc.

Prof. Edson Ramos de Andrade, D.Sc.

Prof. Cesar Marques Salgado, D.Sc.

Prof.(a). Lidia Vasconcellos de Sá, D.Sc.

Rio de Janeiro

2018

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a minha querida mãe, que me deu todo o suporte para chegar até aqui e sempre esteve ao meu lado e também a minha irmã por sempre ter acreditado no meu potencial.

Agradeço ao orientador Zelmo pelo apoio e entusiasmo pela nossa pesquisa e ao orientador Edson pelo apoio, confiança e por estar sempre disposto a me ajudar em todos os momentos de dificuldades.

Aos meus colegas de classe, pelas inúmeras contribuições e troca de conhecimentos, além de proporcionarem momentos de descontração amenizando a difícil tarefa desta longa caminhada.

Agradeço a todos os funcionários do IEN e ao Programa de Pós Graduação - PPGIEN por me acolherem durante o período do mestrado. Em especial à Servidora Cláudia Maria Dias Coelho por todo carinho e tratamento especial.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Cesar Marques Salgado e Prof.(a). Lidia Vasconcellos de Sá por gentilmente se disponibilizarem a participar.

A CNEN e ao IEN por me permitirem utilizar seu espaço e todas suas ferramentas científica, educacional e tecnológica, além de disponibilizar profissionais de alto cunho técnico para me auxiliar.

Por último, agradeço a CNEN pela bolsa concedida cuja qual me possibilitou realizar o curso.

RESUMO

A liberação de material radioativo para o meio ambiente pode levar a sérias consequências que incluem o risco de indução de câncer na população afetada. Este trabalho pretende estudar a influência das classes de estabilidade atmosféricas de Pasquill-Gilfford sobre as consequências de um evento RDD simulado com relação ao risco de desenvolvimento de câncer sólido na população exposta. Utiliza-se o software *HotSpot health Physics Code* para a simulação do cenário radiológico que permite estimar as doses recebidas pelos indivíduos expostos e a contaminação ambiental no local do evento. O código do HotSpot utiliza o modelo gaussiano para simular a dispersão do material radiológico na atmosfera. De forma conservativa, gera dados para avaliar a contaminação de uma área de interesse. Esses dados permitem conhecer a Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE), que corresponde à dose combinada de todas as vias de exposição (externa e interna). A dose estimada foi utilizada como dados de entrada para o modelo bioestatístico desenvolvido pela *Radiation Effects Research Foundation* (RERF) para estimar o risco de desenvolvimento de morbidade relacionável ao evento. A equação do modelo estimam o risco de desenvolver câncer sólido. Os dados do HotSpot permitiram efetuar o cálculo das áreas afetadas, doses em cada área, bem como estimativa de risco relativo (RR) de câncer sólido para a população afetada, levando em consideração idade e sexo e sua possível relação com as classes de estabilidade atmosférica. Essas estimativas podem ser um bom recurso para uma primeira avaliação de tal cenário, levando em consideração os limites de dose recomendados para abrigo e evacuação e, conseqüentemente, um suporte de decisão valioso para o evento radiológico em andamento.

Palavras chave: Dispersão Radiológica, Indução de Câncer e Risco Relativo.

ABSTRACT

The release of radioactive material into the environment can lead to serious consequences that include the risk of cancer induction in the affected population. This work intends to study the influence of the Pasquill-Gilfford atmospheric stability classes on the consequences of a simulated RDD event with respect to the risk of developing solid cancer in the exposed population. The HotSpot health Physics Code software was used for the simulation of the radiological scenario that allows to estimate the doses received by exposed individuals and the environmental contamination at the event site. The HotSpot code uses the Gaussian model to simulate the dispersion of radiological material in the atmosphere. Conservatively, it generates data to evaluate the contamination of an area of interest. These data allow to know the Total Effective Equivalent Dose (TEDE), which corresponds to the combined dose of all exposure routes (external and internal). The estimated dose was used as input data for the biostatistical model developed by the Research Foundation on Radiation Effects (RERF) to estimate the risk of the related morbidity development. The model equation estimate the risk of developing solid cancer. The data from HotSpot enabled the calculation of the affected areas, doses in each area, as well as relative risk (RR) of solid cancer estimation for the affected population, taking into account age and sex and its possible relation with the classes of atmospheric stability. These estimates can be a good resource for a first evaluation of such a scenario, accounting for the recommended dose limits for shelter and evacuation and, consequently, a valuable decision support for the ongoing radiological event.

Key words: Radiological Dispersion, Cancer Induction and Relative Risk.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|--------------------------------------|
| Figura 1 - Espectro eletromagnético da radiação (Fonte: Adaptado do site: http://slideplayer.com.br/slide/10823194/). | 19 |
| Figura 2 - Categorização simples das radiações (ANDRADE, 2010). | 19 |
| Figura 3 - Coordenadas utilizadas no código do software HotSpot (HOMANN, 2014). | 25 |
| Figura 4 - Representação gráfica das equações para σ_y em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014). | 30 |
| Figura 5 - Representação Gráfica das equações para σ_z em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014). | 30 |
| Figura 6 - Perfis da camada de mistura (RPD, 2002). | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 7 - Pluma com o tempo de amostragem de 1/50 s (HOMANN, 2014). | 31 |
| Figura 8 - Pluma com o tempo de amostragem de 5 minutos (HOMANN, 2014). | 32 |
| Figura 9 - Visão geral da metodologia aplicada ao estudo. | 39 |
| Figura 10 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade A. | 45 |
| Figura 11 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade B. | 46 |
| Figura 12 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade C. | 47 |
| Figura 13 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade D. | 48 |
| Figura 14 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade E. | 49 |
| Figura 15 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade F. | 50 |
| Figura 16 - Plumadas estimadas utilizando diferentes classes de estabilidade de A (instável) a F (estável). | 51 |
| Figura 17 – Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE – Sv) para cada classe de estabilidade atmosférica em distâncias determinadas (conforme as legendas) a partir da explosão. Fig. 17A (até 0,1km), Fig. 17B (até 0,6 km), Fig. 17C (até 2,0 km), Fig. 17D (até 10 km) e Fig. 17E (até 80 km). | 52 |
| Figura 18 - Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE – Sv) para uma distância de 500 m da explosão. | 53 |
| Figura 19 - Risco Relativo (RR) para cada classe de estabilidade atmosférica a uma distância de 500 m da explosão. Fig. 19A se refere ao sexo masculino e a Fig. 19B ao feminino. | 54 |
| Figura 20 - Probabilidade de Causa para cada classe de estabilidade a uma distância de 500 m da explosão. | 55 |
| Figura 21 - Distância próxima ao limite de exposição do público em geral. | 55 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|--------------------------------------|
| Tabela 1 - Radiações ionizantes e suas características (VALVERDE, 2010)..... | 21 |
| Tabela 2 - Condições meteorológicas para definir a classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot (HOMANN, 2014)..... | 27 |
| Tabela 3 - Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014). | 29 |
| Tabela 4 - Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014)..... | 29 |
| Tabela 5 - Valores típicos de profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidades (HOMANN, 2014)..... | Erro! Indicador não definido. |
| Tabela 6 - Fator exponencial p usado pelo software HotSpot para cálculo da velocidade do vento em função da altura (HOMANN, 2014). | 33 |
| Tabela 7 - Componentes respiráveis e não respiráveis (HOMANN, 2014). | 34 |
| Tabela 8 - Valores típicos do coeficiente em função da taxa de precipitação (HOMANN, 2014). | 35 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------|---|--|
| AD | - | <i>Aerodynamic Diameter</i> |
| ARF | - | Fração de Ar |
| BEIR | - | <i>Biological Effects of Ionizing Radiation</i> |
| CNEN | - | Comissão Nacional de Energia Nuclear |
| DR | - | Razão de Dano |
| EPA | - | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| FGR | - | <i>Federal Guidance Report</i> |
| IABTI | - | <i>International Association of Bomb Technicians and Investigators</i> |
| IAEA | - | <i>International Atomic Energy Agency</i> |
| INCA | - | Instituto Nacional do Câncer |
| IBGE | - | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| ICRP | - | <i>International Commission on Radiological Protection</i> |
| ITDB | - | <i>Incident and Trafficking Database</i> |
| LSS | - | <i>Life Span Study</i> |
| LPF | - | Fator de <i>Leakpath</i> |
| MAR | - | Material em Risco |
| MS | - | Ministério da Saúde |
| NIH | - | <i>National Institute of Health</i> |
| PC | - | <i>Probability of Causation</i> |
| RDD | - | <i>Radiological Dispersal Device</i> |
| RERF | - | <i>Radiation Effects Research Foundation</i> |
| RF | - | Fração Respirável |
| RR | - | Risco Relativo |
| TEDE | - | <i>Total Effective Dose Equivalent</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|--------------------------------------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 13 |
| 2. | OBJETIVOS | 17 |
| 2.1. | OBJETIVO GERAL | 17 |
| 2.2. | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 17 |
| 3. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 18 |
| 3.1. | RADIAÇÃO..... | 18 |
| 3.1.1. | Considerações sobre as diferentes radiações ionizantes..... | 20 |
| 3.1.2. | Efeitos biológicos da radiações ionizantes..... | 21 |
| 3.2. | ATIVIDADE..... | 21 |
| 3.3. | MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO..... | 21 |
| 3.4. | DOSE ABSORVIDA (D)..... | 22 |
| 3.5. | DOSE EQUIVALENTE (HT) | 22 |
| 3.6. | DOSE EFETIVA..... | 22 |
| 3.7. | DOSE TOTAL EFETIVA (TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT – TEDE)..... | 22 |
| 3.8. | DOSE COLETIVA | 22 |
| 3.9. | ACIDENTES..... | 23 |
| 3.10. | HOTSPOT..... | 24 |
| 3.10.1. | Modelo Gaussiano..... | 25 |
| 3.10.2. | Dose na passagem da pluma..... | 26 |
| 3.10.3. | Classificação da Estabilidade Atmosférica | 27 |
| 3.10.4. | Determinando σ_y e σ_z | 28 |
| 3.10.5. | Profundidade da camada de mistura..... | Erro! Indicador não definido. |
| 3.10.7. | Tempo de amostragem | 30 |
| 3.10.8. | Altura efetiva de liberação | 32 |
| 3.10.9. | Varição da velocidade do vento com a altura..... | 32 |
| 3.10.10. | Depleção da pluma - Deposição seca | 33 |
| 3.10.11. | Depleção da pluma - Deposição úmida..... | 35 |
| 3.10.12. | Depleção da pluma - Deposição no solo | 35 |
| 3.10.13. | Ressuspensão..... | 36 |
| 3.10.14. | Fatores de conversão de dose | 36 |
| 3.11. | MODELO DE DESENVOLVIMENTO DE CÂNCER SÓLIDO | 37 |
| 4. | METODOLOGIA | 39 |
| 4.1. | CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO | 40 |
| 4.2. | RISCO RELATIVO PARA CÂNCER SÓLIDO..... | 42 |
| 4.3. | PROBABILIDADE DE CAUSA..... | 43 |

| | |
|---|----|
| 5. RESULTADOS | 44 |
| 6. DISCUSSÃO..... | 57 |
| 7. CONCLUSÃO | 59 |
| PERSPECTIVAS FUTURAS | 61 |
| REFERÊNCIAS | 62 |
| ANEXO A – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE A | 66 |
| ANEXO B – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE B..... | 67 |
| ANEXO C – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE C..... | 68 |
| ANEXO D – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE D | 69 |
| ANEXO E – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE E | 70 |
| ANEXO F – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE F..... | 71 |

1. INTRODUÇÃO

Dispositivos de Dispersão Radiológica (RDD – do inglês *Radiological Dispersal Device*) são artefatos que utilizam material explosivo com a finalidade de dispersar material radioativo causando impactos negativos tanto na saúde coletiva como na ambiental. Os danos mecânicos potencialmente gerados pela explosão não configuram como o objetivo principal de um artefato desta natureza, porém são importantes e devem ser considerados para a determinação da zona de segurança para esses efeitos. Esta determinação afeta de forma fundamental o processo decisório por se tratar de um setor do evento que pode conter efeitos biológicos combinados (radiológicos e mecânicos). A combinação de efeitos radiológicos e mecânicos acarreta consequências complexas que são conhecidas como lesões combinadas (METTLER, 2002). Embora importantes, essas lesões combinadas podem ter menor peso nas decisões que envolva ações de resposta primária à emergência quando comparadas à contaminação radiológica ambiental. Entretanto, na zona de combinação de efeitos (radiológicos e mecânicos) o atendimento médico, por definição, dá prioridade aos aspectos não radiológicos, o que pode provocar alguma dificuldade no acompanhamento daqueles indivíduos (METTLER, 2002).

Para que um RDD seja efetivo em sua função de provocar contaminação ambiental, não é necessária uma grande quantidade de explosivos, uma vez que há variáveis ambientais que contribuem decisivamente para a determinação do espalhamento da contaminação. Um exemplo de variável que é tratada neste trabalho são as classes de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford, cuja influência sobre os níveis de contaminação é tal que o conhecimento sobre as classes e sua monitoração permite melhor dimensionamento dos recursos a serem empregados, por exemplo, em ações de abrigagem e evacuação da população potencialmente afetada. Neste trabalho considera-se o contexto no qual uma pequena quantidade de material radioativo pode contaminar uma grande área e provocar importantes impactos nos campos ambiental, social e econômico.

Normalmente a emergência está vinculada a ações locais no espaço e no tempo enquanto que este trabalho propõe metodologia de geração de dados que podem ter caráter dual, ou seja, podem ser utilizados tanto para apoiar decisões em tempo real como no futuro, auxiliando o processo de avaliação de risco em uma dimensão temporal. A avaliação de risco é constituída,

em geral, de quatro estágios: (a) identificação do perigo; (b) avaliação da exposição; (c) avaliação do risco propriamente dita; e (d) gerenciamento do risco (NRC, 1983).

Cenários de emergências radiológicas ou nucleares normalmente têm como característica um alto grau de desinformação inicial sobre as fontes de radiação e sua localização no ambiente. Estas informações são relevantes para uma avaliação de risco adequada ao dimensionamento da resposta em termos de custo operacional e aplicação de metodologias epidemiológicas decorrentes para o acompanhamento de população afetada.

A realização de simulações pode ser uma ferramenta de valor não só para se prever potenciais resultados sobre liberações de materiais radioativos para o meio ambiente, como também para suprir com informações relevantes estratégias para o desenvolvimento de operações de resposta a emergências desta natureza. Dispor de ferramentas metodológicas que permitam avaliar consequências resultantes das atividades humanas, de qualquer natureza, sobre os seres humanos e a biosfera é um caminho para a garantia tanto da segurança quanto da manutenção da vida. Estudos em modelagem computacional representam um campo aberto para novas descobertas e o emprego desta poderosa metodologia no auxílio direto ao escalão de decisão em um estado de emergência configura-se um desafio importante.

O processo de tomada de decisões frequentemente se dá em circunstâncias de incerteza. Decisões cujas implicações econômicas, sociais e ambientais nem sempre são antecipáveis. Levando em conta a complexidade das relações sociais, das interações ecológicas e entre humanos, as consequências diretas e indiretas de um processo de tomada de decisão não são de todo previsíveis (CEZAR, 2003). Por esta razão, estimar as consequências de um RDD é de significativo interesse para ações cujo objetivo seja gerenciar adequadamente operações de evacuação, abrigagem e descontaminação de área, assim como projetar expectativas futuras sobre as condições de saúde coletiva.

Os dados gerados nas simulações realizadas neste estudo, são consequência de uma abordagem conservativa. Desta forma, consideram ambiente superestimado em relação ao que se enfrentaria em condições reais. Entende-se que esta abordagem proporciona uma vantagem estratégica que pode ter impacto positivo sobre as decisões ao longo de uma resposta e também, em visão de futuro, no desenho das fronteiras de estudos epidemiológicos sobre a população potencialmente afetada. Em última análise, pode-se esperar que as conclusões

sobre os dados simulados possam ter efeitos positivos sobre uma avaliação dos impactos econômicos associados ao evento radiológico. Uma abordagem sobre impactos econômicos considerando problema semelhante pode ser encontrada em Rosoff e Winterfeldt (2007).

A estimativa de incidência de novos casos de morbidades como o câncer radioinduzido sobre a população potencialmente afetada pode ser avaliada por meio de modelos estatísticos como os apresentados pela *Radiation Effects Research Foundation* (RERF) e comitês *Biological Effects of Ionizing Radiation V* e *VII* (BEIR V, 1990 e BEIR VII, 2006). Este trabalho propõe integrar o HotSpot e as equações RERF de forma a se produzir um quadro de risco específico para desenvolvimento de tumores sólidos em decorrência de exposição ambiental a contaminante radiológico, neste caso o céσιο-137 (Cs-137). A esta integração se denomina Metodologia de Convergência (ROTHER, 2016).

