

**MINISTÉRIO DA DEFESA  
EXÉRCITO BRASILEIRO  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

**OLGA MARIA OLIVEIRA DE ARAÚJO**

**ANÁLISE DE RISCO OCUPACIONAL POR CONVERGÊNCIA E  
MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIA EM UM CENÁRIO RDD:  
MAPEAMENTO DE RISCO DE CÂNCER SÓLIDO**

**Rio de Janeiro  
2015**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**OLGA MARIA OLIVEIRA DE ARAÚJO**

**ANÁLISE DE RISCO OCUPACIONAL POR CONVERGÊNCIA E  
MODELAGEM DE CONSEQUÊNCIA EM UM CENÁRIO RDD:  
MAPEAMENTO DE RISCO DE CÂNCER SÓLIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear,

Orientador: Prof. Edson Ramos de Andrade - D.Sc  
Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Júnior – D.Sc.

**Rio de Janeiro  
2015**

**INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA**

**OLGA MARIA OLIVEIRA DE ARAÚJO**

**ANÁLISE DE RISCO OCUPACIONAL POR CONVERGÊNCIA E MODELAGEM DE  
CONSEQUÊNCIA EM UM CENÁRIO RDD: MAPEAMENTO DE RISCO DE  
CÂNCER SÓLIDO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear,

Orientador: Prof. Dr. Edson Ramos de Andrade - D.Sc

Prof. Dr. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior - D.Sc

Aprovada em 9 de fevereiro de 2015 pela seguinte Banca Examinadora:

---

Prof. Edson Ramos de Andrade – D.Sc do IME - Presidente

---

Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.Sc do IME

---

Pesq. Lidia Vasconcellos de Sá – D.Sc do IRD

---

Pesq. Hélio de Carvalho Vital – Ph. D. do CTEEx

**Rio de Janeiro  
2015**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente à Deus pela vida e saúde.

Agradeço carinhosamente a minha mãe, pelo amor incondicional, pela dedicação e pelo apoio em todas os momentos da minha vida. Ao meu pai, onde estiver que seja guiado por muita luz para encontrar seu caminho.

Aos meus irmãos, alguns que mesmo distantes acreditaram em mim e me estenderam as mãos nos momentos difíceis.

Ao IME, por permitir e incentivar esta pesquisa.

Ao meu orientador e amigo Dr. Edson Ramos de Andrade, pela confiança, paciência, incentivo e disposição em me orientar.

E a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para que esta Dissertação pudesse ser concluída.

*“A mente que se abre a uma nova ideia,  
jamais voltará ao seu tamanho original”*

Albert Einstein

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	08
LISTA DE TABELAS.....	10
LISTA DE ABREVIATURAS.....	11
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1 Grandezas de Radioproteção.....	15
1.1.1 Dose Absorvida Média em um Órgão ou Tecido ( $D_T$ ).....	15
1.1.2 Dose Equivalente ( $H_T$ ).....	16
1.1.3 Dose Efetiva ( $E$ ).....	17
1.2 Liberações do material radioativo para a atmosfera.....	18
1.2.1 Fontes Radioativas.....	19
1.3 Intervenção em Situações de Emergência.....	21
1.3.1 Medidas de Proteção Imediatas.....	23
1.4 Código Computacional HotSpot.....	25
1.4.1 Modelo Gaussiano.....	26
1.4.2 Deposição Seca.....	27
1.4.3 Ressuspensão.....	28
1.4.4 Classificação de Estabilidade Atmosférica.....	28
1.4.5 Cálculo de $\sigma_y$ e $\sigma_z$ .....	29
1.4.6 Profundidade da camada de mistura.....	32
1.4.7 Perfil de temperatura vertical.....	33
1.4.8 Tempo de Amostragem.....	34
1.5 Modelo de Risco RERF.....	35
1.6 Código Computacional RESRAD-RDD.....	36
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>39</b>
2.1 Objetivo geral .....	39
2.2 Objetivos específicos .....	39

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	40
3.1	Cenário de Exposição.....	40
3.2	Dados de entrada e parâmetros utilizados no HotSpot.....	41
3.3	Risco Relativo para Câncer Sólido.....	43
3.4	Dados de entrada e parâmetros usados no RESRAD-RDD.....	44
3.5	Avaliação de Risco da Missão.....	45
<b>4</b>	<b>DISCUSSÃO E RESULTADOS</b> .....	46
4.1	HotSpot.....	46
4.2	Estimativa do Risco para Câncer Sólido.....	48
4.3	Estimativas e Riscos obtidos pelo RESRAD-RDD.....	52
4.3.1	Grupo A – Controle de Acesso Durante Operação de Resposta À Emergência.....	52
4.3.2	Estimativa do Risco da Missão para o Grupo A (RESRAD-RDD), Classe de Estabilidade Atmosférica A ( $\sigma_{\theta} = 25$ ).....	55
4.3.3	Grupo B – Resposta inicial, ações de proteção urgentes (Evacuação e Abrigagem).....	56
4.3.4	Estimativa do Risco da Missão para o Grupo B (RESRAD-RDD), Classe de Estabilidade Atmosférica A ( $\sigma_{\theta} = 25$ ).....	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	61
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	63
<b>7</b>	<b>ANEXO</b> (Principais considerações no Planejamento de Monitoramento da População).....	67

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG.1.1	Incidentes confirmados envolvendo posse de material radioativo não autorizado reportados ao ITDB no período entre 1993-2013.....	20
FIG.1.2	Representação Gráfica do Conceito de Dose Projetada.....	22
FIG.1.3	Representação Gráfica do Conceito de Dose Evitável.....	23
FIG.1.4	Representação Gráfica das equações para $\sigma_y$ em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F (Terreno Padrão).....	31
FIG.1.5	Representação Gráfica das equações para $\sigma_z$ em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F (Terreno Padrão).....	31
FIG.1.6	Perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas.....	33
FIG.1.7	Imagem com tempo de amostragem de 1/50s.....	35
FIG.1.8	Imagem com tempo de amostragem de 5 minutos.....	35
FIG.1.9	Grupos de Diretrizes Operacionais baseados nas PAG's .....	37
FIG.1.10	Metodologia de Convergência aplicada ao cenário RDD.....	38
FIG.4.1	Plumas geradas utilizando diferentes classes de estabilidade de A (extremamente instável) a F (extremamente estável).....	46
FIG.4.2	Área da pluma (km <sup>2</sup> ) em função da classe de estabilidade atmosférica.....	47
FIG.4.3	Estimativas de níveis de concentração do solo (kBq/m <sup>3</sup> ) para diferentes classes de estabilidade de A (extremamente instável) a F (extremamente estável).....	48
FIG.4.4	Risco Relativo para uma distância de 800 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica e gêneros.....	49



FIG. 4.5	Risco Relativo para uma distância de 1000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica e gêneros.....	49
FIG. 4.6	Risco Relativo para uma distância de 2000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica e gêneros.....	50
FIG.4.7	Gráficos comparativos de Probabilidade de Causalidade para o Gênero Masculino.....	51
FIG.4.8	Gráficos comparativos de Probabilidade de Causalidade para o Gênero Feminino.....	51
FIG. 4.9	Tempo de Exposição em função da dose projetada a uma distância de 100 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F).....	53
FIG. 4.10	Tempo de Exposição em função da dose projetada a uma distância de 1000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de Estabilidade atmosférica (A a F).....	54
FIG. 4.11	Tempo de Exposição em função da dose projetada a uma distância de 2000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de Estabilidade atmosférica (A a F).....	54
FIG. 4.12	Dose Total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 100 metros a partir do local da detonação.....	57
FIG. 4.13	Dose total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 1000 metros a partir do local da detonação.....	57
FIG. 4.14	Dose total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 2000 metros a partir do local da detonação.....	58

## LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1	Valores dos fatores de peso da radiação $W_R$ .....	17
TAB. 1.2	Fontes radioativas comerciais mais significativas.....	21
TAB. 1.3	Guia de Ações de Proteção (PAG's) para incidentes envolvendo RDD.....	24
TAB. 1.4	Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F.....	29
TAB. 1.5	Coeficientes de difusão $\sigma_y$ e $\sigma_z$ para terreno padrão.....	30
TAB. 1.6	Coeficientes de difusão $\sigma_y$ e $\sigma_z$ para terreno urbano.....	30
TAB. 1.7	Valores típicos de profundidade da camada mistura para diferentes classes de estabilidades.....	32
TAB. 3.1	Parâmetros de maior consideração utilizados na simulação.....	41
TAB. 3.2	Os parâmetros utilizados para o modelo de todos os cânceres sólidos.....	43
TAB. 3.3	Grupos e Subgrupos da Guia Operacional considerando ações protetoras de fase inicial.....	44
TAB. 4.1	Estimativa do Risco da Missão para o Grupo A.....	55
TAB. 4.2	Estimativas de Risco de Missão para o Grupo B.....	59

## LISTA DE ABREVIATURAS

ARGONE – Argonne National Laboratory  
CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear  
EPA - US Environmental Protection Agency  
FGR – Federal Guidance Report  
IAEA – International Atomic Energy Agency  
ICRP – International Commission on Radiological Protection  
ICRU – International Commission on Radiological Units and Measurements  
INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
ITDB – Incident and Trafficking Database  
LLNL – Lawrence Livermore National Laboratory  
LSS – Life Span Study  
MCTi – Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação  
NCR – Nuclear Regulatory Commission  
NIH – National Institute of Health  
PAG's – Protective Action Guides  
PC – Probabilidade de causalidade  
RDD – Radiological Dispersive Device  
RERF – Radiation Effects Research Foundation  
RESRAD – RESidual RADioactive material  
RR – Risco relativo  
ARS – Acute Radiation Syndrome  
SIU – Sistema Internacional de Unidades  
TEDE – Total Effective Dose Equivalent

## RESUMO

Um Dispositivo de Dispersão Radiológica (do inglês, RDD – *Radiological Dispersal Device*) é um dispositivo relativamente simples, não sendo necessário alto conhecimento de tecnologia nuclear para que seja elaborado. Os componentes principais são o material radioativo e o explosivo. O uso de um RDD é considerado como o cenário terrorista mais provável envolvendo material radiológico. Muitos radioisótopos que podem ser utilizados em um RDD são usados amplamente na Medicina, Indústria e Ciência o que pode facilitar a aquisição por meios ilícitos. O acionamento de um RDD se dá por explosão seguida de dispersão de material radioativo, onde partículas contendo material radioativo podem atingir grandes distâncias a partir do ponto original da explosão gerando uma pluma de contaminação. Informações precisas sobre a população e a estimativa da dose são essenciais para análise durante o processo de decisão. Este trabalho pretende apresentar uma proposta de metodologia de convergência utilizando códigos de simulação computacional *Hotspot Health Physics 3.0* e o modelo estatístico *Radiation Effects Research Foundation (RERF)* para determinar uma aproximação da dose em função da distância do ponto original da explosão de um RDD. A partir destes dados, pretende-se estimar o risco relativo de desenvolvimento de tumores, assim como a sua probabilidade de causa. Em uma etapa posterior, busca-se assistir o processo decisório e emprego de pessoal de resposta nas medidas de proteção urgentes, tais como abrigagem e evacuação, por meio do software RESRAD-RDD. A metodologia de convergência proposta pode acelerar o processo de aquisição de informações durante as primeiras horas de um cenário radiológico e proporcionar gerenciamento adequado da resposta médica e organização da resposta em geral.

**Palavras-chave:** RDD, riscos, HotSpot, RERF, RESRAD-RDD

## **ABSTRACT**

A Radiological Dispersion Device RDD is a relatively simple device and does not require high knowledge of nuclear technology to be developed. The main components are radioactive material and an explosive. The use of a RDD is regarded as the most likely scenario involving radiological terrorist material. Many radioisotopes that can be used in a RDD are used widely in medicine, industry and science which may facilitate acquisition by unlawful means. An RDD event occurs by explosion and radioactive material dispersion where particles containing radioactive material can reach great distances from original point of the explosion of generating a plume of contamination. Accurate information on the population and the estimated dose are essential for analysis during the decision process. This work intends to present a proposal for a convergence of methodologies using the computer simulation codes Hotspot Health Physics 3.0 and the statistical model Radiation Effects Research Foundation (RERF) to calculate the approximate dose depending on the distance of the original point of the explosion of an RDD. From those data, the relative risk of developing tumors is estimated, as well as the probability of cause. At a later stage, the proposed combination of actions is intended to help the decision-making and employment response personnel in emergency protection measures, such as sheltering and evacuation through the RESRAD-RDD software. The convergence of the proposed methodology can accelerate the process of acquiring information during the first hours of a radiological scenario and provide proper management of medical response and organization of the overall response.

**Keywords:** RDD, risks, HotSpot, RERF, RESRAD-RDD

# 1 INTRODUÇÃO

Este trabalho realiza uma simulação computacional de emergência radiológica envolvendo a deflagração de um dispositivo RDD (do inglês, RDD – *Radiological Dispersal Device*), contendo Césio 137. O cenário escolhido foi a área metropolitana da cidade do Rio de Janeiro, por ser um local de grande concentração de pessoas além de estar próximo de áreas urbanas.

Foram obtidas estimativas com o software *HotSpot Health Physics 3.0*, a fim de se obter as doses totais efetivas equivalentes (TEDE) para a população no local do evento, bem como as contaminações no solo. A TEDE pode ser descrita como a expressão mais completa da dose combinada de todas as vias de exposição aplicáveis (HOMANN, 2013).

Os resultados das doses efetivas foram usados como entradas para análises de riscos de indução de cânceres sólidos por meio de modelos bioestatísticos do modelo RERF (*Radiation Effects Research Foundation*) onde se obtém o cálculo do Risco Relativo (*Relative Risk* – RR) e a Probabilidade de Causa (*Probability of Causation* - PC).

O câncer é definido como um tumor maligno, não sendo uma doença única, mas um conjunto com mais de 200 patologias, caracterizado pelo crescimento descontrolado de células anormais. Pode ocorrer e disseminar-se em órgãos e tecidos adjacentes, numa fase denominada de metástase. Devido a diferentes células e componentes existentes no corpo humano, o câncer pode se apresentar de diferentes tipos, incluindo-se dentre eles, de forma generalizada, os tumores sólidos.