O modelo bioestatístico RERF foi desenvolvido a partir de estudos sobre efeitos biológicos das radiações conduzidos desde os bombardeios nucleares no Japão na década de 1940. O modelo RERF fornece uma estimativa dos riscos de efeitos genéticos e somáticos em seres humanos expostos a um certo nível de radiação ionizante, permitindo estimar o risco de indução de câncer para órgãos específicos em função da dose absorvida e do tempo de exposição. Assim, é possível calcular o Risco Relativo (RR) para o desenvolvimento de câncer sólido induzido pela exposição à radiação ionizante externa e de corpo inteiro por meio desse modelo matemático. Considera-se o RR como a relação entre o risco de desenvolvimento da doença na população exposta e não exposta (IAEA, 1996).

Como há uma lacuna de incerteza entre os dados gerados e o que pode realmente ocorrer em termos de incidência da morbidade, o conceito de probabilidade de causa (PC – do inglês, *Probability of Causation*) é introduzido, de forma a se verificar a força estatística da correlação entre causa e provável efeito (IAEA, 1996).

Como exemplo de evolução de cenários envolvendo o Cs-137, pode-se citar o caso ocorrido no Centro-Oeste brasileiro nos anos 1980. O acidente com o Cs-137 em Goiânia no ano de 1987 foi considerado o maior acidente radiológico em área urbana do mundo, de modo a provocar o medo de novas ocorrências, tornar os efeitos deletérios conhecidos e aprofundar os estudos relativos à prevenção, preparação, mitigação e resposta (VIEIRA, 2015). O Cs-137 pode ser encontrado, dentre outras aplicações, em irradiadores de tecido e sangue, com atividades consideradas de interesse para o presente estudo, cujas doses equivalentes efetivas

totais (TEDE – *Total Effective Dose Equivalent*) produzidas como decorrência de uma explosão de um RDD podem ser estimadas, bem como os principais efeitos sobre uma população potencialmente afetada.

Este trabalho trata de um exemplo de liberação ambiental externa de material radioativo. Desta forma, a importância das classes de estabilidade atmosférica de Pasquill (PASQUILL, 1974) na estimativa dos riscos radiológicos sobre a saúde humana, decorrentes dessa liberação de material radiológico para o ambiente, é central. Neste trabalho se discute a influência dessas classes de forma isolada sobre o risco de desenvolvimento de câncer radioinduzido sobre uma população potencialmente afetada e como consequência de um evento RDD. Desta forma, foi estudado, por meio de simulação computacional, o risco de desenvolvimento de câncer sólido sobre uma população devido à exposição ao Cs-137 e sua possível dependência com as condições climáticas ambientais representadas pelas classes de estabilidade atmosférica estudadas por Pasquill.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Aplicar uma metodologia de convergência sobre a avaliação de riscos de desenvolvimento de câncer sólido considerando a influência das condições climáticas em um cenário RDD.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) estimar o risco relativo (RR) de indução de câncer sólido, por exposição à radiação ionizante, em cenário RDD a partir dos dados de saída do software HotSpot e do modelo bioestatístico RERF, e
- b) utilizar as curvas de isodose geradas na simulação para cada classe de estabilidade de Pasquill-Gifford para geração de zonas de exclusão para a população potencialmente afetada.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. RADIAÇÃO

Radiação é a propagação de energia sob a forma de ondas eletromagnéticas ou de partículas subatômicas no espaço ou em um meio material, como o corpo humano (VALVERDE, 2010). Entende-se por processos radioativos os ajustes ocorridos no núcleo atômico ou em camadas eletrônicas, ou ainda as interações que demandem subprocessos de estabilização com emissão de energia (TAUHATA et al., 2014).

As radiações podem ser divididas em ionizantes e não ionizantes. Radiações ionizantes possuem energia suficiente para liberar elétrons dos orbitais de um átomo, resultando em elétrons livres de alta energia, íons positivos ou radicais livres quando ocorre quebra de ligações química. Radiações não ionizantes não produzem o efeito de ionização, contudo, podem provocar efeitos nocivos para o organismo (VALVERDE, 2010). Radiações não ionizantes são aquelas com frequências iguais ou abaixo daquelas dos raios ultravioleta ($\approx 10^{15}$ a 10^{16} Hz), enquanto que as radiações ionizantes possuem frequências mais elevadas. As radiações ionizantes podem ainda ser definidas como aquelas que apresentam energia superior a 10 eV, que é a energia mínima necessária para produzir ionização em materiais pela radiação ou em produtos secundários de sua interação. As radiações com energia superior a este mínimo são classificadas como radiações ionizantes. O limite superior é escolhido para limitar os tópicos dessa cobertura aos que são de principal interesse na ciência e tecnologia nuclear (KNOLL, 2010).

A partir dessa faixa e energia, experimentos mostram que a maior parte dos átomos ou moléculas simples (compostos elementares de hidrogênio, carbono, nitrogênio e oxigênio, abundantes em meio biológico) podem ter seus elétrons, de camadas mais externas, ejetados (BIRAL, 2002). A energia de ionização da molécula de água, principal constituinte biológico da vida na Terra é de, aproximadamente, 12,4 elétron-volt (eV) (TAUHATA et al., 2014). Na Figura 1 verifica-se esboço da distribuição de frequências de acordo com o tipo de radiação.

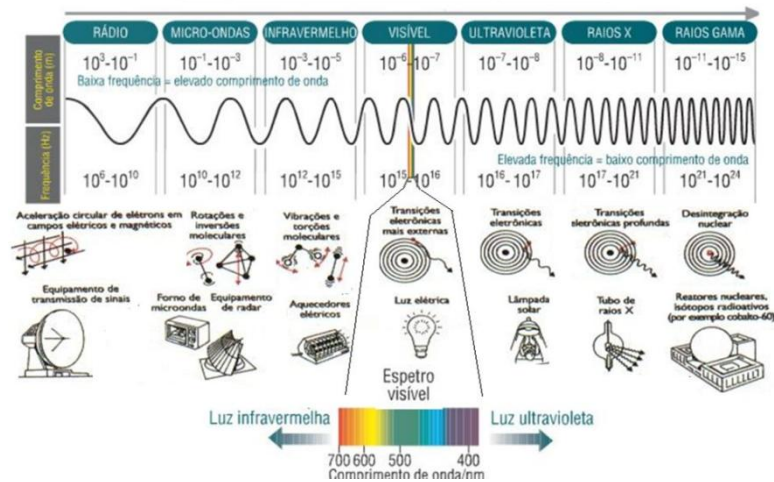


Figura 1 - Espectro eletromagnético da radiação (Fonte: Adaptado do site: <http://slideplayer.com.br/slide/10823194/>).

A radiação ionizante pode ser ainda subdividida em direta e indiretamente ionizante. Durante o processo em que a energia é transferida de uma radiação incidente para a matéria, as radiações que possuem carga elétrica, como no caso de elétrons, fragmentos de fissão e partículas alfa, têm sua atuação dada, principalmente, por seu campo elétrico, transferindo sua energia para diversos átomos do meio simultaneamente, sendo assim denominadas radiações diretamente ionizantes. As radiações que não apresentam carga elétrica associada (nêutrons e fótons) têm forma distinta de interação com a matéria e são denominadas radiações indiretamente ionizantes. Ao interagirem, transferindo energia para os elétrons do meio, provocam ionizações (TAUHATA et al., 2014). Tem-se na Figura 2 o esquema de uma categorização simplificada das radiações.

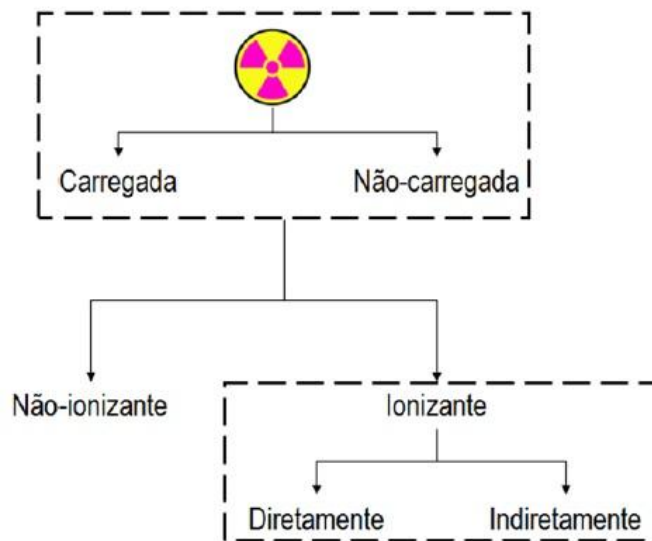


Figura 2 - Categorização simples das radiações (ANDRADE, 2010).

3.1.1. Considerações sobre as diferentes radiações ionizantes

As partículas alfa (α), por sua alta energia e capacidade de ionização, percorrem apenas pequenas distâncias no ar, não ultrapassando a camada externa da pele. Por terem carga e massa relativamente maior podem ser blindadas por uma simples folha de papel. Os emissores alfa têm radiotoxicidade quando penetram no organismo, mas não quando se constituem apenas em fontes externas ao corpo (VALVERDE, 2010).

As partículas beta (β) são elétrons emitidos a partir de um núcleo instável e possuem maior capacidade de penetração que as partículas alfa, apresentam nocividade externa e interna. Ao emitir uma partícula beta o núcleo tem a diminuição de um nêutron e o aumento de um próton, assim o número de massa permanece constante. Para blindá-las, necessita-se de material mais denso, como vidro ou alumínio (VALVERDE, 2010).

Os raios gama (γ) são fótons de alta energia, e que podem irradiar pessoas situadas a vários metros de distância. São emitidos pelo núcleo atômico com excesso de energia (no estado excitado) após transição de próton ou nêutron para nível de energia com valor menor, gerando uma estrutura mais estável. Os emissores gama têm também nocividade externa e interna (VALVERDE, 2010).

Os raios X são a radiação que resulta da desaceleração de elétrons em alta velocidade quando entram em choque com um alvo. Assim como os raios gama, os raios-X são extremamente penetrantes podem ser blindados por uma parede de concreto ou de metal (VALVERDE, 2010).

As fontes de nêutrons são muito penetrantes devido a sua grande massa e ausência de carga elétrica. Podem, inclusive, ser capturados por núcleos do material alvo, tornando-os radioativos (VALVERDE, 2010).

Encontra-se na Tabela 1 as características gerais de cada tipo radiação:

Tabela 1 - Radiações ionizantes e suas características (VALVERDE, 2010).

| Radiação e símbolo | Alcance no ar | Penetração tecidual | Nocividade |
|--------------------|--------------------|-----------------------|-------------------|
| Alfa (α) | Alguns centímetros | $60 \cdot 10^{-3}$ mm | Interna |
| Beta (β) | Até vários metros | Alguns mm | Externa e interna |
| Gama (γ) | Vários metros | Vários cm | Externa e interna |
| Raio X | Vários metros | Vários cm | Externa |
| Nêutrons (n) | Vários metros | Vários cm | Externa |

3.1.2. Efeitos biológicos da radiações ionizantes

Conjunto de danos nos tecidos ou órgãos provocados pela penetração e consequente absorção da radiação ionizante. Os efeitos radioinduzidos podem ser estocásticos, para os quais a probabilidade de ocorrência ou risco e não sua severidade, depende da dose recebida, sem limiar (cânceres e efeitos genéticos); e determinísticos, em que a severidade do dano aumenta com a dose, e para os quais é possível estimar uma dose limiar (deficiências hematológicas, cataratas, infertilidades) (TAUHATA et al., 2014).

3.2. ATIVIDADE

A atividade (A) de determinado material radioativo pode ser definida como o número de desintegrações nucleares por unidade de tempo, grandeza dada por $A = dN/dt$, onde dN é o valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia no intervalo de tempo dt (CNEN, 2014). A unidade no Sistema Internacional (SI) é denominada becquerel (Bq) que representa uma desintegração por segundo.

3.3. MEIA-VIDA E CONSTANTE DE DECAIMENTO

Entende-se por meia-vida ($T_{1/2}$) o tempo necessário para que a atividade de uma amostra caia à metade, em outras palavras, o período de tempo para que o número de átomos de uma amostra de um radionuclídeo reduza a metade. A constante de decaimento (λ) pode ser descrita como a probabilidade de decaimento por unidade de tempo (TAUHATA et al., 2014).

3.4. DOSE ABSORVIDA (D)

Energia média ($d\varepsilon$) depositada por unidade de matéria com massa (dm), ou seja, $D = d\varepsilon/dm$ (VALVERDE, 2010). A unidade no Sistema Internacional de Unidades (SIU) é o joule por quilograma (J/Kg), denominada gray (Gy).

3.5. DOSE EQUIVALENTE (H_T)

Grandeza expressa por $H_T = D_t W_r$, é o produto da dose absorvida (D) em determinado órgão ou tecido por um fator de ponderação (W_r) típico de cada tipo de radiação. De acordo com o SI, a unidade de medida para dose equivalente é o sievert (Sv). O fator de ponderação da radiação possui valores fixos para diferentes tipos de radiações (CNEN, 2014).

3.6. DOSE EFETIVA

Somatório das doses equivalentes ponderadas nos diversos órgãos e tecidos, $E = \sum_T H_T W_T$, onde H_T é a dose equivalente no tecido ou órgão e tecido e W_T é o fator ponderação de cada órgão ou tecido (CNEN, 2014). Sua unidade no SIU é o sievert (Sv).

3.7. DOSE TOTAL EFETIVA (*TOTAL EFFECTIVE DOSE EQUIVALENT* – TEDE)

A TEDE pode ser definida como a soma das doses efetivas (exposições externas) e a dose equivalente comprometida (exposições internas) (U.S. NRC, 2014).

3.8. DOSE COLETIVA

Representa o produto do número de indivíduos expostos pelo valor médio da distribuição de dose efetiva nesses indivíduos. A dose coletiva é expressa em pessoa x sievert (Sv). De acordo com a CNEN (CNEN, 2014), nas avaliações quantitativas de otimização, o valor do coeficiente monetário brasileiro por unidade de dose coletiva não deve ser inferior, em moeda nacional corrente, ao valor equivalente a US\$ 10.000,00 (dez mil dólares americanos) por unidade de dose coletiva por indivíduo, ou seja US\$ 10.000,00/pessoa.Sv.

3.9. ACIDENTES

Diversos acidentes nucleares e radiológicos já foram registrados após a descoberta da radioatividade. Tais acidentes podem levar a uma exposição significativa de radiação. No caso de um acidente provocado intencionalmente, existem três cenários básicos: (a) uma explosão nuclear que produz destruição em massa, radiação imediata e consequências dos produtos de fissão, (b) liberação de grandes quantidades de radiação gama e de nêutrons, bem como produtos de fissão mas o material não tem massa crítica o suficiente para criar uma explosão nuclear e (c) um dispositivo de dispersão radiológico (RDD) capaz de dispersar uma quantidade de material suficiente para causar danos a população exposta (MOORE Jr., 2004).

Em busca de melhoria da segurança nuclear foi criada pela *International Atomic Energy Agency* (IAEA) uma base de dados de incidentes e tráfico envolvendo materiais nucleares e/ou radioativos, o ITDB – *Incident and Trafficking Database*. Os incidentes vão desde a posse ilegal, tentativa de venda e contrabando para descarte não autorizado de material radioativo e descoberta de fontes radioativas perdidas, todos os materiais são analisados na tentativa de identificar tendências e/ou características para auxiliar na prevenção de uso indevido de material nuclear ou radioativo. Na sua maioria as fontes furtadas ou perdidas, foram fontes industriais ou medicinais e a maioria desses dispositivos usam isótopos de meia-vida longa tal como o Irídio-192, Césio-137 e Amerício-241 (IAEA, 2015).

Esses incidentes variam de categoria 1, potencialmente letal, para fontes de categoria 5 significativamente menos perigosas, de acordo com o documento RS-G-1.9 de categorização das fontes radioativas da IAEA. Deste documento foi verificado que o Cs-137, utilizado na irradiação de sangue, tem atividade entre 440 e 37 TBq, e categoria 1, em que se observa a relação $A/D \geq 1000$, onde A é a atividade da fonte e D o potencial desta causar efeitos determinísticos (IAEA, 2005).

A combinação de um material radioativo obtido ilicitamente com explosivos convencionais dão forma ao dispositivo de dispersão radiológica (RDD). Suas consequências dependem do material radioativo usado e, principalmente, da potência do explosivo empregado. Podem causar, em maior ou menor escala: (a) trauma convencional, exposição externa à radiação e contaminação radiológica interna/externa; (b) elevado número de pessoas potencialmente

afetadas; e (c) importantes impactos psicológicos e econômicos além de provável ruptura social (VALVERDE, 2010).