Os resultados das contaminações no solo gerados pelo código HotSpot foram usados como entrada para o código RESRAD-RDD (*RESidual RADioactive material*). O software estima parâmetros relacionados ao controle de acesso durante a resposta em situações de emergência (Grupo A) e ações protetoras urgentes de fase inicial da resposta, como abrigagem e evacuação (Grupo B), prevendo os riscos de exposição dos trabalhadores em emergência e público em geral.

A proposta da metodologia é a utilização de diferentes ferramentas com a convergência de dados para otimizar as respostas a crises em um enfrentamento de

emergência radiológica. Neste trabalho, propõe-se uma metodologia inédita, que busca integrar as plataformas computacionais e modelos de risco carcinogênico em uma ferramenta metodológica que seja capaz de apoiar a organização de uma resposta a ponto de personalizar a composição das equipes de atendimento, considerando vulnerabilidades pessoais frente aos riscos das tarefas a serem desempenhadas.

## **1.1 Grandezas de Radioproteção**

A organização e a padronização das grandezas dosimétricas são realizadas pela Comissão Internacional de Unidades e Medidas de Radiação (ICRU – *Internacional Commission on Radiological Units and Measurements*) e pela Comissão Internacional de Proteção Radiológica (ICRP – *International Commission on Radiological Protection*).

Dois tipos de grandezas são especificamente definidos para uso em proteção radiológica: (a) as grandezas limitantes, definidas pela ICRP e que são usadas para indicar o risco à saúde humana devido à exposição a radiação ionizante, e (b) as grandezas operacionais, definidas pela ICRU e que levam em consideração as atividades de radioproteção.

As grandezas de proteção radiológica ou de limitação de risco da ICRP são importantes e utilizadas para indicar o risco à saúde humana devido à radiação ionizante. As três principais grandezas de proteção radiológica recomendadas pela ICRP são: a Dose Absorvida em um órgão ou tecido ( $D_T$ ), a Dose Equivalente em um órgão ou tecido ( $H_T$ ) e a Dose Efetiva ( $E$ ).

### **1.1.1 Dose Absorvida Média em um Órgão ou Tecido ( $D_T$ )**

A grandeza física básica usada em proteção radiológica é a dose absorvida ( $D_T$ ), é definida para o cálculo em um determinado ponto da matéria, porém, em

aplicações práticas as doses absorvidas são calculadas para certo volume de tecido ou órgão. A dose ( $D_T$ ) no volume de um órgão ou tecido ( $T$ ) pode ser definida pela equação (ATIXX, 1986):

$$\overline{D_T} = \frac{\int_T D(x,y,z)\rho(x,y,z)dV}{\rho(x,y,z)} \quad (1)$$

Onde  $V$  é o volume da região do tecido  $T$ ,  $D$  é a dose absorvida no ponto  $(x,y,z)$  nesta região e  $\rho$  é a densidade de massa neste ponto.

### 1.1.2 Dose Equivalente ( $H_T$ )

Quando um ser humano é exposto a baixas doses de radiação, efeitos latentes tais como tumores, podem resultar da modificação permanente das células. Estes efeitos são de natureza estocástica. Quando o indivíduo exposto a doses mais elevadas de radiação, as células são mais propensas a morrer. Efeitos observados acima deste limiar são determinísticos e podem resultar na síndrome aguda da radiação (SAR), comumente conhecida como doença da radiação (CDC, 2003).

Como os efeitos da radiação podem variar com a qualidade (tipo e energia) da radiação para uma mesma dose absorvida, foi necessário criar um conceito que proporcionasse comparar os efeitos devido aos diferentes tipos de radiação. Dessa forma, a mesma exposição a diferentes tipos de radiação pode ter efeitos diferentes e que podem ser mensurados. Para levar em conta isso, foi introduzida a grandeza dose equivalente,  $H_T$ , que é a dose absorvida média em um órgão ou tecido, ( $D_{T,R}$ ), multiplicada por um fator de peso da radiação, que é uma grandeza adimensional,  $W_R$ , relativa ao tipo e energia da radiação incidente  $R$ , ou seja (TAUHATA et al, 2013):

$$H_T = D_{T,R} \cdot W_R \quad (2)$$



A dose equivalente é expressa em  $J.kg^{-1}$  no Sistema Internacional de Unidades (SIU). Para evitar confusão com o conceito de dose absorvida, a unidade especial para a dose equivalente recebe o nome de *sievert* (Sv).

Os fatores de peso da radiação  $W_R$  são fornecidos pela ICRP 60 com base nos valores da Eficácia Biológica Relativa (RBE) da radiação na indução de efeitos estocásticos a baixas doses. Os valores de  $W_R$ , apresentados na tabela abaixo, são relacionados à radiação externa incidente sobre o corpo ou à radiação emitida por radionuclídeos incorporados.

TAB. 1.1 – Valores dos fatores de peso da radiação  $W_R$  (CNEN: Posição Regulatória 3.01/002, 2011).

Tipos e intervalos de energia <sup>[a]</sup>		Fator de peso da radiação <sup>[b]</sup>
Fótons, todas as energias		1
Elétrons e múons, todas as energias <sup>[c]</sup>		1
Nêutrons <sup>[d]</sup> , energia:	<10keV	5
	>10keV a 100keV	10
	>100keV a 2 MeV	20
	>2MeV a 20MeV	10
	>20MeV	5
Prótons, (não de recuo) energia	>2MeV	5
Partículas alfa, fragmento de fissão e núcleos pesados		20

[a] Valores para outras radiações podem ser obtidos pelo Anexo A da ICRP-60.

[b] Todos os valores se relacionam à radiação incidente no corpo ou, para fontes internas, emitida pela fonte.

[c] Excluindo elétrons Auger emitidos por radionuclídeos ligados ao DNA, para os quais se aplicam considerações especiais de microdosimetria.

[d] Para consistência nos cálculos, pode-se usar a seguinte expressão para a estimativa de  $W_R$  para nêutrons, em função da energia:  $w_R = 5 + 17 \exp[-(\ln 2 \epsilon)^2 / 6]$ , onde  $\epsilon$  é a energia em MeV.

### 1.1.3 Dose Efetiva (E)

O conceito de dose efetiva nasceu da necessidade de quantificar a dose no corpo considerando a radiosensibilidade de cada órgão, de forma a relacioná-la ao risco, que é a base da proteção radiológica. Essa grandeza denomina-se dose efetiva e é definida pela relação:

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3)$$

Onde  $H_T$  é a dose equivalente no tecido  $w_T$  é o fator de peso de ponderação do tecido  $T(\sum_T W_T = 1)$ (ICRP 103, 2007). No Sistema Internacional de Unidades, a dose efetiva é expressa em sievert (Sv).

## 1.2 Liberações do material radioativo para a atmosfera

A atmosfera é uma das principais vias pela qual o material de um Dispositivo de Dispersão Radiológica (RDD) pode se dispersar em grandes áreas e atingir diversos compartimentos ambientais. Os efeitos sobre os humanos e a biosfera decorrentes de liberações atmosféricas de material radioativo devem ser avaliados levando-se em consideração dados meteorológicos e características específicas do cenário. Em um dispositivo RDD, o material pode ser lançado a grandes distâncias por conta da força da explosão e atingir camadas mais elevadas na atmosfera, onde o vento pode alterar sua velocidade e, dependendo da altura atingida na explosão, o material pode alcançar correntes de circulação local e global, facilitando a sua dispersão para locais bem distantes do local do evento inicial (YVES, 2014).