Pensando nesse tipo de evento é de significativo interesse estimar as consequências de um RDD para ações cujo objetivo seja gerenciar adequadamente operações de evacuação, abrigagem e descontaminação de área, assim como projetar expectativas futuras sobre as condições de saúde coletiva. Adicionalmente, há modelos que permitem a modelagem de consequências sobre o meio ambiente, cuja importância vem sendo crescentemente apontada por alguns autores nas últimas décadas, como os softwares ERICA e o RESRAD, que não serão tratados neste trabalho. O software ERICA desenvolvido por colaboradores, compreende três elementos: (a) avaliação: envolve estimar ou medir concentrações de atividade em meios ambientais e organismos; (b) caracterização do risco: estimativa da probabilidade e magnitude de efeitos adversos na biota, juntamente com identificação de incertezas, priorizar os riscos como base para novas ações; e (c) gestão: apoia o processo decisório ao longo de uma avaliação (BRONW, 2016). Já a família de softwares RESRAD desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory*, analisa possíveis exposições e contaminação ambiental por radiação, o programa avalia a exposição à radiação e os riscos associados, além de prover os critérios de limpeza ou limites oficialmente autorizados para as concentrações de radionuclídeos no meio ambiente contaminado (ZIAJAHROMI, 2014).

3.10. HOTSPOT

O laboratório americano *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) desenvolveu o programa HotSpot Health Physics Codes para prover uma ferramenta metodológica computacional rápida e portátil para avaliar incidentes envolvendo material radioativo (HOMANN, 2014). O programa HotSpot fornece uma estimativa dos efeitos da radiação associados à uma liberação atmosférica de materiais radioativos.

Os códigos do HotSpot que envolvem a dispersão de material radioativo utilizam o modelo gaussiano. O modelo de Gauss determina a concentração do dispersante em um determinado ponto do espaço a medida que este se desloca com os ventos na área impactada dependendo principalmente das condições climáticas (HOMANN, 2014).

Os valores de entrada no software são usados para modelar a distribuição atmosférica inicial da fonte do material radiológico após uma explosão, incêndio, ou ressuspensão. O HotSpot leva em consideração os seguintes parâmetros: (a) modelo de dispersão atmosférica; (b) condições meteorológicas (velocidade do vento, categoria de estabilidade, altura da camada de inversão); (c) detalhes da pluma radioativa (material radioativo), quantidade e natureza da pluma, velocidade de deposição, altitude de explosão (*Height of Burst: HOB*); (d) energia da explosão (rendimento); (e) tempo (tempo de amostragem e tempo de exposição); e (f) condições do alvo (densidade populacional).

A origem das coordenadas no HotSpot, está localizada no nível do solo, abaixo do ponto de liberação do radionuclídeo ($x = 0, y = 0, z = 0$). O eixo x é o eixo do vento e o eixo y é o eixo do vento transversal, perpendicular ao eixo do vento, sendo que os dois eixos estendem-se horizontalmente. O eixo z estende-se verticalmente a partir do solo. Uma pluma viaja ao longo, ou paralela ao eixo do vento. Na Figura 3 as coordenadas podem ser melhor visualizadas.

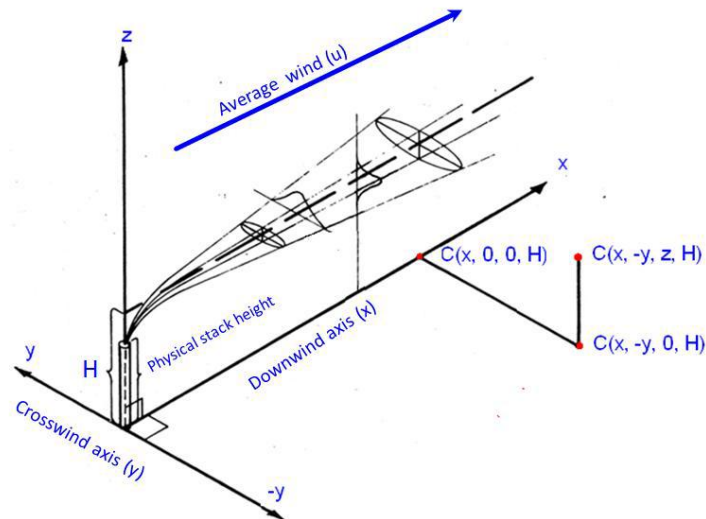


Figura 3 - Coordenadas utilizadas no código do software HotSpot (HOMANN, 2014).

3.10.1. Modelo Gaussiano

A equação do modelo gaussiano estima a concentração atmosférica integrada no tempo de um gás ou aerossol, em qualquer ponto do espaço, de acordo com a equação 1:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (1)$$

Se σ_z exceder a camada de inversão (L), a equação a ser utilizada, com os mesmos parâmetros passa a ser a equação 2:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (2)$$

onde C = concentração atmosférica integrada no tempo (Ci.s)/m³, Q = atividade da fonte (Ci), H = altura efetiva de liberação (m), λ = constante de decaimento radioativo (s⁻¹), x = distância na direção do vento (m), y = distância na direção perpendicular ao vento (m), z = distância no eixo vertical (m), σ_y = desvio-padrão da distribuição da concentração integrada na direção horizontal (m), σ_z = desvio-padrão da distribuição da concentração integrada na direção vertical (m), u = média da velocidade do vento na altura efetiva de liberação (m/s), L = altura da camada de inversão (m), DF(x) = fator de depleção da pluma.

A transição das duas equações acima se inicia quando σ_z é 70% de L e termina quando σ_z é igual a L. Neste intervalo os valores são interpolados linearmente, evitando variações abruptas em pequenos intervalos (HOMANN, 2014).

3.10.2. Dose na passagem da pluma

No programa HotSpot se admite que o indivíduo permanece na mesma localização (dentro da região delimitada pelos eixos x, y e z) ao longo da passagem da pluma e a duração padrão de liberação da pluma radioativa é de 10 minutos (HOMANN, 2014).

3.10.3. Classificação da Estabilidade Atmosférica

Os estados gerais da camada superficial atmosférica quanto à sua comparação com o deslocamento das camadas de ar no sentido vertical foram classificadas por Pasquill (instável, neutra e estável) (PASQUILL, 1961).

O programa HotSpot leva em consideração a velocidade do vento e a estabilidade atmosférica local. A estabilidade atmosférica depende da diferença de temperatura entre um pacote de ar e o ar circundante (DI GIOVANNI, 2014), em outras palavras depende de como uma parcela de ar se desloca adiabaticamente na direção vertical (HOMANN, 2014). A estabilidade atmosférica é classificada por Pasquill (PASQUILL, 1961) em 6 classes de estabilidade de A até F, de acordo com as condições climáticas, velocidade do vento e hora do dia, dependendo da classe de estabilidade escolhida os efeitos podem ser maximizados. Gifford sugeriu valores modificados de σ_y e σ_z para uso com as categorias originais de estabilidade de Pasquill (GIFFORD, 1976), dando origem a notação de classes de estabilidade Pasquill-Gifford.

O desvio-padrão da propagação em x (propagação da pluma a medida que x aumenta) está relacionado com as categorias de estabilidade atmosférica de Pasquill, é definido como segue (notação Pasquill-Gifford): (a) A: Extremamente instável ($\sigma_\theta = 25^\circ$), (b) B: Moderadamente instável ($\sigma_\theta = 20^\circ$), (c) C: Ligeiramente instável ($\sigma_\theta = 15^\circ$), (d) D: Neutro ($\sigma_\theta = 10^\circ$), (e) E: Ligeiramente estável ($\sigma_\theta = 5^\circ$), e (f) F: moderadamente estável ($\sigma_\theta = 2,5^\circ$), onde σ_θ é o desvio padrão da inclinação do vento (em radianos). Este sistema de classificação de estabilidade atmosférica é recomendado pela *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) (HOMANN, 2014).

O HotSpot seleciona automaticamente a classe de estabilidade atmosférica em função das entradas de velocidade do vento e quantidade de insolação a 2 m de altura. Esta classificação pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições meteorológicas para definir a classificação da estabilidade atmosférica de categorias de A a F utilizadas no HotSpot (HOMANN, 2014).

| Velocidade do vento (m/s) | Alta insolação | Baixa insolação | Noturno |
|---------------------------|----------------|-----------------|---------|
| < 2 | A | B | F |
| 2 – 3 | A | C | E |
| 3 – 4 | B | C | D |
| 4 – 6 | C | D | D |
| > 6 | C | D | D |

Para uma liberação elevada, o local de concentração máxima depende da classe de estabilidade escolhida. Para materiais com velocidade de deposição zero e ponto de liberação no nível do solo ou muito próximo, a concentração máxima estará associada a classe de estabilidade mais estável, F. No entanto, se a velocidade de deposição for diferente de zero, o pior caso para grandes distâncias a favor do vento não estará necessariamente associada à classe de estabilidade F, devido aos efeitos da depleção da pluma, ou seja, a concentração da pluma diminui a uma velocidade mais rápida com o aumento da classe de estabilidade (A-F) e o aumento da velocidade de deposição. Por exemplo, em um local específico, a classe de estabilidade E pode resultar em uma concentração local mais alta do que a classe F devido à menor depleção de pluma associada à estabilidade E (HOMANN, 2014).

3.10.4. Determinando σ_y e σ_z

Uma vez determinada a classe de estabilidade atmosférica, o HotSpot usa as equações apresentadas nas Tabelas 3 e 4 para estimar o desvio-padrão de y e z para dois tipos de terreno: (a) padrão e (b) cidade. O fator de terreno urbano aumenta a dispersão de plumas em estruturas com características de retenção de calor de superfícies, como asfalto e concreto, apresentando concentrações mais baixas do que o fator padrão, devido ao aumento da dispersão em grandes estruturas e materiais urbanos (HOMANN, 2014).

O modelo mais utilizado para estimar σ_y e σ_z foi desenvolvido por Pasquill e o que melhor se adapta às situações abordadas pelo HotSpot é o modelo de *Briggs*. Briggs combinou as curvas de Pasquill com curvas derivadas dos dados observados no *National Laboratory e Tennessee Valley Authority*, incorporando conceitos teóricos sobre os limites assintóticos das fórmulas para produzir um conjunto amplamente utilizado de equações para σ_y e σ_z . Este modelo para o cálculo do coeficiente de dispersão vertical em função da distância x , considera um valor diferente para cada classe de estabilidade atmosférica e possibilita o cálculo para áreas urbanas ou padrão (Tabelas 3 e 4) (HOMANN, 2014).

Tabela 3 - Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno padrão (HOMANN, 2014).

| Classes de Estabilidade | σ_y (m) | σ_z (m) |
|-------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|
| A | $\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $0,20x$ |
| B | $\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $0,12x$ |
| C | $\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $\frac{0,080x}{\sqrt{1 + 0,0002x}}$ |
| D | $\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $\frac{0,060x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$ |
| E | $\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $\frac{0,030x}{1 + 0,0003x}$ |
| F | $\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$ | $\frac{0,016x}{1 + 0,0003x}$ |

Tabela 4 - Coeficientes de difusão σ_y e σ_z para terreno urbano (HOMANN, 2014).

| Classes de Estabilidade | σ_y (m) | σ_z (m) |
|-------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| A e B | $\frac{0,32x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$ | $0,24x\sqrt{1 + 0,001x}$ |
| C | $\frac{0,22x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$ | $0,20x$ |
| D | $\frac{0,16x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$ | $\frac{0,14x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$ |
| E e F | $\frac{0,11x}{\sqrt{1 + 0,0004x}}$ | $\frac{0,08x}{\sqrt{1 + 0,0015x}}$ |

Buscando um estudo conservativo, onde são consideradas as condições mais graves, foi utilizada na simulação a aproximação para o terreno padrão, nas Figuras 4 e 5 pode-se verificar representações gráficas para o modelo de Briggs (HOMANN, 2014):

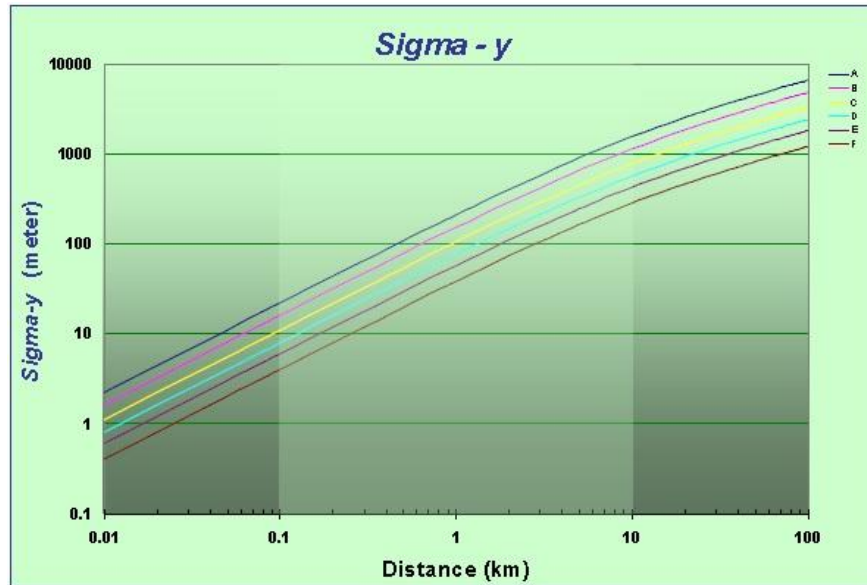


Figura 4 - Representação gráfica das equações para σ_y em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014).

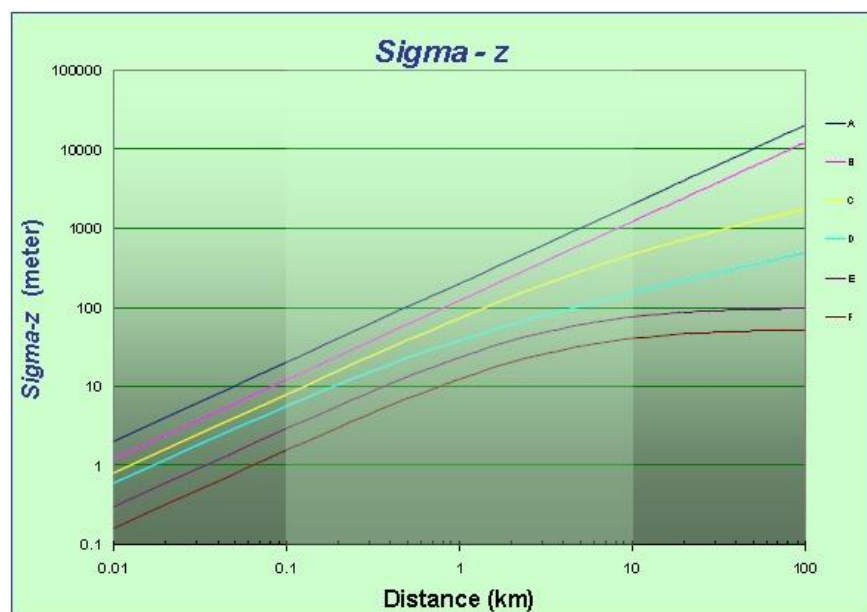


Figura 5 - Representação Gráfica das equações para σ_z em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F para o tipo de terreno padrão (HOMANN, 2014).

3.10.5. Tempo de amostragem

As equações para o desvio padrão da distribuição gaussiana na direção do vento são representativas da observação da pluma ao longo de um período de tempo de 10 minutos. Esse tempo médio é definido como tempo de amostragem da simulação. As concentrações a favor do vento de uma fonte diminuem com o aumento do tempo de amostragem,

principalmente por causa do aumento de σ_y na direção do vento. Para explosões ele é fixado em 10 minutos não podendo ser alterado. No HotSpot, a equação 3 se ajusta para tempos de amostragem diferentes de 10 minutos (HANNA, et al., 1982; GIFFORD, 1982).

$$\sigma'_y = \sigma_y \left[\frac{t}{10} \right]^{0,2} \quad (3)$$

onde σ'_y é o desvio padrão da concentração com o tempo de amostragem de t minutos e σ_y o desvio no tempo de 10 minutos.

As Figuras 7 e 8 reproduzem o efeito do tempo de amostragem na concentração da pluma. Na Figura 7 o tempo de amostragem foi de 1/50 segundo e a pluma mostra uma concentração instantânea. O tempo de amostragem da Figura 8 foi de 5 minutos, resultando numa nuvem suavizada com a concentração média da linha central reduzida devido à média de todos os valores instantâneos durante os 5 minutos do tempo de amostragem (HOMANN, 2014).