Geralmente as liberações atmosféricas ocorrem entre a superfície do solo e a “camada limite planetária” que varia de 200m a 2000m acima da superfície (ROCHEDO, 2005). Os materiais radioativos liberados para a atmosfera são transportados pelo vento e dispersos por processos naturais de difusão atmosférica turbulenta (ROCHEDO, 2005).

A camada limite próxima à superfície do solo é a mais relevante na liberação e dispersão atmosférica, possuindo grande variação de velocidade e de turbulência. O

gradiente vertical de temperatura tem grande influência sobre o fenômeno de turbulência. Nos casos em que a temperatura diminui a uma taxa maior que  $0,01^{\circ}\text{C}/\text{m}$ , a atmosfera apresenta-se instável e os movimentos das camadas de ar verticais são mais intensos (ROCHEDO, 2005).

Para um estudo sobre liberações atmosféricas, é necessário se conhecer com precisão dados como: (a) velocidade dos ventos, (b) chuva, (c) insolação, (d) estimativa da população no momento da dispersão e (e) características físicas dos tipos de construções na região.

Um modelo matemático semi-empírico bastante adotado para estimar a dispersão atmosférica é o da pluma gaussiana. É considerado de análise e resolução rápida, embora ofereça limitações para um estudo mais realista. O modelo tem sido amplamente utilizado e validado pela comunidade científica e, ainda, é o mais utilizado para os cálculos iniciais de dispersão atmosférica (YVES, 2014). Devido à sua facilidade de aplicação, é uma forte ferramenta para análise em curto intervalo de tempo, além de produzir resultados que são compatíveis com dados experimentais. O método é bastante conservativo e por isso oferece condições de agravamento do cenário, considerando as piores hipóteses, apresentando-se como uma forma de abordagem interessante em uma primeira aproximação, pois avalia as condições de maior rigor que possam ser enfrentadas.

### **1.2.1 Fontes Radioativas**

Ações assimétricas (terrorismo) são difíceis de prever e podem gerar consequências devastadoras. Nenhum país pode se considerar livre de ações dessa natureza. Há notada preocupação mundial na aquisição de material radioativo para esses fins. O Banco de Dados de Incidentes e Tráfico (*Incident and Trafficking Database, ITDB*) fornecido pela Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), controla regularmente incidentes envolvendo material nuclear, reportando para os países membros. A figura 1.1 apresenta Incidentes confirmados envolvendo posse não autorizada de material radioativo, reportados ao ITDB no período entre 1993-2013.

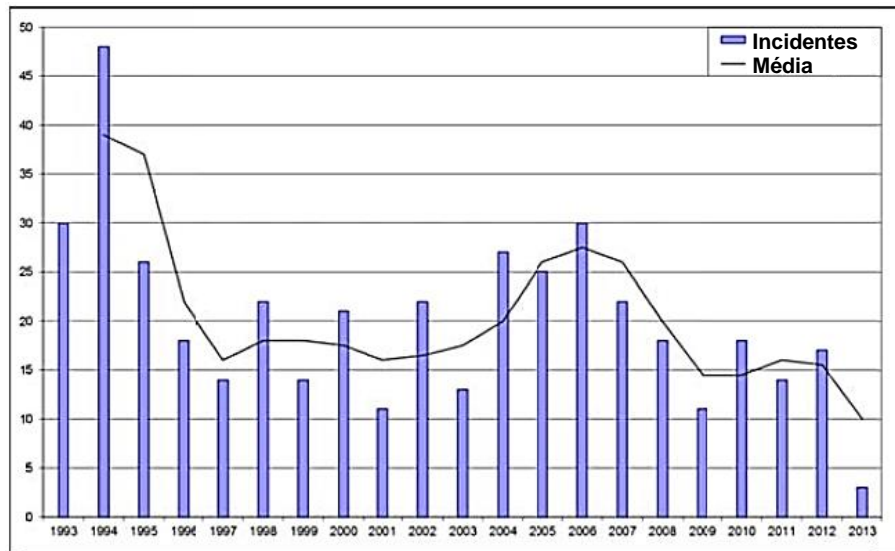


Fig. 1.1 – Incidentes confirmados envolvendo posse de material radioativo não autorizado reportados ao ITDB no período entre 1993-2013. Fonte: IAEA (ITDB) 2014.

Incidentes incluídos neste grupo envolvem a perda ou roubo de material nuclear ou fontes radioativas de instalações nucleares ou durante o transporte do material. Furtos e perdas podem marcar o início de um incidente e são indicativos de vulnerabilidades dos sistemas de segurança e controle na instalação de origem (IAEA, 2014). Essas informações coletadas são de interesse na implementação de medidas de segurança e regularização por parte dos governos de modo a impor melhores condições de uso, depósito, transporte e disposição dos materiais radioativos sob sua guarda ou tutela. A maior parte dos furtos e perdas relatados ao ITDB envolve fontes radioativas que são usadas em aplicações médicas ou industriais. Dispositivos contendo fontes radioativas podem ser atrativos pelo alto valor de revenda ou de sucata de metal (IAEA, 2013).

A AIEA identificou fontes radioativas usadas em radiografia industrial, radioterapia, irradiadores industriais e geradores termo elétricos como os mais significativos com relação à segurança física e radiológica, pois estas contêm grandes quantidades de material radioativo (IAEA, 2009).

TAB. 1.2 – Fontes radioativas comerciais mais significativas (FERGUSON et al. 2003)

Isótopo	Comumente Utilizado	Forma	Meia-Vida (anos)	Emissão Primária
Cs-137	Teleterapia, instalações de esterilização	Sólido e pó	30,1	$\beta$ e $\gamma$
Co-60	Teleterapia, radiografia industrial e instalações de esterilização	Sólido e metal	5,3	$\beta$ e $\gamma$
Ir-192	Radiografia industrial e braquiterapia	Sólido e metal	0,2	$\beta$ e $\gamma$
Ra-226	Braquiterapia de baixas doses	Sólido e metal	1600	$\alpha$ e $\gamma$
Sr-90	Geradores Termoelétricos	Sólido e pó	28,8	$\beta$
Am-241	Indústrias de extração de madeira	Sólido e pó	433	$\alpha$
Pu-238	Fontes de energia para marca-passos e fontes de pesquisa	Sólido e pó	88	$\alpha$

### 1.3 Intervenção em Situações de Emergência

Em situações onde ocorrem liberação de material radioativo, decisões rápidas são necessárias. Medidas de proteção urgentes incluem: (a) abrigagem, (b) evacuação, (c) administração de comprimidos de iodo estável e (d) interdições de alimentos. Essas medidas são apoiadas por uma avaliação das condições de exposição externa e das doses de inalação sobre a população. As estimativas normalmente são dependentes das concentrações dos contaminantes no ar e no solo e consideram a liberação radioativa a favor do vento.

A Posição Regulatória 3.01/006:2011 da Comissão Nacional de Energia Nuclear CNEN trata das medidas de proteção e critérios de intervenção em situações de emergência. Estabelece que para proteger os indivíduos do público, devem ser observados os níveis de intervenção e ação, para diferentes ações protetoras ou

remediadoras e estas devem ser justificadas nos casos em que os resultados indiquem probabilidade de danos à saúde.