Figura 6 - Pluma com o tempo de amostragem de 1/50 s (HOMANN, 2014).



Figura 7 - Pluma com o tempo de amostragem de 5 minutos (HOMANN, 2014).

3.10.6. Altura efetiva de liberação

A altura real da pluma pode não ser a altura física da liberação do material disperso. A elevação da pluma pode ocorrer por causa da velocidade de emissão do material dispersante e da diferença de temperatura entre a pluma e o ar que a circula, que gera uma corrente de convecção, além da classe de estabilidade. O aumento da pluma resulta em um aumento da altura de liberação, resultando em menores concentrações no solo. Caso não seja possível determinar a altura de liberação efetiva pode-se utilizar a altura física de liberação ou zero para a liberação do nível do solo, isso produzirá uma estimativa conservadora, ou seja, maiores doses para os indivíduos que serão expostos (HOMANN, 2014).

3.10.7. Variação da velocidade do vento com a altura

O modelo gaussiano de dispersão da pluma requer a velocidade do vento na altura H , a altura de liberação efetiva. A velocidade do vento normalmente é referenciado a uma altura de 10 m, o *software* utiliza uma modelagem matemática para ajustar a velocidade do vento na altura de liberação real. A equação de ajuste é expressa matematicamente por (HOMANN, 2014).

$$u(H) = u(z) \left(\frac{H}{z} \right)^p \quad (4)$$

onde $u(z)$ é a velocidade do vento (m/s) na altura de referência z (m), H é a altura efetiva de liberação (m), $u(H)$ é a velocidade do vento na altura H e p é o fator de ajuste conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 5 - Fator exponencial p usado pelo software HotSpot para cálculo da velocidade do vento em função da altura (HOMANN, 2014).

| Classe de Estabilidade | A | B | C | D | E | F |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| Fator Exponencial p (terreno padrão) | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,15 | 0,35 | 0,55 |
| Fator Exponencial p (terreno urbano) | 0,15 | 0,15 | 0,20 | 0,25 | 0,40 | 0,60 |

3.10.8. Depleção da pluma - Deposição seca

Gases, vapores e particulados são depositados na superfície por conta da difusão e podem permanecer no solo por tempo indeterminado. Esse processo é chamado de deposição seca, sendo a velocidade efetiva de deposição é calculada pela razão do fluxo de deposição [$\mu\text{Ci}/(\text{cm}^2.\text{s})$] e a concentração no ar próximo a superfície [$\mu\text{Ci}/\text{cm}^3$]. A pluma se esgota quando esse material é depositado no solo. O software HotSpot corrige esta perda de material depositado como forma seca (HOMANN, 2014).

Para a maioria dos materiais, pode-se assumir uma velocidade de deposição seca em torno de 0,3 cm/s e o fluxo de deposição seca na superfície pode ser considerado igual à velocidade de deposição seca vezes a concentração (HANNA e BRITTER, 2002). No programa são utilizadas duas metodologias de velocidade de deposição: uma velocidade de deposição para partículas respiráveis (com menos de 10 μm de diâmetro aerodinâmico) e para partículas não respiráveis (com mais de 10 μm de diâmetro aerodinâmico). Os valores de *default* para essas velocidades são: (a) respirável = 0,3 cm/s e (b) não respirável = 8 cm/s.

Para um estudo mais conservativo, o valores da velocidade de deposição podem ser considerados zero, ou seja, a pluma não sofrerá depleção e a concentração do material disperso permanecerá constante ao longo da trajetória.

Os componentes respiráveis e não respiráveis são definidos como (HOMANN, 2014):

1. Material em Risco (MAR),: quantidade total do radionuclídeo envolvido na liberação;
2. Razão de dano (DR), fração do MAR que impactará o cenário;
3. Fração de Ar (ARF), fração do material em aerossol e libertado para a atmosfera;
4. Fração respirável (RF), fração de material na forma de aerossol respirável (diâmetro aerodinâmico (AD) = 1 microm);
5. Fração liberada Respirável, fração do MAR que é disperso na atmosfera com uma diâmetro aerodinâmico de 1 microm;
6. Fator de "Leakpath" (LPF), fração do MAR (modificado por DR), que passa por um mecanismo de filtração. Para cenários de liberação livre, o Fator "Leakpath" é 1;
7. Fração liberada Não-Respirável, fração de material que é dispersa na atmosfera com diâmetro aerodinâmico maior que 10µ. É expresso por, ARF.(1-RF).

Os termos finais dos componentes respiráveis e não respiráveis podem ser expressos da seguinte forma como mostra a Tabela 7.

Tabela 6 - Componentes respiráveis e não respiráveis (HOMANN, 2014).

| | |
|----------------|--|
| Respirável | $(AD < 10\mu m) = MAR \times DF \times ARF \times RF$ |
| Não Respirável | $(10\mu m < AD < 100\mu m) = MAR \times DF \times LPF \times ARF (1 - RF)$ |

Como já mencionado, a quantidade de material sofre depleção com o aumento da distância. Esta depleção de pluma é realizada pela multiplicação do termo original por um fator fonte-depleção [DF (x)]. A avaliação deste fator de depleção foi descrita por Van der Hoven (VAN DER HOVEN, 1968).

$$DF(x) = \left[\exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_z \exp \left[\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} dx \right]^{-\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (5)$$

onde $DF(x)$ = Fator de depleção, (adimensional), x = distância na direção do vento (m), v = velocidade de deposição (cm/s), u = velocidade média do vento (m/s), H = altura de liberação, $\sigma_z(x)$ = desvio padrão da concentração da distribuição na direção vertical (eixo z).

3.10.9. Depleção da pluma - Deposição úmida

A deposição úmida pode ser dividida em duas partes, uma dentro da nuvem e outra logo abaixo, porém no HotSpot os dois tipos de deposição são inseridas em um único processo. Neste *software*, os efeitos da precipitação serão modelados da seguinte forma:

$$C'(x, y, z) = C(x, y, z)e^{-\Lambda x/u} \quad (6)$$

onde C' é a concentração em Ci/m^3 , Λ é o coeficiente de lavagem em s^{-1} , e u é a velocidade média do vento em m/s .

Alguns valores típicos do coeficiente de lavagem são apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 - Valores típicos do coeficiente em função da taxa de precipitação (HOMANN, 2014).

| Taxa de precipitação (mm/h) | Coeficiente de lavagem ($10^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$) |
|-----------------------------|--|
| 0,05 | 1,0 |
| 1 | 2,0 |
| 5 | 6,0 |
| 10 | 10,0 |
| 15 | 13,0 |
| 20 | 17,0 |
| 25 | 20,0 |

3.10.10. Depleção da pluma - Deposição no solo

O material radioativo que é depositado no solo deverá contribuir significativamente para a exposição da população, principalmente pela via de exposição externa à radiação ionizante. Os fatores de correção de dose do programa considera o solo perfeitamente liso. Há dois algoritmos implementados pelo *software* para a correção da degradação do solo ao longo do tempo.

a) Modelo WASH 1400:

$$WCF = GRF[0,63e^{-(1,13t)} + 0,37e^{-(0,0078t)}] \quad (7)$$

onde t é o tempo em anos após a situação de contaminação, e GRF é o fator de correção de rugosidade do solo, em que o *default* é 0,7 (WASH-1400, 1975).

b) Modelo Likhtarev:

$$WCF = GRF[0,4e^{-(0,46t)} + 0,6e^{-(0,014t)}] \quad (8)$$

onde t é o tempo em anos após a situação de contaminação, e GRF é o fator de correção de rugosidade do solo, em que o *default* é 0,7, sendo adimensional (LIKHTAREV, 2002).

3.10.11. Ressuspensão

O fator de ressuspensão é a razão da concentração do material no ar em função da concentração no solo, apresentando, portanto, dimensão [m^{-1}]. No HotSpot é determinado usando medidas da contaminação da contaminação do solo (Ci/m^2) e da concentração de ar do radionuclídeo (Ci/m^3) acima do local de medição do solo (HOMANN, 2014). O valor do fator de ressuspensão, RF , é determinado na altura de 2 m do solo (em uma velocidade média de 2 m/s). Caso a velocidade do vento seja acima de 3 m/s, tal fator é ajustado por:

$$RF(u) = RF * (u/3)^2 \quad (9)$$

onde RF é o fator de ajuste e u é a velocidade do vento.

3.10.12. Fatores de conversão de dose

O programa usa as metodologias de dosimetria de radiação recomendadas pela *International Commission on Radiological Protection (ICRP)*, para conversão da dose a que serão expostos os indivíduos que permanecerem no mesmo local, na direção do vento, que pode ser determinado em função do tempo de liberação do material radioativo. O código HotSpot 3.0.3 calcula a TEDE por meio da soma das vias de exposição: (a) inalação, (b) submersão, (c)

ressuspensão e (d) deposição, utilizando valores de coeficientes de dose a partir dos documentos *Federal Guidance Report* (FGR) 11, 12 e 13, onde: FGR-11 (1988) fornece os valores limites da ingestão de radionuclídeos e concentração de ar e fatores de conversão de dose para inalação, submersão e ingestão e baseia-se nos modelos dosimétricos da ICRP-30 (1981); o FGR-12 (1993) fornece coeficientes de dose para a exposição externa a radionuclídeos em ar, água ou solo e o FGR-13 (1999) fornece coeficientes de dose usando a ICRP-66 (1994) e metodologias da ICRP 60/70 (1991) (HOMANN, 2014). Já foram publicadas versões mais atuais dos documentos ICRP e FGR, no entanto o programa ainda não forneceu as atualizações. Como arquivos de saída, o HotSpot 3.0.3 fornece resultados na forma de tabelas e plumas de isodoses.

3.11. MODELO DE DESENVOLVIMENTO DE CÂNCER SÓLIDO

O modelo bioestatístico *Radiation Effects Research Foundation* (RERF) utiliza um modelo de equações linear-quadráticas para estimar o Risco Relativo e foi desenvolvido a partir de estudos sobre efeitos biológicos das radiações conduzidos desde os bombardeios nucleares no Japão na década de 1940, pela *Life Span Study* (LSS) (IAEA, 1996).

O RERF fornece uma estimativa dos riscos de efeitos genéticos e somáticos em seres humanos expostos a um baixo nível de radiação ionizante, estimando o risco de indução de câncer para órgãos específicos em relação a dose e ao tempo de exposição, comparando os efeitos de radiação entre as populações japonesas e ocidentais (IAEA, 1996).

Em estudos epidemiológicos geralmente é utilizado o termo Risco Relativo (RR), definido como a relação entre o risco de desenvolvimento da doença na população exposta e o risco da doença entre os não expostos (IAEA, 1996).

O aumento de risco de indução de câncer é o efeito de maior preocupação diante da exposição à radiação estudado em sobreviventes da bomba atômica. Para outros tipos de cânceres exceto leucemia (cânceres sólidos), foi observado um período de latência médio de cerca de 10 anos após a exposição (IAEA, 1996).

O conjunto de dados dos sobreviventes da bomba atômica japonesa fornece evidências claras de diferenças nos subgrupos idade em exposição e sexo para o risco relativo de câncer sólido,

os riscos relativos foram maiores para os indivíduos do sexo feminino quando comparados com os indivíduos do sexo masculino e para indivíduos expostos mais cedo na vida do que mais tarde (THOMPSON, 1994). Para tumores sólidos, o excesso de risco relativo para mulheres é geralmente duas vezes maior do que para homens (SHIMIZU, 1990).

Em geral, a exposição à radiação aguda em qualquer idade aumenta o risco de desenvolvimento de câncer no indivíduo de forma definitiva. No entanto a exposição à radiação não pode ser indicada como o único meio de aumentar as chances de desenvolvimento de câncer. O indivíduo pode possuir hábitos que o exponha a outras fontes de risco. O tabagismo por exemplo, que perdurando durante sua vida, pode levar ao desenvolvimento de câncer. Por este motivo, a probabilidade de causa de desenvolvimento de câncer por radiação pode ser calculada, porém apresenta incertezas que estão associadas com vários fatores de risco paralelos (IAEA, 1996).

4. METODOLOGIA

A Figura 9 apresenta de forma resumida a metodologia proposta para a estimativa de risco de desenvolvimento de câncer radioinduzido por exposição ambiental ao Cs-137 pelo acionamento de um RDD.

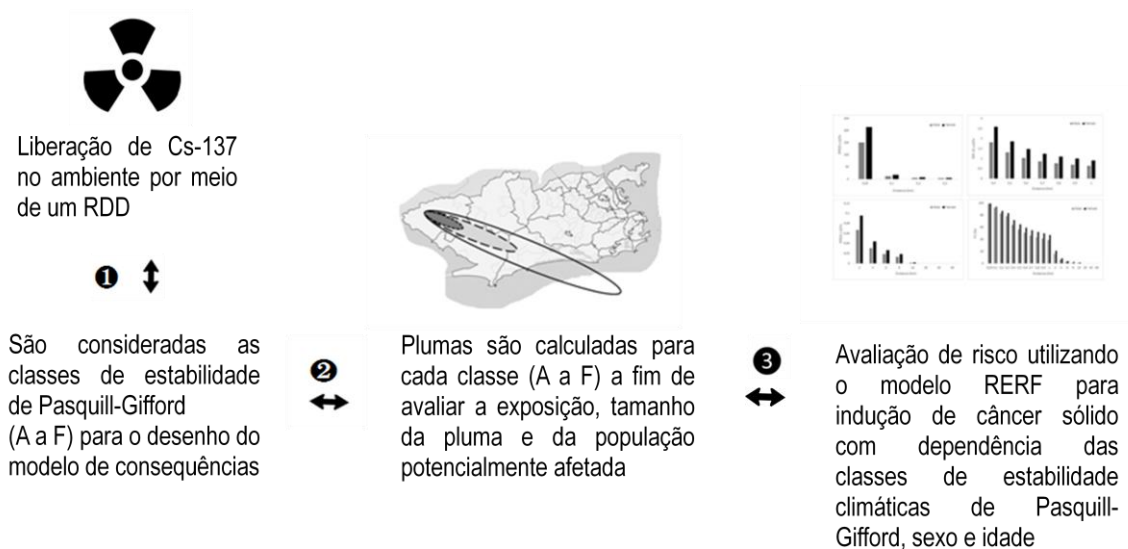


Figura 8 - Visão geral da metodologia aplicada ao estudo.

Para a simulação do cenário radiológico utilizou-se o software *HotSpot Health Physics Codes* (HOMANN, 2014) que estima as doses recebidas por indivíduos expostos e a contaminação ambiental no local do evento por deposição no solo. O código do HotSpot utiliza o modelo gaussiano para simular a dispersão do material radiológico na atmosfera. De forma conservativa avalia a contaminação de uma área e estima a Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE), que corresponde à dose absorvida combinada considerando todas as vias de exposição (externa e interna).

A escolha do Cs-137 para a simulação justifica-se pelo fato de possuir alta mobilidade ambiental, encontrado na forma de pó, é solúvel em água e sua absorção pelos fluidos corporais é realizada rapidamente por todo o corpo, o que pode ser um problema metabólico grave (NCRP, 1977). O isótopo radioativo tem meia-vida física de 30,17 anos, emite partículas beta durante seu decaimento formando o bário metaestável (Ba-137m), o qual, por sua vez emite radiação gama com energias de aproximadamente 662 keV (CARVALHO, 1989). As características da fonte de césio utilizada na simulação foram escolhidas de acordo

com o documento RS-G-1.9 sobre categorização das fontes radioativas (IAEA, 2005). Utilizou-se os dados de um fonte de irradiação de sangue e tecido com uma atividade de 444 TBq (atividade máxima de uma fonte desse tipo), classificada como uma fonte de categoria 1.

O modelo de dispersão gaussiano é utilizado e verificado pela comunidade científica sendo aceito pela *Environmental Protection Agency* (EPA) (HOMANN, 2014). Os dados de saída do HotSpot possibilitam uma resposta rápida auxiliando no processo de tomada de decisão, para intervenção em situações de emergência, levando em consideração os limites de dose para abrigagem e evacuação e o limite de dose de exposição para o público em geral. Uma ação de abrigagem é recomendada caso a dose efetiva a ser recebida pela população seja superior a 10 mSv num período máximo de 2 dias e uma ação de evacuação é recomendada num período máximo de 1 semana caso a dose recebida for superior a 50 mSv. Considera-se o limite de dose efetiva anual para os membros do público em geral como 1 mSv (ICRP 60, 1991), para práticas ou situações planejadas.

Os valores de dose fornecidos pela simulação implementada no HotSpot foram utilizados como dados de entrada para a equação de avaliação do risco de desenvolvimento radioinduzido de câncer sólido pelo modelo bioestatístico RERF, para estimar a probabilidade de indução de câncer devido à exposição à radiação (IAEA, 1996). Esta avaliação incorpora os fatores geralmente aceitos como responsáveis pela indução de câncer e examina o papel da radiação como um fator carcinogênico (IAEA, 1996).

4.1. CENÁRIO DE EXPOSIÇÃO

Os parâmetros utilizados pelo software HotSpot são todos definidos pelo usuário, sendo escolhido para este trabalho um conjunto de parâmetros que busca a melhor condição para comparação com a realidade de um ataque usando um RDD. Os principais parâmetros utilizados no HotSpot como dados de entrada para o cenário RDD estão listados a seguir:

- Material: ^{137}Cs , meia vida 30,0 anos;
- Atividade: 4,44E+14 Bq (atividade máxima de uma fonte de irradiação de sangue e tecidos);
- Velocidade do vento (h = 10 m): 5,0 m / s;
- Coordenadas de distância: Todas as distâncias são na linha central da pluma;
- Carga explosiva: 5,5 libras equivalente a 2,5 quilogramas de TNT, este é possível devido à pequena quantidade de explosivo de obtenção relativamente fácil;
- Classe de estabilidade (terreno padrão): Todas as classes de estabilidade classificadas por Pasquill-Gifford;
- Velocidade Deposição respirável: 0,30 cm/s;
- Altura do receptor: 1,50 m;
- Altura da camada de inversão: Nenhum;
- Tempo da amostra: 10 min;
- Taxa de respiração: 3,33 E-04 m^3/s ;
- Contorno da isodose interior: 50 mSv;
- Contorno da isodose mediana: 10 mSv;
- Contorno da isodose exterior: 1 mSv;
- FGR-11 Dados de Conversão Dose - Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE);
- Tempo de exposição: (Início: 0,00 horas; Duração: 24,00 horas).

As condições de contorno foram escolhidas com base na Posição Regulatória 3.01/006:2011, que refere-se aos requisitos da Norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, e sua aplicação à intervenção em situações de emergência (CNEN, 2011).

- 50 mSv Nível de ação para evacuação da população em situações de emergência;
- 10 mSv Nível de ação para abrigagem da população em situações de emergência;
- 1 mSv Limite anual para público em situação em operação normal.

Deste modo, foi possível extrair dos resultados gerados pelo código, três linhas de contorno para as áreas de controle operacional chamadas de curvas de isodose, onde todos os pontos da curva têm o mesmo valor de dose. A cada uma das três curvas de isodose é atribuído um limite de dose de acordo com os níveis de ação estabelecidos na Norma CNEN-NN-3.01. Para evacuação usa-se o valor de 50 mSv para curva de isodose interna, para abrigagem usa-se o

valor de 10 mSv para curva de isodose média e para isodose externa usa-se o valor de 1 mSv, que é o limite anual que um indivíduo do público pode ser exposto anualmente.

As áreas de controle operacional permitem conhecer a população submetida às doses predefinidas nas condições de contorno multiplicando-se o valor das áreas delimitadas pela densidade demográfica média da população do município do Rio de Janeiro. Tomando-se por base o Censo Demográfico de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, verifica-se a menor densidade de 9.794 habitantes/km² na zona sul e a maior 10.185 habitantes/km² na zona norte (Disponível em <http://censo2010.ibge.gov.br/>).

Nos resultados das simulações, além das três plumas geradas pelo programa, é fornecida a dose equivalente efetiva total (TEDE) em função da distância da explosão da bomba. Na configuração do cenário são distribuídos vinte receptores a 1,5 m de altura resultando em 20 pontos no intervalo de 0,03 a 80 km de distância da explosão do RDD. As TEDE foram usadas como entradas nas equações do RERF a fim de se determinar o risco relativo para indução de câncer sólido, bem como a probabilidade de causalidade desta.

4.2. RISCO RELATIVO PARA CÂNCER SÓLIDO

Os valores de doses fornecidos pela simulação implementada no HotSpot foram utilizados como dados de entrada para a equação 10 de indução de câncer sólido do modelo bioestatístico RERF, para estimar a probabilidade de câncer devido à exposição à radiação (IAEA, 1996). Esta avaliação incorpora os fatores geralmente aceitos como responsáveis pela morbidade e examina o papel da radiação como um agente carcinogênico (IAEA, 1996). O termo risco relativo (RR) é utilizado de várias maneiras em estudos epidemiológicos, em geral, RR é a proporção do risco de doença ou morte entre os expostos de uma população e os não expostos. O cálculo do RR leva em consideração apenas os fatores idade, sexo e tempo de exposição, ignorando outros fatores de indução de câncer (IAEA,1996).

Para tumores sólidos o modelo de risco relativo, em cada local de tumor sólido, é da seguinte forma:

$$RR = r_0(a, s)[1 + \alpha_s D \exp(\beta(e - 25))], \quad (10)$$

onde $r_0(a, s)$, é a taxa de incidência de câncer, na ausência de irradiação, isto é, a taxa de incidência de câncer na linha de base, α_S é o excesso de risco relativo linear em relação a idade específica por Sv, sendo igual a 0,45 para o sexo masculino e 0,77 para o sexo feminino; D é a dose efetiva equivalente total, e é a idade do indivíduo na exposição em anos e o símbolo β representa o coeficiente determinante na modificação do efeito da idade durante a exposição sendo igual a -0,026 para ambos os sexos.

O Instituto Nacional do Câncer José Alencar Gomes da Silva (INCA)/ Ministério da Saúde (MS) fornece a estimativa da taxa de incidência de câncer todos os anos para cada tipo de câncer, ajustadas por idade tanto para homens quanto para mulheres (nº de casos/100 mil habitantes), para apoiar à implementação das ações de prevenção e controle de câncer. Por tratar-se de um fator multiplicativo optou-se pelo valor numérico 1 para o cálculo do Risco Relativo, uma vez que o valor da taxa de incidência seria a mesmo para ambos os sexos e todas as idades e não alteraria os objetivos do presente trabalho. Os números de casos de incidência de câncer são encontrados no site do INCA: <http://www1.inca.gov.br/vigilancia/>.

4.3. PROBABILIDADE DE CAUSA

A radiação é um agente causal conhecido mas não é o único responsável pela maioria dos cânceres observados na maioria da população. Como não é possível saber a origem de um câncer, existe a necessidade de entender as limitações dos métodos utilizados para calcular a probabilidade de qualquer câncer em um indivíduo tenha sido induzido pela exposição a radiações ionizantes é essencial. Para distinguir se o câncer é induzido por radiação ou induzido por outros agentes foi elaborado o conceito de probabilidade de causalidade (PC) pelo *National Institute of Health* (NIH), definido como a fração de risco do desenvolvimento de um determinado câncer atribuível a uma exposição prévia e assume a definição matemática dada pelo TECDOC-870 (IAEA, 1996):

$$PC = \left(\frac{RR}{RR + 1} \right) \times 100\% \quad (11)$$

em que PC é a probabilidade de causa e RR é o risco relativo.

5. RESULTADOS

O cenário RDD foi simulado para todas as classes de estabilidade atmosférica (A até F), resultando em plumas com diferentes áreas e diferentes concentrações radioativas. Cada evento resulta numa pluma com três curvas de isodoses estabelecidas a partir dos critérios de segurança recomendados pela ICRP (ICRP 60, 1991 e CNEN, 2014). Um dos resultados do HotSpot são os danos causados apenas pela explosão, calculados a partir de dados fornecidos pela *International Association of Bomb Technicians and Investigators* (IABTI), onde é fornecido os detrimientos causados pela explosão em função da distância até uma distância segura. A distância escolhida para análise do cenário com diferentes estabilidades foi a distância de 500 m da explosão, sendo aproximadamente o dobro da distância segura contra efeitos mecânicos da explosão, segundo a IABTI e calculados na simulação pelo HotSpot. Esta distância foi escolhida de forma arbitrária. Entretanto, sendo maior que a mínima distância de segurança calculada pelo HotSpot. Como o interesse do trabalho é estudar o potencial detrimento proveniente da exposição a radiação, como parâmetro de comparação entre as classes de estabilidade foi utilizado o dobro da distância de segurança para se ter maior chance de que os indivíduos seriam expostos apenas a radiação, para fins de estudos dos efeitos biológicos.

Com os resultados das simulações, três curvas de isodose em função da distância da explosão são determinadas para os valores: (a) 50 mSv, (b) 10 mSv e (c) 1 mSv, para todas as classes de estabilidade atmosférica. As curvas de contorno auxiliam imediatamente nos níveis de ações e intervenção, evacuação e abrigagem, segundo a Norma CNEN-NN-3.01 “Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica”, contribuindo no processo de tomada de decisão. Por isso foram escolhidos os valores de 50 mSv e 10 mSv para as isodoses interna e média e para isodose externa 1 mSv que é o valor do limite anual para público em situação de operação normal. A escolha das condições de contorno dentro dos limites estabelecidos pela norma para tais ações na simulação ajudam a prever as consequências de uma possível liberação de materiais radioativos, auxiliando no processo de tomada de decisão, quanto mais rápido as ações forem tomadas mais fácil minimizar as consequências do cenário de liberação.

As diferentes áreas entre as classes têm a ver com as diferentes condições meteorológicas que ocorrem em cada cenário. As plumas de cada classe de estabilidade tem tamanhos distintos, ou seja, suas áreas aumentam ou diminuem quando as condições atmosféricas mudam,

afetando números diferentes de indivíduos por km². Apesar das áreas das curvas de isodose interna de cada pluma serem menores que as áreas das curvas de isodose média e externa, deve-se levar em consideração que a dose recebida pelos indivíduos expostos na menor área é muito maior, causando maiores detrimientos na população potencialmente exposta.

Considera-se 1 mSv/ano o limite de dose de exposição do público em geral e 10 mSv e 50 mSv, os limites para abrigagem e evacuação, respectivamente (ICRP 60, 1991 e CNEN, 2014). Analisando os resultados das simulações para todas as classes de estabilidade atmosférica, foi possível observar a área das plumas onde seriam necessárias tais ações. O software HotSpot também calcula estimativas da TEDE em função da distância da explosão para diferentes classes de estabilidade.

A Figura 10 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade A.

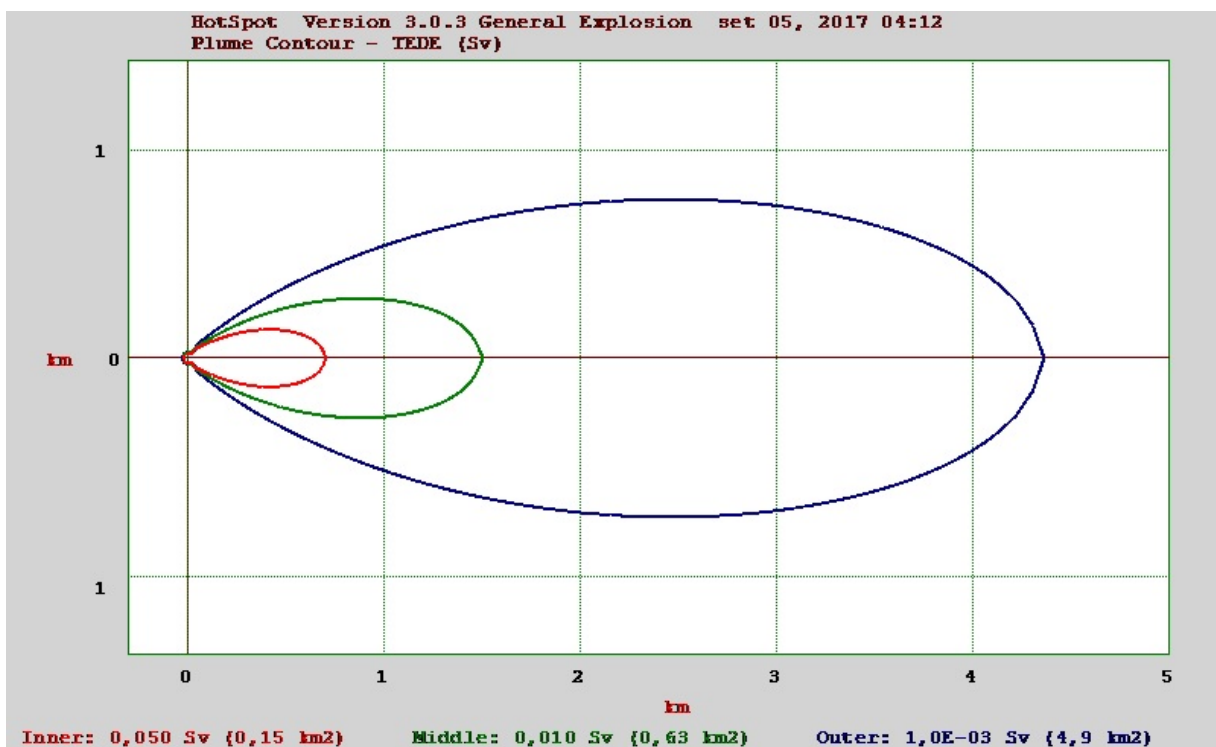


Figura 9 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade A.

De acordo com a Figura 10, para a Classe de Estabilidade A de Pasquill-Guilford, a área interna possui 0,15 km², pode-se inferir que a uma distância de aproximadamente 0,5 km da

explosão, em linha reta, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 0,63 km², até a distância de 1,5 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50 mSv e 10 mSv. A pluma externa apresenta área de 4,9 km² e a distância do ponto de explosão é aproximadamente 4,3 km, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 10 mSv e 1 mSv.

A Figura 11 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade B:

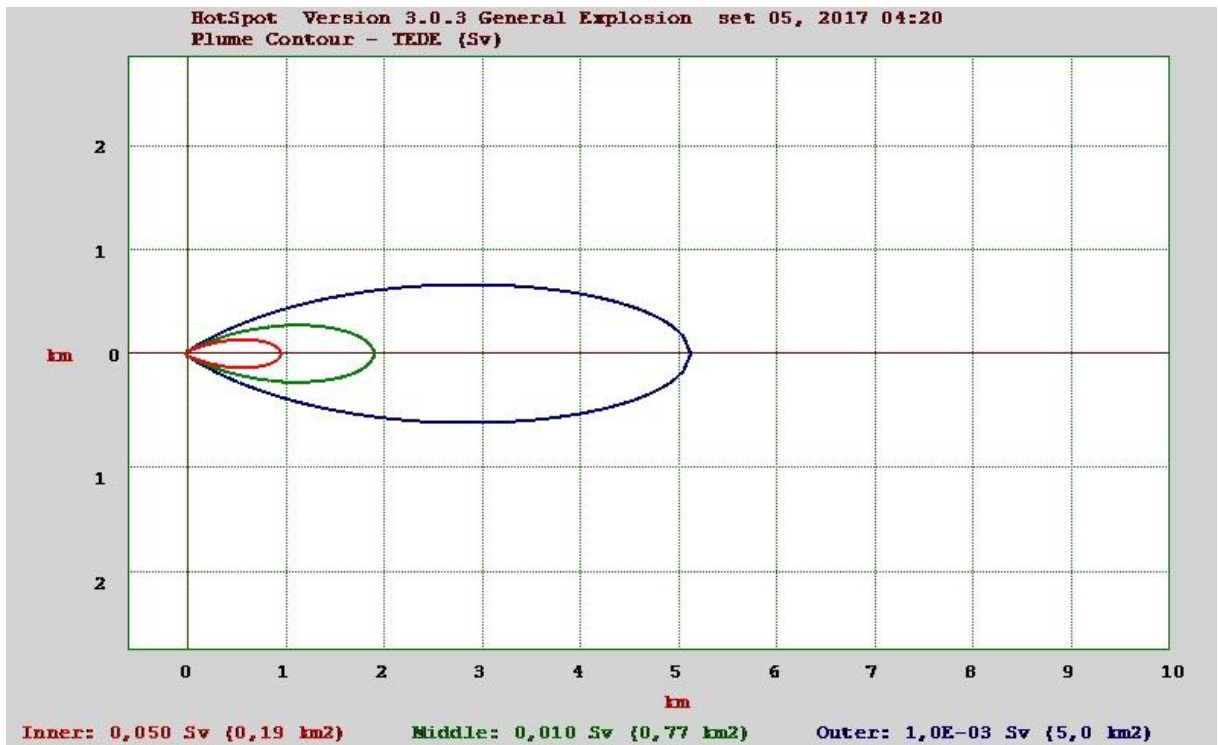


Figura 10 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade B.

Para a Classe de Estabilidade B de Pasquill-Gilfford, observa-se que a área interna possui 0,19 km² e uma distância de aproximadamente 0,9 km da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 0,77 km², até a distância de 1,9 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50 mSv e 10 m Sv. A pluma externa apresenta área de 5,0 km² e a distância do ponto de explosão é aproximadamente 5,1 km, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 10 mSv e 1 mSv.