A eficácia das medidas de proteção dependem do tipo de radionuclídeo liberado e da natureza das vias de exposição. Os níveis de intervenção preestabelecidos devem ser reavaliados no momento de sua implementação em função das condições existentes, desde que não sejam excedidos os níveis de dose e, nesse caso, a intervenção deve ocorrer em qualquer circunstância (CNEN 3.01/006:2011).

Devido à diferença entre os efeitos determinísticos e estocásticos, dois tipos de doses são necessários ao se discutir as ações de proteção: a) dose projetada e b) dose evitada. A dose projetada é utilizada para expressar o risco de efeitos determinísticos e a dose evitada para efeitos estocásticos.

A definição de dose projetada é compreendida como a dose prevista que um indivíduo receberia, em um determinado período de tempo  $T_d$ , se nenhuma ação protetora fosse implementada, considerando as previsões de evolução do incidente, a probabilidade de liberações de materiais radioativos para o meio ambiente e as condições de dispersão existentes (CNEN 3.01/006:2011).

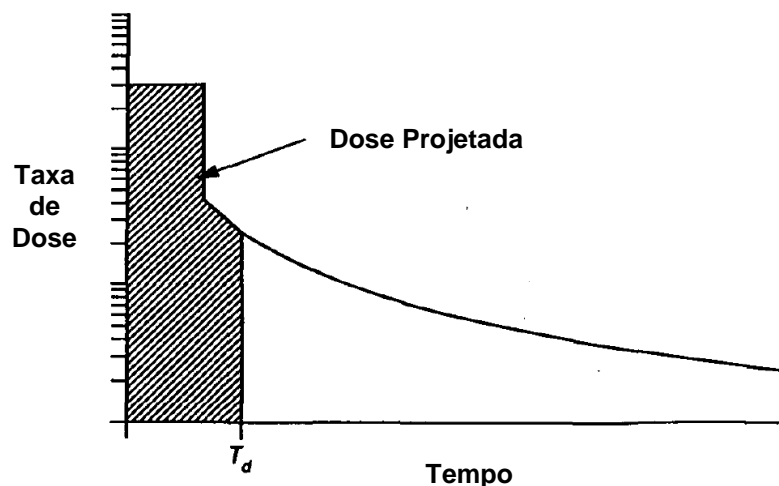


Fig. 1.2 – Representação Gráfica do Conceito de Dose Projetada. Fonte: adaptada de IAEA 1994.

As ações de intervenção tem o objetivo de orientar as medidas de proteção necessárias para evitar ou reduzir a exposição da população à radiação, estas ações devem seguir níveis expressados em termos da dose que pode ser evitada num período de tempo  $\Delta T$ , correspondente à duração de uma ação protetora, ou seja, é a taxa de dose à qual os indivíduos estariam sujeitos na ausência da medida

de proteção, integrada no período  $\Delta T$ , diminuindo-se a dose integrada à qual estariam sujeitos com a aplicação da medida de proteção (IAEA, 1994).

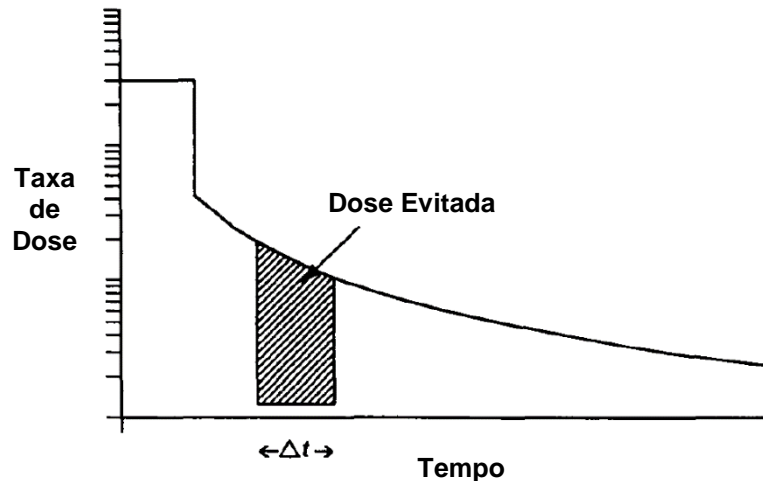


Fig. 1.3 – Representação Gráfica do Conceito de Dose Evitável. Fonte: adaptada de IAEA 1994.

Os riscos, dificuldades, perturbações e custos financeiros que essas medidas de proteção implicam são muito diferentes e dependem de muitos fatores, incluindo a localização e as condições meteorológicas no momento do evento.

Os três princípios gerais que formam a base para a tomada de decisão sobre a intervenção são (IAEA, 1994):

- a) Evitar graves efeitos determinísticos;
- b) A intervenção deve ser justificada e a medida protetora deve alcançar uma resposta positiva para a saúde da população;
- c) Os níveis de intervenção devem ser otimizados.

### 1.3.1 Medidas de Proteção Imediatas

A intervenção em situações de emergência radiológica pode ser dividida em três fases: (a) inicial, (b) intermediária e (c) final. Os níveis de intervenção recomendados para as medidas de proteção urgentes são apresentados na tabela 1.3.

TAB. 1.3 – Guia de Ações de Proteção (PAG's) para incidentes envolvendo RDD (EPA, 2013)

<b>Fase</b>	<b>Ação de Proteção</b>	<b>Guia de Ação e Proteção</b>
Inicial	Limite de Exposição dos Trabalhadores em Emergência	50 mSv <sup>(1)</sup> (ou maior sob circunstâncias excepcionais)
	Abrigagem	10 a 50 <sup>(2)</sup> mSv de dose projetada
	Evacuação	10 a 50 <sup>(3)</sup> mSv de dose projetada
	Administração de Drogas Profiláticas	Iodo de potássio <sup>(4)</sup>
Intermediária	Limitar Exposição dos Trabalhadores	50 mSv/ano
	Relocação do Público	20 mSv de dose projetada no primeiro ano; 5 mSv/ano subsequente de dose projetada
	Interdição no consumo de alimentos produzidos na área	5 mSv/ano de dose projetada
	Interdição no consumo de água	5 mSv/ano de dose
Final	Ações de limpeza final	PAG baseada na otimização das ações de resposta

<sup>1</sup> Em casos em que o controle da quantidade de radiação não está avaliável ou, devido à magnitude do incidente, não são suficientes, doses acima de 50 mSv podem ser inevitáveis.

<sup>2</sup> Normalmente deverá iniciar em 10 mSv, entretanto, a abrigagem pode começar em níveis mais baixos, se vantajosa.

<sup>3</sup> Normalmente deverá iniciar em 10 mSv.

<sup>4</sup> Considerada nos casos em que a situação de emergência possa ocasionar a incorporação de iodo radiativo, evitando absorção do material pela tireoide.

As ações de proteção de abrigagem e evacuação, devem ser implementadas com urgência de forma a proteger o público da pluma de contaminação e



complementadas por ações de controle de acesso, proteção respiratória dos respondedores e descontaminação do público se for o caso.