A Figura 12 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade C:

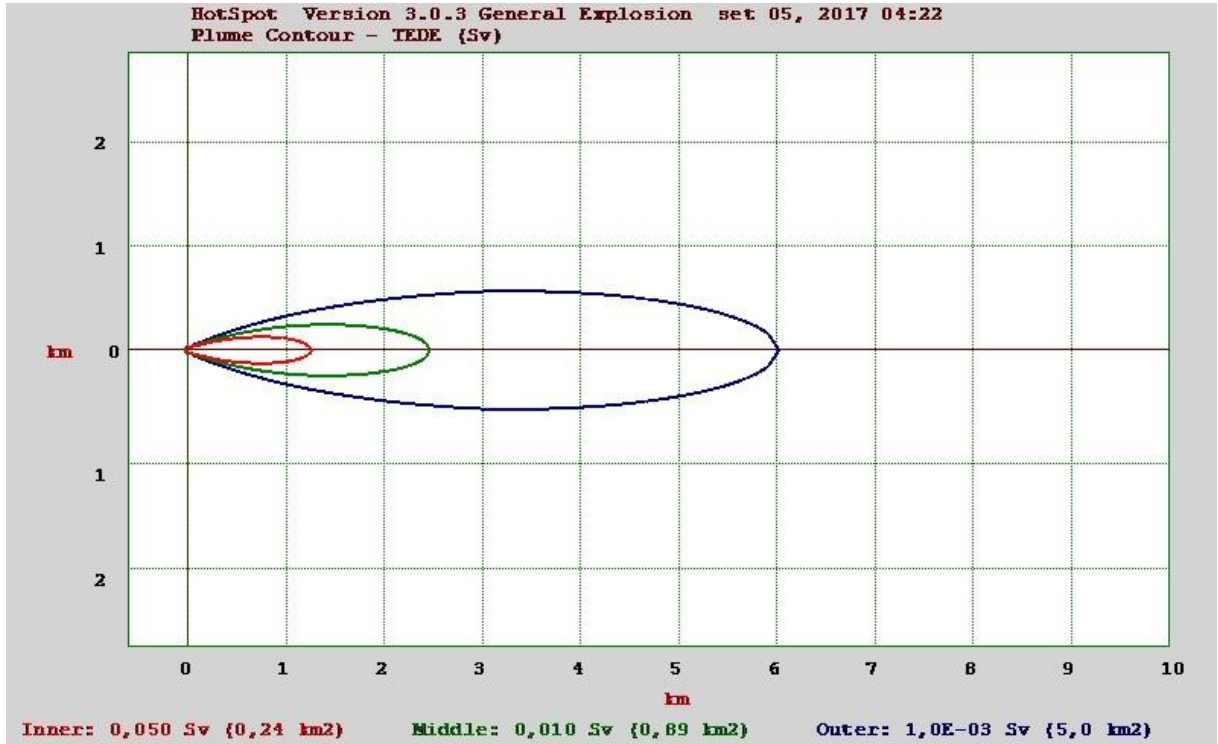


Figura 11 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade C.

Para a Classe de Estabilidade C de Pasquill-Gilfford, observa-se que a área interna possui 0,24 km² e uma distância de aproximadamente 1,2 km da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 0,89 km², até a distância de 2,4 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50 mSv e 10 mSv. A pluma externa apresenta área de 5,0 km² e a distância do ponto de explosão é de 6 km, os indivíduos estarão expostos a doses entre 10 mSv e 1 mSv.

A Figura 13 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade D: De acordo com a figura 13, para a Classe de Estabilidade C de Pasquill-Gifford, observa-se que a área interna possui 0,27 km², e uma distância de aproximadamente 1,5 km da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 0,87 km², até a distância de 2,8 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50

mSv e 10 mSv. A pluma externa apresenta área de 3,2 km² e a distância do ponto de explosão é de 5,1 km, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 10 mSv e 1 mSv.

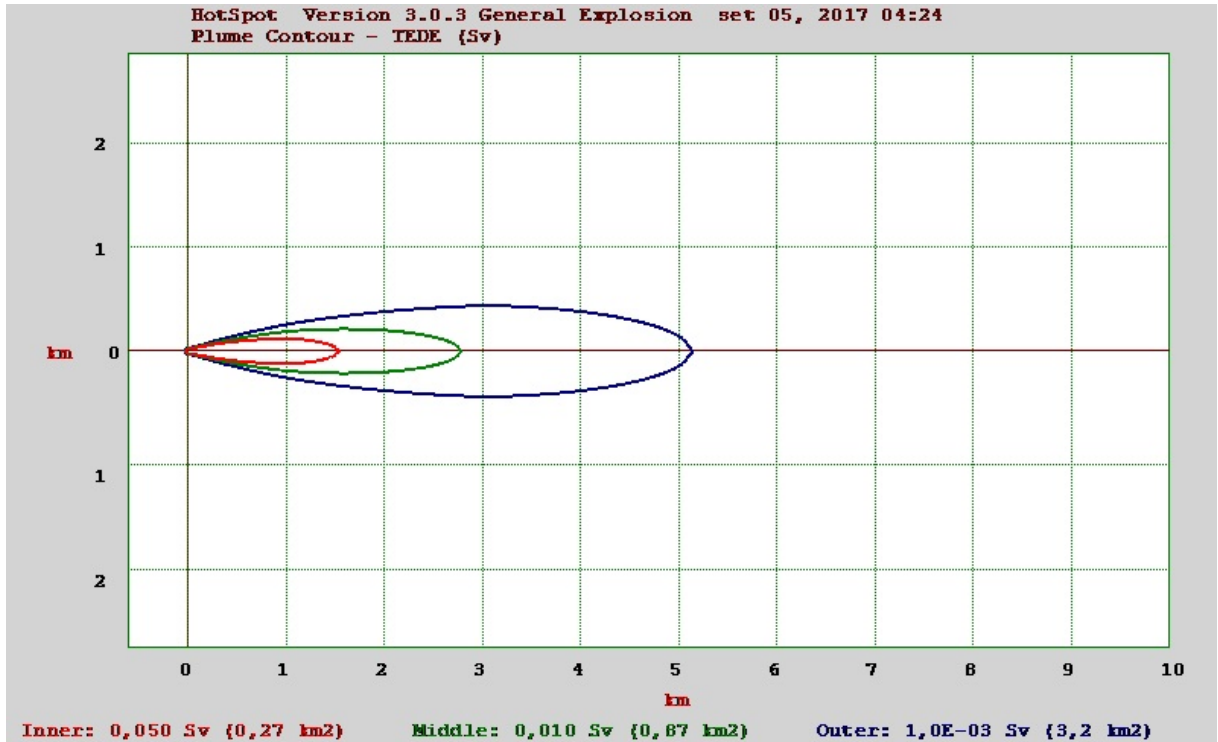


Figura 12 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade D.

A Figura 14 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade E:

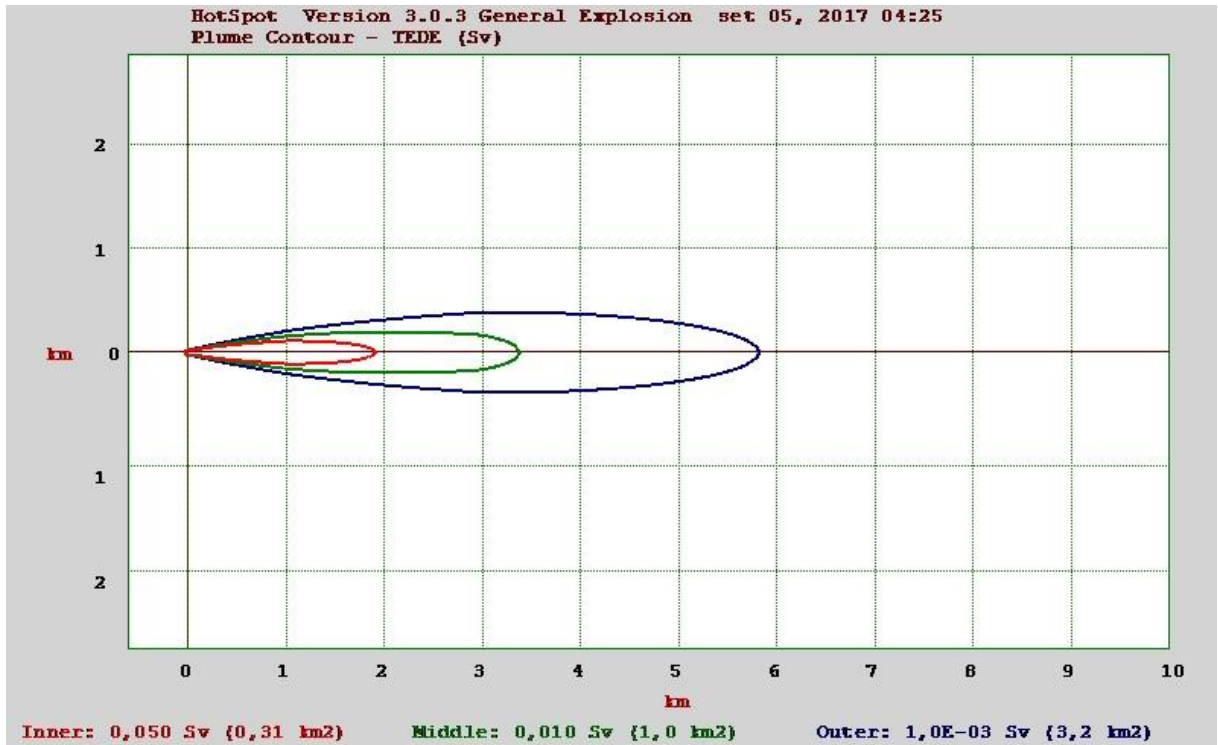


Figura 13 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade E.

De acordo com a Figura 14, para a Classe de Estabilidade C de Pasquill-Gifford, observa-se que a área interna possui 0,31 km² e uma distância de aproximadamente 1,9 km da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 1,0 km², até a distância de 3,2 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50 mSv e 10 m Sv. A pluma externa apresenta área de 3,2 km² e a distância do ponto de explosão é de 5,8 km, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 10 mSv e 1 mSv.

A Figura 15 apresenta a pluma em função da distância do centro da explosão, onde as curvas de isodose interior, média e externa representam uma dose de 50 mSv, 10 mSv e 1 mSv, respectivamente, para a classe de estabilidade F:

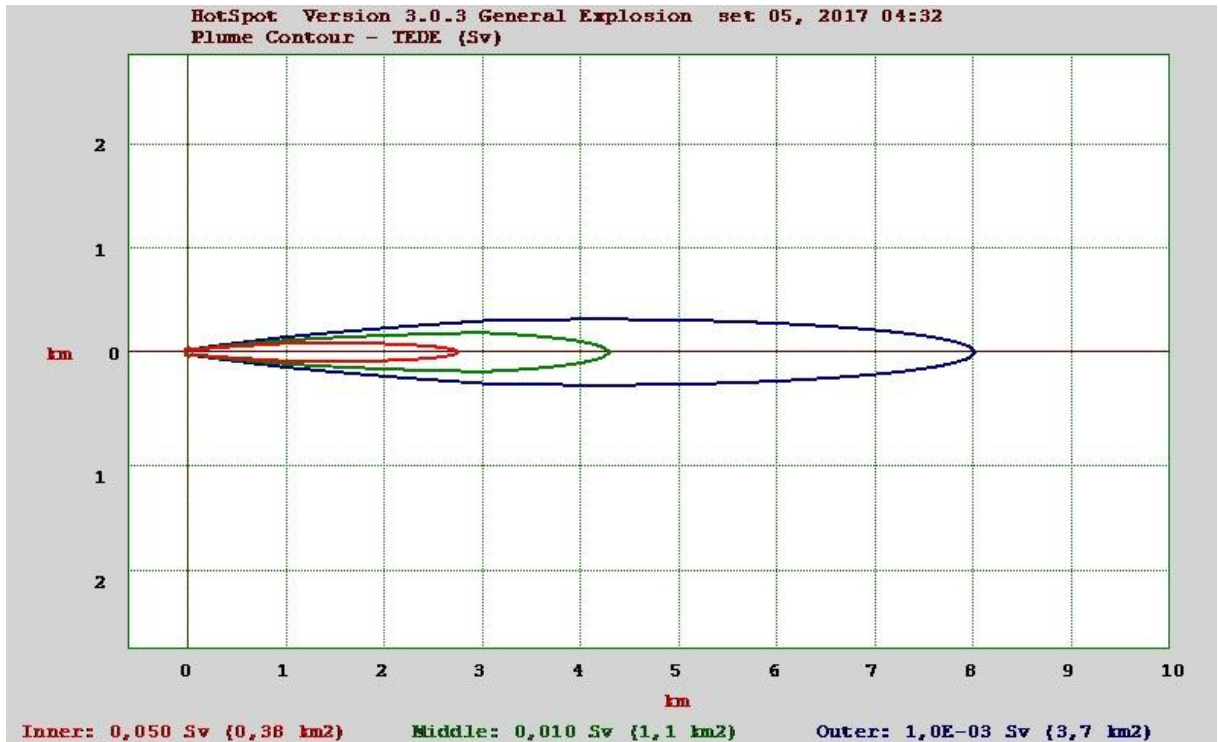


Figura 14 - Curva de isodose referente a classe de estabilidade F.

De acordo com a Figura 15, para a Classe de Estabilidade C de Pasquill-Gifford, observa-se que a área interna possui 0,38 km² e uma distância de aproximadamente 2,7 km da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose maior ou igual a 50 mSv. Dentro da área da curva de isodose média de 1,1 km², até a distância de 4,3 km do ponto da explosão, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 50 mSv e 10 m Sv. A pluma externa apresenta área de 3,7 km² e a distância do ponto de explosão é de 8 km, os indivíduos estarão expostos a uma dose entre 10 mSv e 1 mSv.

Comparando as Figuras de 10 a 15 (pluma A até pluma F) pode-se perceber que apesar de algumas plumas possuírem tamanhos próximos de área, as plumas para as classes mais estáveis estas são mais alongadas, em outras palavras elas alcançam uma distância maior em linha reta a partir da explosão. Em eventos onde a classe de estabilidade pode variar rapidamente o número de indivíduos do público pode aumentar ou diminuir drasticamente.

A figura 16 apresenta as áreas de cada pluma a partir das condições de contorno para as curvas de isodoses interna (50 mSv), média (10 mSv) e externa (1 mSv), para diferentes classes de estabilidade (A até F), onde seriam necessárias ações de proteção.

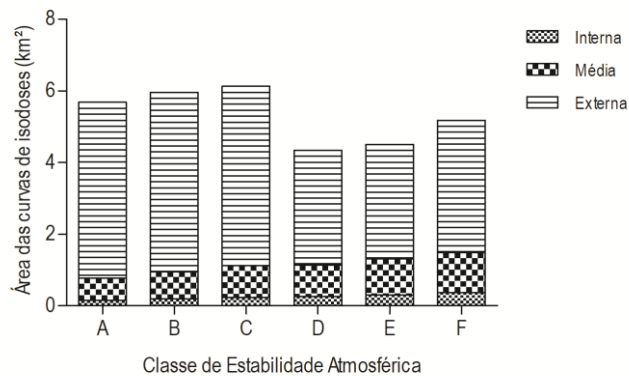


Figura 15 - Plumas estimadas utilizando diferentes classes de estabilidade de A (instável) a F (estável).

A figura 17 apresenta a Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE – Sv) em função de todas as distâncias a partir da explosão para cada classe de estabilidade atmosférica de Pasquill-Gifford. Observa-se na Figura 17A, que a dose varia de forma dependente com a classe de estabilidade nos primeiros 100 m. Nas Figuras 17B e 17C, a dose aumenta aparentemente de forma linear, conforme a classe de estabilidade varia da classe mais instável A para a classe mais estável F, até 2 km de distância da explosão. Deste ponto até 10 km a dose aumenta até a classe C, cai e aumenta novamente até a classe F, na Figura 17D. Na Figura 17E, até 80 km a dose tende a diminuir, entretanto mais rapidamente para as classes mais estáveis. Isso sugere que a concentração da dose é maior para as classes mais estáveis e em locais mais próximos da explosão. Entretanto, em locais mais afastados próximos a 80 km as doses são maiores para as classes mais instáveis em um mesmo ponto.

Considerando que a dispersão da pluma segue padrão gaussiano, não é necessária uma análise mais detalhada da dispersão, uma vez que o software dá uma aproximação conservativa, estimando para valores mais elevados as previsões de dano. A distância de 500 m foi escolhida para análise por que se encontra dentro da curva de isodose interna de todas as classes de estabilidade de Pasquill-Gifford, onde o valor da dose mínima é de 50 mSv.

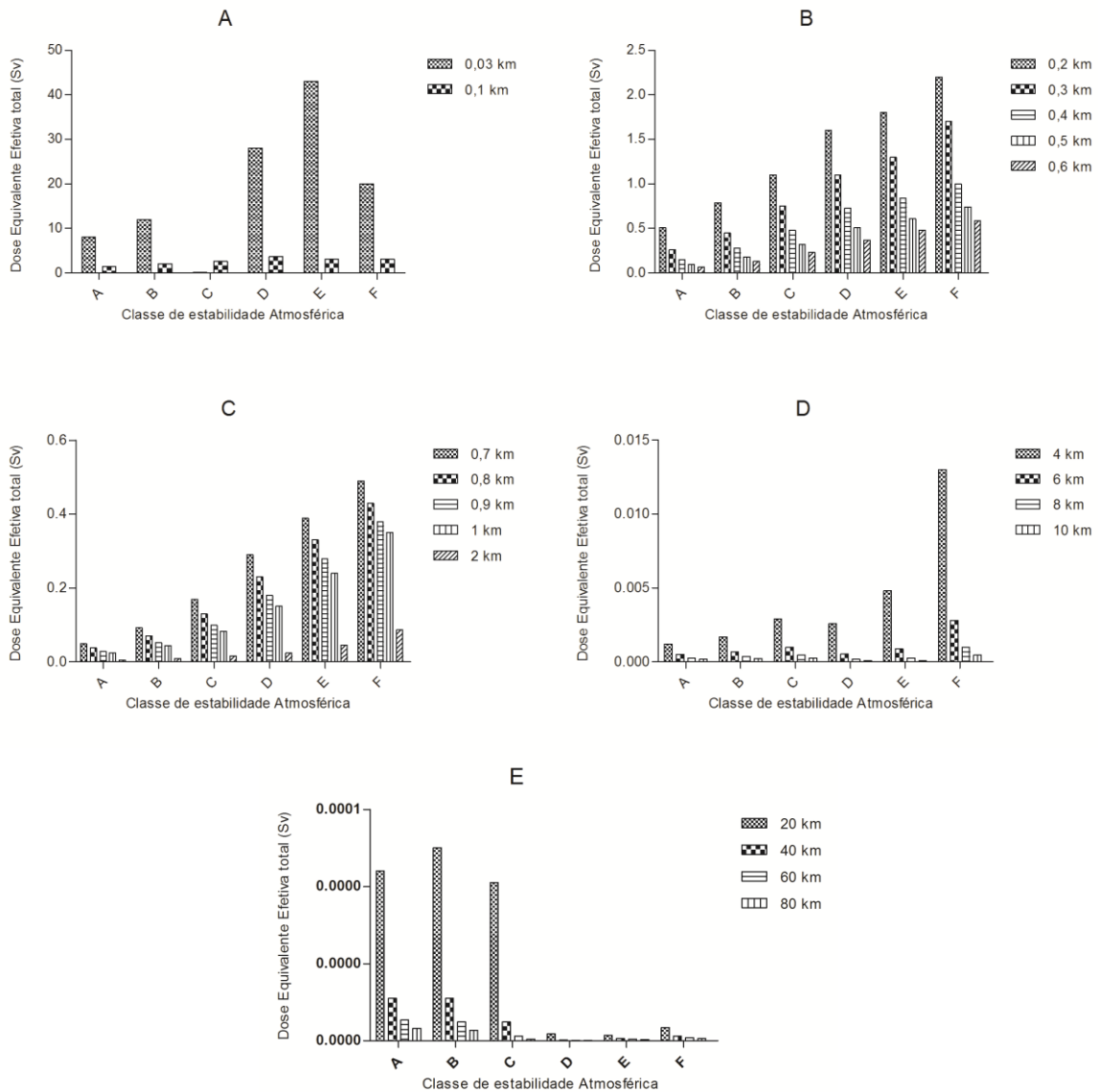


Figura 16 – Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE – Sv) para cada classe de estabilidade atmosférica em distâncias determinadas (conforme as legendas) a partir da explosão. Fig. 17A (até 0,1km), Fig. 17B (até 0,6 km), Fig. 17C (até 2,0 km), Fig. 17D (até 10 km) e Fig. 17E (até 80 km).

A Figura 18 apresenta diferentes TEDE para uma distância de 500 m a partir do local de detonação do RDD, distância considerada, por decisão da autora, como sendo o dobro da considerada segura contra os efeitos físicos da explosão. Observa-se na Figura 18 que a dose aumenta conforme a classe de estabilidade varia da classe mais instável (A) para a mais estável (F). Para uma mesma distância tem-se valores de dose diferentes para cada classe de estabilidade, isso acontece para todas as distâncias. Com base nos resultados mostrados na Figura 18, observa-se que o pior caso corresponde à classe de estabilidade mais estável F. Isso acontece por que a classe mais instável A, apresenta uma dispersão do material radioativo de

forma mais rápida e a concentração de radionuclídeos na pluma é menor quando comparada com as classes mais estáveis.

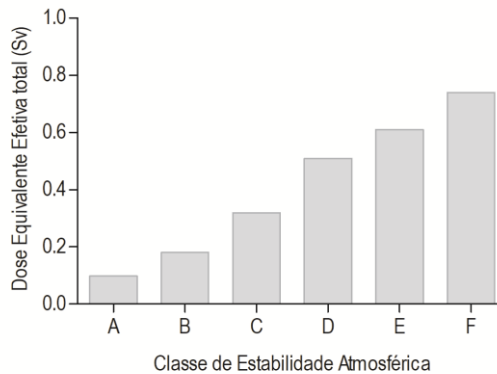


Figura 17 - Dose Equivalente Efetiva Total (TEDE – Sv) para uma distância de 500 m da explosão.

Quando a pluma toca o solo, a concentração de radionuclídeos na pluma ainda pode se manter nas condições iniciais ou próximas disso por falta de mistura, ou seja, a concentração de radionuclídeos é próxima à concentração momentos depois da explosão. Deve ser observado que a pluma emite radiação gama, provocando irradiação externa para os habitantes mesmo que a pluma não toque o solo (GROGAN e TILL, 2008).

Os resultados da TEDE foram usados como parâmetros de entrada no modelo bioestatístico RERF sendo possível estimar o risco relativo para a incidência de cânceres sólidos, entendido como o risco adicional dos indivíduos expostos a explosão de um RDD em relação a população não exposta. Os gráficos a seguir ilustram o risco relativo para a incidência de câncer sólido, os fatores envolvidos são: dose, idade no momento da exposição e gênero.

A Figura 19 apresenta o risco relativo para a incidência de câncer sólido para os sexos masculino e feminino com idades de 20 a 60 anos (em intervalos de 10 anos) a uma distância de 500 m, que é o dobro da distância de segurança contra danos causados pela explosão a partir da detonação do RDD.

O conjunto de dados dos indivíduos expostos a um RDD para diferentes classes de estabilidade numa distância considerada segura de 500 m da explosão, fornecem evidências de grandes diferenças entre os gêneros e as idades, além da diferença entre as classes de estabilidade. A diferença do Risco Relativo entre as classes de estabilidade é consequência

das diferentes concentrações de dose para cada uma das classes de estabilidade. Como pode ser observado, o risco relativo estimado para o gênero feminino apresentou-se maior do que para o gênero masculino. Outra verificação importante é o aumento dos níveis de risco para os indivíduos mais jovens. Ainda, quando feita a comparação entre indivíduos do mesmo sexo, os mais jovens apresentam risco maior do que os indivíduos com maior idade, tendência que parece se confirmar também mais acentuada quando considerado o sexo feminino.

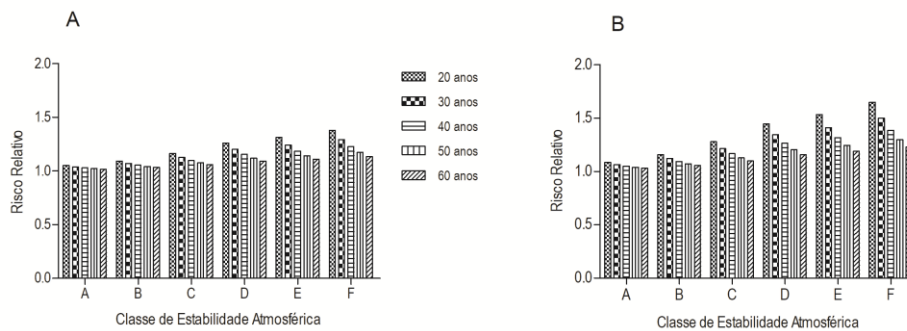


Figura 18 - Risco Relativo (RR) para cada classe de estabilidade atmosférica a uma distância de 500 m da explosão. Fig. 19A se refere ao sexo masculino e a Fig. 19B ao feminino.

Analisando-se o risco relativo para incidência de câncer sólido separadamente para cada classe de estabilidade, tanto para indivíduos masculinos quanto feminino, se pode inferir que os jovens expostos, têm o maior risco relativo. Conforme a idade dos indivíduos aumenta o risco relativo diminui.

Quando a comparação é feita entre os indivíduos do público masculino e feminino permite-se inferir que o público feminino tem o risco relativo elevado em relação aos indivíduos masculino. As chances de indução de câncer devido a exposição de radiação aumentam consideravelmente para os indivíduos do público feminino.

A Figura 20 apresenta a probabilidade de causalidade (PC) que refere-se a fração de risco que um indivíduo apresenta de desenvolver determinada morbidade após a exposição à radiação ionizante para uma distância de 500 m da explosão.

Assim como para o RR, acontece o mesmo para a PC, a probabilidade diminui de acordo com o aumento da idade no momento da exposição. A probabilidade de causa é maior para os jovens e para o gênero feminino.

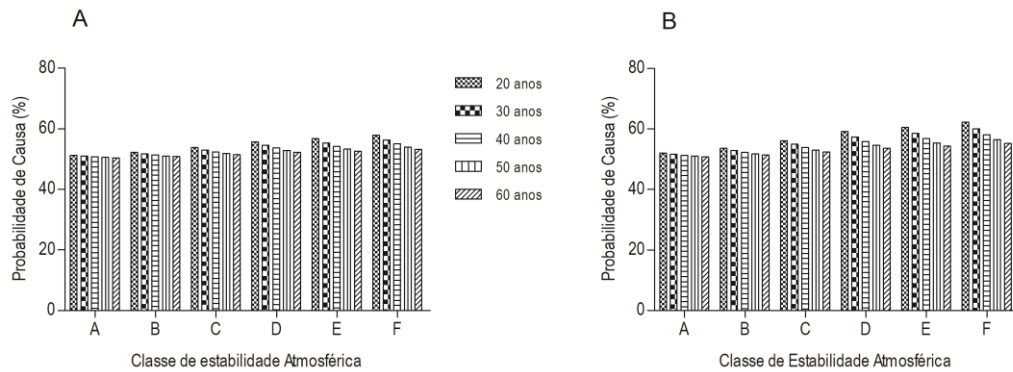


Figura 19 - Probabilidade de Causa para cada classe de estabilidade a uma distância de 500 m da explosão.

A Figura 21 apresenta a distância que a população deve manter para que não ultrapasse o limite de dose de exposição para o público em geral de 1 mSv por ano segundo a ICRP 60. Mostra-se a distância de segurança em relação à dose para que a população exposta não ultrapasse os limites de exposição estabelecidos na norma CNEN-NN-3.01:2011.

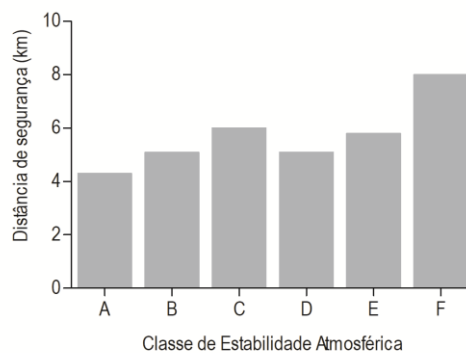


Figura 20 - Distância próxima ao limite de exposição do público em geral.

Conhecidos os possíveis cenários desencadeados por uma liberação acidental ou intencional e suas consequências, estimáveis a partir dos dados até aqui apresentados, pode-se, após a ocorrência de um acidente real, estimar os danos relacionados às máximas doses, áreas

atingidas por cada condição de contorno e a população potencialmente afetada, além de estimar os custos de detrimento.

6. DISCUSSÃO

Em um cenário RDD, a situação inicial é crítica pela magnitude dos problemas e demandas urgentes que se apresentam aos quais se somam demandas recorrentes em cenários de emergência. Prejuízos sociais e econômicos causados por uma detonação de um RDD podem ser reduzidos com planejamento e preparação. O sucesso do processo de decisão para a resposta à situação está relacionado à qualidade da informação acessada em nível local e deve ser válida, exata e expressa de forma simples para que a informação seja difundida com o mínimo de erros.

A proposta da metodologia é voltada para a utilização de ferramentas tanto computacionais quanto estatísticas considerando a convergência de objetivos de forma a aperfeiçoar as respostas à crise em um enfrentamento de emergência radiológica, gerando caminhos preferenciais para evitar ou mitigar prejuízos à saúde coletiva e ambiental obtendo estimativas essenciais ao processo decisório de forma rápida e eficiente, sendo possível prever potenciais impactos positivos ao processo.

Os dados que caracterizam a fonte de radiação, o explosivo e as condições meteorológicas foram introduzidos no código *HotSpot Health Physics 3.0.3* cujas informações resultantes das distribuições das doses pela dispersão atmosférica, considerando intensidades e distâncias, permitiu verificar as tendências nessas distribuições a partir dos fatores de influência como: (a) velocidade do vento e (b) altura da pluma, que permitiram projetar as possíveis consequências sobre a população potencialmente exposta. Ações diferentes devem ser consideradas para minimizar tanto o risco à população quanto os impactos ambientais. Em algumas áreas, é necessário abrigo, em outras evacuação, porém, todas elas evidenciam a importância e a necessidade de uma rápida intervenção.

Observou-se significativa diferença nas plumas de dispersão como função da classe de estabilidade atmosférica. Os resultados que sugerem esforços mais relevantes são os obtidos para as classes mais estáveis E e F, nas quais mesmo quando se considera distâncias maiores, a TEDE provocada permanece alta quando comparada a resultados calculados para as demais classes nas mesmas condições. Considerando os limites de doses estabelecidos para intervenção em situações de emergência, foi possível estimar a área (em km²) para ações de proteção urgentes. As classes de estabilidade que apresentaram como resultado uma área mais

extensa para ações de evacuação (50 mSv) e abrigagem (10 mSv) foram as classes E, Moderadamente Estável, e F, Muito Estável. A área mais extensa para a isodose de 1mSv foi calculada para a classe de estabilidade A, Muito Instável, comportamento esperado por dispersar mais rapidamente o material radioativo em forma de aerossol.

Com base na equação 10, do modelo epidemiológico RERF, a indução do câncer sólido pelo incremento de dose na população pode ser estimada. Esta abordagem do problema de estudo é prospectiva e não tem relação imediata com a resposta à emergência em tempo real, sendo de fundamental importância para se caracterizar e modelar consequências para estudos epidemiológicos de seguimento da população (*follow-Up studies*), principalmente para casos novos de câncer sólido.

Considerando a TEDE para uma distância de 500 m o risco relativo (RR) e a probabilidade de causalidade (PC) para tumores sólidos nos indivíduos do sexo feminino apresentou valores superiores em comparação aos indivíduos do sexo masculino. Os dados estimados de risco permitem inferir que a ocorrência de câncer sólido também é maior nos indivíduos mais jovens. Já era esperado que os maiores riscos fossem para as mulheres e para os mais jovens assim como os resultados obtidos após estudos considerando a população japonesa. No caso de evacuação deve-se dar prioridade aos mais jovens e aos indivíduos do sexo feminino.

7. CONCLUSÃO

Um cenário RDD envolvendo material radioativo pode provocar danos, não apenas às pessoas que estejam próximas à fonte, mas também à população que venha a ser submetida à pluma que é determinada em grande extensão pela dispersão atmosférica que sofre em função das condições climáticas representadas pelas classes de estabilidade de Pasquill-Gifford.

O sucesso do processo de decisão para a resposta à situação está relacionado com a avaliação de risco adequada ao cenário enfrentado. Entretanto, para isso é necessário o conhecimento de alguns parâmetros que são disponíveis apenas no momento da ocorrência de fato, mas que, uma vez conhecidos por meio desta metodologia pode-se realizar simulações que indicam opções seguras que podem orientar as primeiras ações na resposta, além de fornecer meios para estudos de impacto futuro. Uma vez sabendo as variáveis envolvidas no cenário RDD, pode-se estimar o alcance de um evento real.