A abrigagem tem o objetivo de reduzir a exposição à contaminação suspensa no ar e ao material radioativo depositado em superfícies. A população deve permanecer no interior de prédios, vedar portas e janelas e desligar o sistema de ventilação. Essa medida deve ser adotada quando uma evacuação rápida não for possível devido a condições ambientais adversas, restrições por saúde, dificuldades para locomoção de pessoal ou restrições físicas de outra natureza.

A definição de evacuação pode ser descrita como a retirada urgente de pessoas de seus locais para fora do campo de radiação ou do possível caminho da nuvem radioativa (CNEN, 2011).

#### **1.4 Código Computacional HotSpot**

O código *HotSpot Health Physics 3.0* desenvolvido pelo laboratório americano *Lawrence Livermore National Laboratory - LLNL* foi concebido para prover uma ferramenta metodológica computacional rápida e portátil para avaliar incidentes envolvendo material radioativo (HOMANN, 2013).

O HotSpot apresenta um modelo conservativo para estimar a dose e a concentração de radionuclídeos como resultado da liberação de materiais radioativos na atmosfera (SHIN and KIM 2009; THIESSEN et al, 2009).

O código utiliza um modelo semi-empírico gaussiano para calcular a dispersão do material radioativo à medida que esse se desloca com os ventos na área impactada dependendo principalmente das condições climáticas. O modelo requer uma menor computação intensiva de dados e vem sendo utilizado por conta da interpretação simples que fornece, que é adequada a uma primeira aproximação da descrição do evento.

O HotSpot considera os seguintes parâmetros (HOMANN, 2013):

- (a) modelo de dispersão atmosférica;
- (b) condições meteorológicas (velocidade do vento, classe de estabilidade e 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.

(e) tempo (tempo de amostragem e tempo de exposição).

### 1.4.1 Modelo Gaussiano

O modelo gaussiano determina a concentração do dispersante em determinado ponto do espaço. A direção de transporte é dada pela direção do vento prevalecente no ponto de liberação e assume-se que as condições atmosféricas, uma vez determinadas, são constantes.

Os fenômenos de dispersão meteorológica e atmosférica que influenciam os padrões de contaminação são resumidos a seguir.

As equações do modelo Gaussiano estimam a concentração de um gás ou um aerossol em qualquer ponto do espaço, seguindo a equação:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (4)$$

Se a camada de inversão (L) excede  $\sigma_z$ , a equação a ser utilizada, com os mesmos parâmetros apresentados para a equação 4 torna-se:

$$C(x, y, z, H) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi}\sigma_y L u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \exp\left[-\frac{\lambda x}{u}\right] DF(x) \quad (5)$$

Onde C = concentração atmosférica integrada no tempo  $\frac{Ci.s}{m^3}$ , Q = atividade da fonte (Ci), H = altura efetiva de liberação (m),  $\lambda$  = 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),  $\sigma_y$  = desvio-padrão da distribuição da concentração integrada na direção perpendicular ao vento (m),  $\sigma_z$  = 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 é iniciada quando  $\sigma_z$  é 70% de  $L$  e finalizada quando são iguais. No intervalo dessa transição, os valores são interpolados linearmente para dar um valor mais realista, evitando variações abruptas em pequenos intervalos (HOMANN, 2013).

### 1.4.2 Deposição Seca

A velocidade efetiva de deposição é calculada pela razão do fluxo de deposição  $\frac{\mu Ci}{cm^2.s}$  pela concentração no ar próximo à superfície  $\frac{\mu Ci}{cm^3}$ . Gases, vapores e pequenos particulados são depositados na superfície e podem permanecer no solo durante muito tempo. Por esse motivo, a concentração na pluma resultante será menor devido à depleção de parte do material.

Para a maioria dos materiais, a velocidade de deposição é em torno de 1 cm/s (HANNA, 2002). No software são utilizadas duas metodologias de velocidade de deposição, uma para velocidade de partículas respiráveis com diâmetro aerodinâmicos menores que 10 microns e outra para partículas não respiráveis com diâmetro maior que 10 microns. O *default* no software para essas velocidades é: (a) respirável = 0,3 cm/s e (b) não respirável = 8,0 cm/s (HOMANN, 2013).

A quantidade de material que sofre depleção com o aumento da distância é calculado pelo software HotSpot usando o fator modelado por *Van der Hoven* (1968).

$$DF(x) = \left[ \exp \int_0^x \frac{1}{\sigma_x(x) \exp \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{H}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} \right]^{-\frac{v}{u} \sqrt{\frac{2}{\pi}}} \quad (6)$$

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

### 1.4.3 Ressuspensão

O efeito de ressuspensão é considerado no software, sendo determinado na altura de 2 metros do solo (em uma velocidade média de 2m/s). Caso a velocidade do vento seja acima de 3 m/s, tal fator é ajustado segundo a equação 7 (HOMANN, 2013):

$$RF(u) = RF \cdot \left(\frac{u}{3}\right)^2 \quad (7)$$

Onde  $RF$  é o fator de ajuste e  $u$  é a velocidade do vento. A definição do fator de ressuspensão é a razão da concentração do material no ar em função da concentração no solo, apresentando, portanto, dimensão igual a  $m^{-1}$ .

### 1.4.4 Classificação de Estabilidade Atmosférica

O código permite ao usuário a classificação do deslocamento das camadas de ar no sentido vertical em: (a) estáveis, (b) instáveis e (c) neutras. (YVES, 2014). Essas categorias referem-se a como a parcela de ar reage quando é dispersa de forma adiabática na direção vertical (HOMANN, 2013).

O desvio-padrão na direção do vento horizontal está relacionado com as Categorias de Estabilidade Atmosférica de Pasquill, admitido como um sistema de classificação recomendado pela *Nuclear Regulatory Commission (NCR)* e definido como segue (notação Pasquill-Gifford): (a) A Muito Instável ( $\sigma_\theta = 25^\circ$ ), (b) B

Moderadamente Instável ( $\sigma_\theta = 20^\circ$ ), (c) C Pouco Instável ( $\sigma_\theta = 15^\circ$ ), (d) D Neutro ( $\sigma_\theta = 10^\circ$ ), (e) E Moderadamente Estável ( $\sigma_\theta = 5^\circ$ ) e (f) F Muito Estável ( $\sigma_\theta = 2.5^\circ$ ).

A tabela 1.4 contém os critérios utilizados para estimar as seis classes de estabilidade.

TAB. 1.4 – Condições Meteorológicas usadas para definir as Categorias de Estabilidade Atmosférica de A-F (Homann, 2013)

<b>Velocidade do vento (m/s)</b>	<b>Alta insolação no céu</b>	<b>Baixa insolação no céu ou nublado</b>	<b>Noturno</b>
< 2	A	B	F
2 – 3	A	C	E
3 – 4	B	C	D
4 – 6	C	D	D
> 6	C	D	D

Além da velocidade dos ventos, outros fatores influenciam nas diferenças entre as classes de estabilidade como o perfil de temperatura vertical, a altura da camada de mistura e o nível de insolação.

#### 1.4.5 Cálculo de $\sigma_y$ e $\sigma_z$

Uma vez determinada a classificação de estabilidade atmosférica, o código HotSpot utiliza equações para estimar os valores de desvio-padrão da distribuição para dois tipos de terrenos: (a) urbano e (b) padrão.