Estudos envolvendo plataformas estanques de forma integrada representam uma tendência moderna de convergência de capacidades, sendo indicada pelos autores como metodologia de convergência, sendo ainda raros os trabalhos encontrados com este mote na literatura especializada.

O conhecimento das possíveis consequências de um cenário RDD permite que os órgãos de resposta possam elaborar procedimentos de trabalho integrados, verificando as melhores práticas, procedimentos, equipamentos e técnicas capazes de proteger a população afetada e o meio ambiente e, sobretudo, o apoio aos órgãos de controle de doenças e estudos epidemiológicos na projeção de novos casos de morbidades relacionáveis.

O câncer sólido foi utilizado como morbidade de referência. Porém, o documento TECDOC-870 da Agência Internacional de Energia Atômica fornece outras equações para outros tipos de cânceres que podem ser utilizadas para previsão do risco.

A aplicação da metodologia proposta resulta em informações importantes que podem ser utilizadas para otimizar as ações de resposta a emergências além de orientar trabalhos futuros. Ações de intervenção para proteção do público em geral, mostram-se capaz de reduzir os riscos individuais e coletivos no cenário de resposta a um RDD, no sentido de evitar ou

mitigar prejuízos à saúde, ao ambiente e, em consequência, prejuízos financeiros aos órgãos governamentais que, em última análise, representam os interesses da população.

PERSPECTIVAS FUTURAS

Em trabalhos futuros será possível calcular os custos de detrimento, que faz parte de estágio mais avançado da avaliação de risco, considerando-se as diferentes classes de estabilidade de Pasquill-Gifford. Uma vez que o cenário pode mudar a qualquer momento em função das condições meteorológicas, o custo estimado varia de acordo com as isodoses recebidas e a densidade demográfica do local.

De forma complementar, pode-se considerar a possibilidade a utilização desta metodologia com novas ferramentas de assessoramento e controle, como os softwares RESRAD e ERICA, também utilizados pela Agência Internacional de Energia Atômica, com base na Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA), a fim de analisar o comprometimento e risco ambiental de um incidente radiológico.

Essas são ideias que podem orientar futuros trabalhos envolvendo a modelagem de consequências, podendo ser úteis para o desenvolvimento de metodologias mais complexas sobre o enfrentamento desta classe de problemas.

REFERÊNCIAS

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION V (BEIR V). **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation.** Natl Acad. Press. Washington, DC. 1990.

BIOLOGICAL EFFECTS OF IONIZING RADIATION VII (BEIR VII). **National Research Council, Committee on the Biological Effects of Ionizing Radiations Health effects of exposure to low levels of ionizing radiation.** Natl Acad. Press. Washington, DC. 2006.

BIRAL, A. R. **Radiações ionizantes pra médicos, físicos e leigos.** Florianópolis, Insular, 2002.

BRONW, J. E. ALFONSO, B. AVILA, R. BERESFORD, N. A. COPPLESTONE, D. HOSSEINI, A. **A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals.** J. Environ. Radioact., 153 (2016), pp. 141-148.

CARVALHO, R. N. Procedimentos de proteção radiológica, adotados no hospital geral do I.N.A.M.P.S. de Goiânia. para atendimento aos radioacidentados com céσιο 137. Publicação IPEN 266. Ago, 1989.

CEZAR, F. G. ABRANTES, P. C. C. Princípio da precaução: considerações epistemológicas sobre o princípio e sobre sua interação com o processo de análise de risco. **Cadernos de Ciência e Tecnologia (EMBRAPA)**, Brasília, v. 20, n. 2, p. 225-262, 2003.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear; Ministério da Ciência e Tecnologia. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica.** Norma CNEN-NN-3.01:2011. Rio de Janeiro: CNEN. Março de 2014.

CNEN. Comissão Nacional de Energia Nuclear. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Fatores de Ponderação para as Grandezas de Proteção Radiológica.** Posição Regulatória 3.01/002:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.

DI GIOVANNI, D. et AL. Two realistic scenarios of intentional release of radionuclides (Cs-137, Sr-90) – the use of the HotSpot code to forecast contamination extent. **WSEAS – transactions on environment and development**, p. 106-122, v.10, mar. 2014

Erica Assessment Tool. 2015. Disponível em: <<http://www.eric-tool.com/erica/>>. Acesso em: 12 de dez. de 2017.

IAEA. Internacional Atomic Energy Agency. **Categorization of radioactive**. Safety standards series, ISSN 1020–525X ;no. RS-G-1.9. Vienna, Austria, 2005.

IAEA. Internacional Atomic Energy Agency. **Incident and Trafficking Database (ITDB)**. 2015. Disponível em: <<http://www-ns.iaea.org/security/itdb.asp>>. Acesso em: 10 de Nov. de 2017.

IAEA. Internacional Atomic Energy Agency. **Methods for Estimating the Probability of Cancer from Ocupacional Radiation Exposure**. IAEA-TECDOC-870. R. S. Section. Vienna, Austria, 1996.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em: <http://censo2010.ibge.gov.br/>. Acesso em: 23 de Ago. de 2017.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Recommendations of the International Commission on Radiological Protection**, ICRP Publication 60. Annals of the ICRP. P. Press. New York, N.Y.,1991.

ICRP. International Commission on Radiological Protection. **Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection**. ICRP Publication 66. Annals of the ICRP, 1994.

KNOLL, Glenn F.. **Radiation Detection and Measurement**. 4ed. John Wiley & Sons, Inc. 2010.

GIFFORD, F. A. Atmospheric Dispersion Models for Environmental Pollution Applications. In: Lectures on Air Pollution and Environment Impact Analyses. **American Meteorological Society**, p. 35-58, Boston, 1982.

GIFFORD, F. A. Turbulent diffusion-typing schemes: a review. Nucl. Saf., v17, n° 1, pp 68-86 (1976).

GROGAN, H.A. TILL, J.E. Radiological risk assessment and environmental analysis, Oxford University press, New York, 2008.

HANNA, S., BRIGGS, R. HOSKER Jr., R. (1982), **Handbook on Atmospheric Diffusion, prepared for the Office of Health and Environmental Research**, DOE/TIC-11223 (DE82002045), pp. 6871 (Office of Energy Research, U.S. Department of Energy).

HANNA, S., BRIGGS, R. BIRTTER, R. E. **Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites**. ISBN NO 0-8169-0863-X, CCPS/AIChE. 3 Park Ave., New York, 2002.

HOMANN SG. HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide. **Lawrence Livermore National Laboratory**, CA, USA, 2014.

LIKHTAREV, I. A. et al. Chernobyl Accident: Retrospective and Prospective Estimates of External Dose of the Population of Ukraine. **Health Physics**. v. 82, n. 3, pp. 290 -303, mar. 2002.

METTLER Jr.F.A.,VOELZ, G.L. **Major Radiation Exposure — What to Expect and How to Respond**. Engl J Med 2002; 346:1554-1561May 16, 2002 DOI: 10.1056/NEJMra000365

MOORE Jr., A. V. Radiological and Nuclear Terrorism: Are You Prepared?. **Journal of the American College of Radiology**. v. 1, n. 1, p. 54-58, jan. 2004

NCRP. National Council on Radiation Protection and Measurements. Report No. 052 - **Cesium-137 from the Environment to Man: Metabolism and Dose** (1977)

NRC. National Research Council. **Risk assessment in the federal government:managing the process**. Washington (DC): National Academy Press; 1983.

PASQUILL, F. **Atmospheric Diffusion**. John Wiley & Sons. New York, 2^a Ed, 1974.

PASQUILL F. **The estimation of dispersion of windborne material**. Meteorological Magazine, 1961; 90:33–49.

Radiation Protection Division. (2002). **A European Manual for Off-site Emergency Planning and Response to Nuclear Accidents**. BELGIAN NUCLEAR RESEARCH CENTRE (SCK•CEN).

RESRAD Family of Codes. 2001. Disponível em: <<http://resrad.evs.anl.gov/>>. Consulta em 12/12/17.

ROSOFF, H. VON WINTERFELDT, D. A risk and economic analysis of dirty bomb attacks on the ports of Los Angeles and Long Beach. **Risk Analysis**, 2007; 27(3):533–546.

ROTHER FC, REBELLO WF, HEALY MJ, et al. Radiological Risk Assessment by Convergence Methodology Model in RDD Scenarios. **Risk Anal** 36(11): 2039-2046. (2016).

SHIMIZU, Y., KATO, H., SCHULL, W.J., **Studies of the mortality of A-bomb survivors.** 9. Mortality, 1950-1985: Part 2. Cancer mortality based on the recently revised doses (DS86). Radiat. Res. 121 (1990) 120-141.

TAUHATA, L; SALATI, I.P.A.; PRINZIO, R.D.; PRINZIO, A.R.D. **Radioproteção e Dosimetria – Fundamentos.** Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Comissão Nacional de Energia Nuclear. 10ª revisão. 373 p. Rio de Janeiro: Abril de 2014.

THOMPSON, D.E. MABUCHI, K. RON, E., SODA, M., TOKUNAGA, M. **Cancer incidence in atomic bomb survivors. Part II: solid tumours, 1958-1987.** Radiat. Res. 137 (1994) S17-S67.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. U. S. NRC. (2014). Disponível em: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/total-effective-dose-equivalent-tede.html>>. Acessado em: 20 de Out. de 2017.

VALVERDE, N., LEITE, T., MAURMO, A. **Manual de Ações Médicas em Emergências Radiológicas.** Fundação Eletronuclear de Assistência Médica. Eletrobrás Eletronuclear. Rio de Janeiro, p. 112, 2010.

Van der Hoven, I. Deposition of Particles and Gases. **Meteorology and Atomic Energy.** U.S. Atomic Energy Commission, p. 202-208, D. H. Slade, ed., 1968.

VIEIRA, S. A. **Estudo sobre fatores causais, consequências e ações de resposta no acidente com Césio 137 em Goiânia/GO.** Revista Emergência. Edição 2/2015, Novo Hamburgo-RS, p. 10, fev. 2015. Entrevista concedida a Josué dos Santos.

ZIAJAHROMI, S. KHANIZADEH, M. NEJADKOORKI, F. **Total effective dose equivalent assessment after exposure to high-level natural radiation using the RESRAD code.** Environ Monit Assess (2014) 186: 1907.

WASH-1400, “Reactor Safety Guide,” Appendix VI, “Calculation of Reactor Accident Consequences,” (NRC 1975, p. 8-8, Equation VI 8-1, also referred to as Equation VI E-1).

ANEXO A – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE A

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:07

Source Material : Cs-137 D 30.0y
 Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
 Damage Ratio (DR) : 1,00
 Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
 Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
 Leakpath Factor (LPF) : 1,000
 Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
 Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
 Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
 Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
 High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
 Debris Cloud Top : 61 m
 Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
 Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
 Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
 Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
 Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
 Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)
 Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
 corresponds to reflected overpressure generated using
 Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : A
 Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
 Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
 Receptor Height : 1,5 m
 Inversion Layer Height : None
 Sample Time : 10,000 min
 Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
 Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
 Maximum TEDE : 24 Sv
 Inner Contour Dose : 0,050 Sv
 Middle Contour Dose : 0,010 Sv
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
 Exceeds Inner Dose Out To : 0,69 km
 Exceeds Middle Dose Out To : 1,5 km
 Exceeds Outer Dose Out To : 4,3 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

ANEXO B – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE B

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:20

Source Material : Cs-137 D 30.0y
Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
Damage Ratio (DR) : 1,00
Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
Leakpath Factor (LPF) : 1,000
Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
Debris Cloud Top : 61 m
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
corresponds to reflected overpressure generated using
Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : B
Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
Receptor Height : 1,5 m
Inversion Layer Height : None
Sample Time : 10,000 min
Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
Maximum TEDE : 43 Sv
Inner Contour Dose : 0,050 Sv
Middle Contour Dose : 0,010 Sv
Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
Exceeds Inner Dose Out To : 0,93 km
Exceeds Middle Dose Out To : 1,9 km
Exceeds Outer Dose Out To : 5,1 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

ANEXO C – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE C

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:21

Source Material : Cs-137 D 30.0y
 Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
 Damage Ratio (DR) : 1,00
 Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
 Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
 Leakpath Factor (LPF) : 1,000
 Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
 Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
 Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
 Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
 High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
 Debris Cloud Top : 61 m
 Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
 Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
 Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
 Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
 Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
 Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)
 Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
 corresponds to reflected overpressure generated using
 Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : C
 Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
 Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
 Receptor Height : 1,5 m
 Inversion Layer Height : None
 Sample Time : 10,000 min
 Breathing Rate : 3,33E-04 m³/sec
 Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
 Maximum TEDE : 66 Sv
 Inner Contour Dose : 0,050 Sv
 Middle Contour Dose : 0,010 Sv
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
 Exceeds Inner Dose Out To : 1,2 km
 Exceeds Middle Dose Out To : 2,5 km
 Exceeds Outer Dose Out To : 6,0 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

ANEXO D – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE D

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:23

Source Material : Cs-137 D 30.0y
Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
Damage Ratio (DR) : 1,00
Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
Leakpath Factor (LPF) : 1,000
Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
Debris Cloud Top : 51 m
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
corresponds to reflected overpressure generated using
Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : D
Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
Receptor Height : 1,5 m
Inversion Layer Height : None
Sample Time : 10,000 min
Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
Maximum TEDE : 1,73E+02 Sv
Inner Contour Dose : 0,050 Sv
Middle Contour Dose : 0,010 Sv
Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
Exceeds Inner Dose Out To : 1,5 km
Exceeds Middle Dose Out To : 2,8 km
Exceeds Outer Dose Out To : 5,1 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

ANEXO E – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE E

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:34

Source Material : Cs-137 D 30.0y
Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
Damage Ratio (DR) : 1,00
Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
Leakpath Factor (LPF) : 1,000
Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
Debris Cloud Top : 51 m
Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)
Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
corresponds to reflected overpressure generated using
Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : E
Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
Receptor Height : 1,5 m
Inversion Layer Height : None
Sample Time : 10,000 min
Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
Maximum TEDE : 7,12E+02 Sv
Inner Contour Dose : 0,050 Sv
Middle Contour Dose : 0,010 Sv
Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
Exceeds Inner Dose Out To : 1,9 km
Exceeds Middle Dose Out To : 3,4 km
Exceeds Outer Dose Out To : 5,8 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)

ANEXO F – RESULTADOS DE SAÍDA PARA A CLASSE DE ESTABILIDADE F

HotSpot Version 3.0.3 General Explosion
set 05, 2017 04:33

Source Material : Cs-137 D 30.0y
 Material-at-Risk (MAR) : 4,4400E+14 Bq
 Damage Ratio (DR) : 1,00
 Airborne Fraction (ARF) : 1,00E+00
 Respirable Fraction (RF) : 1,00E-03
 Leakpath Factor (LPF) : 1,000
 Respirable Source Term : 4,44E+11 Bq
 Non-respirable Source Term : 4,44E+14 Bq
 Wind Speed (h=10 m) : 5,00 m/s
 Wind Direction : 0,0 degrees Wind from the North
 High Explosive : 5,50 Pounds of TNT
 Debris Cloud Top : 51 m
 Debris Cloud Top calculated using modified cloud height methodology

UNMITIGATED BLAST DAMAGE

IABTI safe distance : 274 m (900 ft)
 Onset of shattered glass due to blast (0.5 psi): 39 m - 49 m (127 ft - 162 ft)
 Eardrum ruptures and incapacitation (5 psi) : 7,7 m - 12 m (25 ft - 40 ft)
 Lung damage and complete incapacitation (10 psi) : 5,3 m - 8,1 m (17 ft - 27 ft)
 Onset of lethality (25 psi) : 3,4 m - 5,3 m (11 ft - 17 ft)
 Fatalities in over 99% of population (100 psi) : 1,8 m - 3,2 m (6,1 ft - 10 ft)

Note: minimum range corresponds to side-on pressure and maximum range
 corresponds to reflected overpressure generated using
 Sandia National Laboratories BLAST model.

Stability Class : F
 Respirable Dep. Vel. : 0,30 cm/s
 Non-respirable Dep. Vel. : 40,00 cm/s
 Receptor Height : 1,5 m
 Inversion Layer Height : None
 Sample Time : 10,000 min
 Breathing Rate : 3,33E-04 m3/sec
 Distance Coordinates : All distances are on the Plume Centerline

Maximum Dose Distance : 0,010 km
 Maximum TEDE : 2,70E+02 Sv
 Inner Contour Dose : 0,050 Sv
 Middle Contour Dose : 0,010 Sv
 Outer Contour Dose : 1,00E-03 Sv
 Exceeds Inner Dose Out To : 2,7 km
 Exceeds Middle Dose Out To : 4,3 km
 Exceeds Outer Dose Out To : 8,0 km

FGR-11 Dose Conversion Data - Total Effective Dose Equivalent (TEDE)