Em áreas urbanas, há o aumento de dispersão da pluma em estruturas com características de retenção como asfalto e concreto, por esse motivo, apresentam concentrações menores que as do terreno padrão (HOMANN, 2013).

O modelo mais utilizado e que se adapta melhor às situações abordadas pelo HotSpot é o modelo de *Briggs*, para o cálculo do coeficiente de dispersão vertical em função da distância  $x$ . Esse considera um valor diferente para cada classe de

estabilidade atmosférica e possibilita cálculo para áreas urbanas ou padrão (tabelas 1.5 e 1.6).

TAB. 1.5 – Coeficientes de difusão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para terreno padrão (Homann, 2013)

<b>Classe de Estabilidade</b>	<b><math>\sigma_y</math> (m)</b>	<b><math>\sigma_z</math>(m)</b>
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	$\frac{0,06x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,030x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$
F	$\frac{0,04x}{\sqrt{1 + 0,0001x}}$	$\frac{0,016x}{\sqrt{1 + 0,0003x}}$

TAB. 1.6 – Coeficientes de difusão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  para terreno urbano (Homann, 2013)

<b>Classe de Estabilidade</b>	<b><math>\sigma_y</math> (m)</b>	<b><math>\sigma_z</math>(m)</b>
A-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-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 1.4 e 1.5 pode-se verificar representações gráficas para o modelo de Briggs:

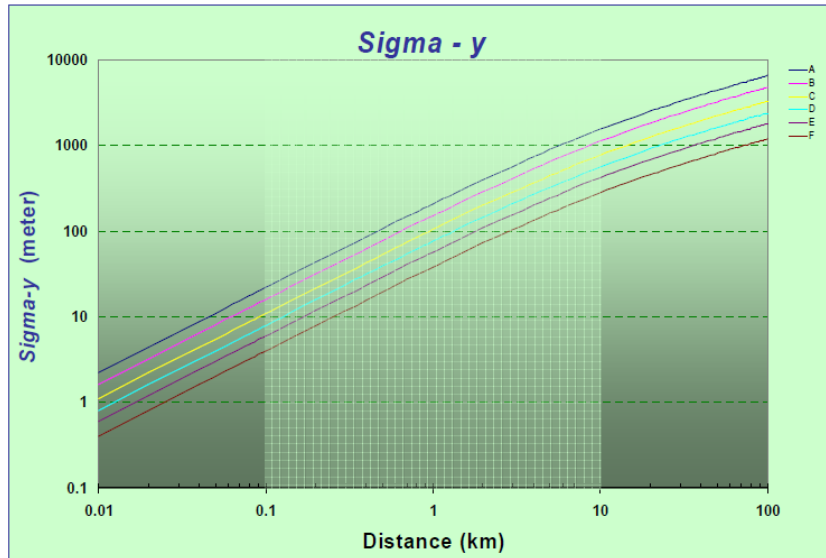


Fig. 1.4 – Representação Gráfica das equações para  $\sigma_y$  em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F (Terreno Padrão).Fonte: Homann 2013.

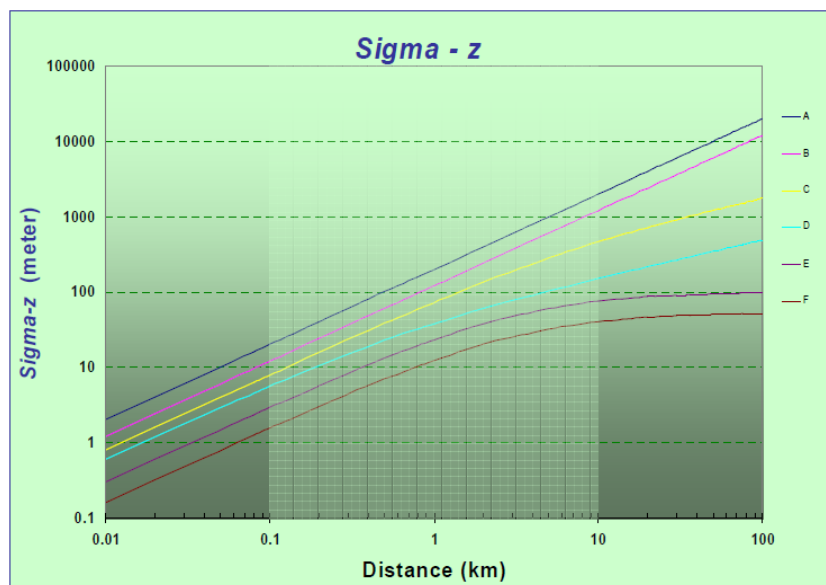


Fig. 1.5 – Representação Gráfica das equações para  $\sigma_z$  em função da distância x para as classes de estabilidade de A a F (Terreno Padrão).Fonte: Homann 2013.

#### 1.4.6 Profundidade da camada de mistura

A parte da troposfera que sofre influências diretamente da superfície do solo é denominada camada limite atmosférica, sendo caracterizada pelas trocas verticais:

a) de calor, b) vapor de água e c) momento entre o solo e a atmosfera. Essas trocas dependem da rugosidade do solo, da hora do dia, estação do ano e da cobertura de nuvens. A camada convectiva ou de mistura é uma subcamada de extrema importância dentro da camada limite, sendo essa caracterizada por uma grande movimentação vertical das parcelas de ar.

A troca de turbulência na altura da camada de mistura é, portanto, o parâmetro de dispersão vertical  $\sigma_z$ , sendo mantida constante ao atingir o valor  $\sigma_z$ , máx. Existe relação entre a altura de mistura  $h_{mis}$  e  $\sigma_{z\text{máx}}$  (Radiation Protection Division, 2002) sendo apresentada na equação 8:

$$\sigma_{z\text{máx}} = \sqrt{\frac{2}{\pi}} h_{\text{máx}} \approx 0,8h_{\text{mis}} \quad (8)$$

A profundidade da camada de mistura pode se estender de algumas dezenas de metros à noite a alguns quilômetros durante um dia quente de verão e com poucas nuvens. Na tabela 1.7, os valores típicos da profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidade são apresentados.

TAB. 1.7 – Valores típicos de profundidade da camada de mistura para diferentes classes de estabilidades (Homann, 2013).

<b>Categoria de Estabilidade</b>	<b>Profundidade da Camada de Mistura (m)</b>
A	1600
B	1200
C	800
D	560
E	320
F	200

#### 1.4.7 Perfil de temperatura vertical



Dependendo do equilíbrio entre os diferentes processos de troca térmica, a estrutura vertical da camada limite atmosférica apresenta um gradiente positivo ou negativo de temperatura, que determina fortemente o movimento turbulento na atmosfera. A figura 1.6 mostra os perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas.

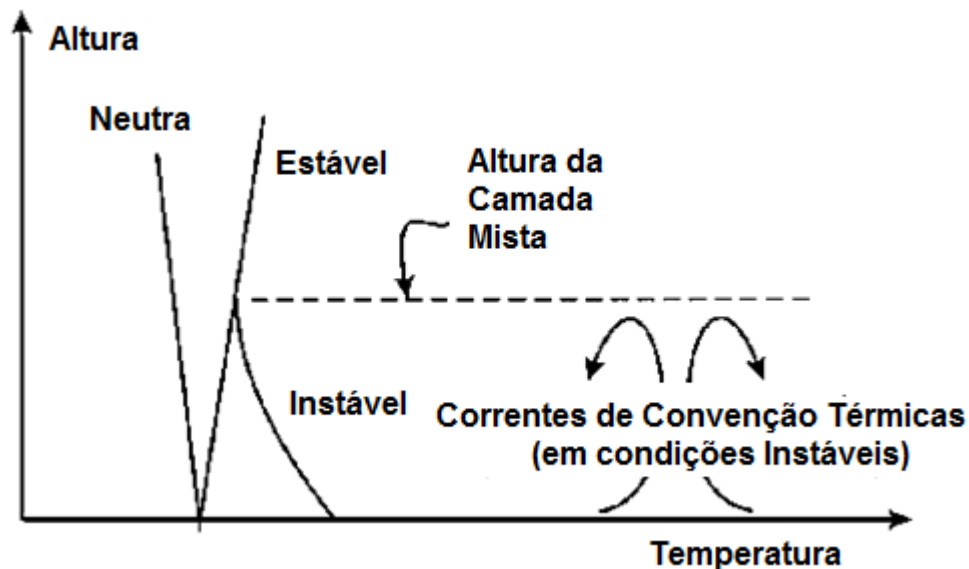


Fig. 1.6 – Perfis de temperatura vertical em diferentes condições atmosféricas. Fonte: adaptado de Radiation Protection Division, 2002.

Em situações meteorológicas de sol quente sem nuvens, com fracas velocidades dos ventos, a radiação solar aquece o solo, e como consequência, o ar perto do nível do solo. O ar quente tende a ir para regiões de menor temperatura, e consequentemente, o ar frio tende a descer, este processo é denominado corrente de convecção. Um movimento turbulento prevalece dentro da camada de mistura que apresenta como resultado o gradiente de temperatura fortemente negativo (tipicamente  $<1^\circ / 100 \text{ m}$ ), e o estado da atmosfera é chamado "instável" (Radiation Protection Division, 2002).

Situações com gradientes de temperatura indistintas de cerca de  $1^\circ/100\text{m}$  normalmente ocorrem em situações de maior velocidade dos ventos e durante a cobertura de nuvens altas, sendo geralmente chamadas de condições "neutras".

#### 1.4.8 Tempo de Amostragem

As equações para o desvio-padrão da distribuição gaussiana são representativas de uma observação em um período de 10 min. No HotSpot esse tempo médio é definido como tempo de amostragem da simulação, não podendo ser alterado. O valor de desvio-padrão é matematicamente relacionado com o padrão de 10 min por meio da seguinte equação (HANNA, 1982):

$$\sigma_{y'} = \sigma_y \left[ \frac{t}{10} \right]^{0,2} \quad (9)$$

Onde  $\sigma_{y'}$  é o desvio-padrão da concentração com tempo de amostragem de  $t$  em minutos e  $\sigma_y$  é o desvio no tempo de 10 min.

A concentração do material disperso na direção do vento diminui com o aumento do tempo de amostragem devido ao maior desvio-padrão na direção calculada e da maior dispersão na direção do vento.

As figuras 1.7 e 1.8 reproduzem o efeito do tempo de amostragem na concentração da pluma. Na figura 1.8 foi utilizado um tempo de amostragem de 1/50 segundos mostrando uma concentração da nuvem considerada instantânea; a segunda imagem, figura 1.9, foi realizada com amostragem de 5min apresentando uma nuvem de concentração no centro, suavizada devido à média dos valores instantâneos no período de 5 min (HOMANN, 2013).



Fig. 1.7 – Imagem com tempo de amostragem de 1/50s. Fonte: Homann 2013.



Fig. 1.8 – Imagem com tempo de amostragem de 5 minutos. Fonte: Homann 2013.

## 1.5 Modelo de Risco RERF

Os riscos decorrentes da exposição à radiação ionizante têm sido estudados pela *Radiation Effects Research Foundation* (RERF) e utilizados pelo Comitê Científico da ONU sobre os Efeitos da Radiação Atômica (UNSCEAR) em cálculos de risco de câncer para população, considerando a dose, o sexo e a idade do indivíduo exposto.

Em estudos epidemiológicos geralmente é utilizado o termo *relative risk (RR)* Risco Relativo, definido como a relação entre o risco de desenvolvimento da doença na população exposta e o risco de doença entre os não expostos. O modelo bioestatístico RERF utiliza um modelo de equações linear-quadráticas para estimar o risco relativo e foi desenvolvido a partir de estudos acerca de sobreviventes japoneses das bombas atômicas de Hiroshima e Nagasaki, o *Life Span Study (LSS)*.

O aumento de risco no desenvolvimento de câncer é o efeito de maior preocupação diante da exposição à radiação estudada em sobreviventes das bombas atômicas. Para outros tipos de cânceres (cânceres sólidos), exceto leucemia, foi observado um período de latência médio de cerca de 10 anos após a exposição.

Em geral, a exposição à radiação aguda em qualquer idade aumenta o risco de desenvolvimento de câncer no indivíduo de forma definitiva. Para o caso de cânceres sólidos e para uma dose de 1,0 Sv, o excesso de risco relativo é de cerca de 50% (Risco Relativo = 1,5).

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 esse motivo, a probabilidade de causa de desenvolvimento de câncer por radiação pode ser calculada, porém apresenta incertezas que estão associadas a vários fatores de risco paralelos (IAEA, 1996).

## **1.6 Código Computacional RESRAD-RDD**

*RESidual RADioactive material (RESRAD)* é um modelo computacional utilizado para estimativa de doses de radiação e risco envolvendo materiais radioativos residuais em determinada área. Mais especificamente, o RESRAD-RDD facilita a aplicação das diretrizes operacionais contidas no Relatório Preliminar sobre Diretrizes Operacionais desenvolvidas para Emergência, Preparação e Resposta a um incidente envolvendo um Dispositivo de Dispersão Radiológica – RDD (DOE/HS-001; ANL/EVS/TM/09-1) do departamento de Energia dos EUA.

A família RESRAD começou a ser desenvolvida em 1980 pelo laboratório Argonne (*Argonne National Laboratory*) e patrocinado pelo Departamento de Energia dos EUA. Seu modelo foi validado internacionalmente pela Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA EMRAS II em 2010.

O software é recomendado pela 'Guia de Ações Protetoras' (PAG's) (EPA, 2013) **Protective Action Guides And Planning Guidance For Radiological Incidents** no apoio a decisões sobre as ações que devem ser tomadas para proteger o público e trabalhadores de emergência quando responderem prontamente ou trabalhando na recuperação da área afetada por incidentes catastróficos envolvendo altos níveis de radiação.

Disponibiliza uma estimativa de parâmetros para os funcionários de resposta à emergência no desenvolvimento das diretrizes e planos operacionais. Para as fases iniciais e intermediárias de resposta, o software apresenta níveis de dose de radiação projetada utilizadas para orientar ações de proteção, evitando ou reduzindo danos à saúde pública como consequência de um cenário RDD.

As medidas preliminares da Guia de Operação são caracterizadas em sete grupos, cujo objetivo básico é a aplicação de medidas de emergência para a recuperação nas fases iniciais, intermediárias e a longo prazo. Ver figura 1.9.

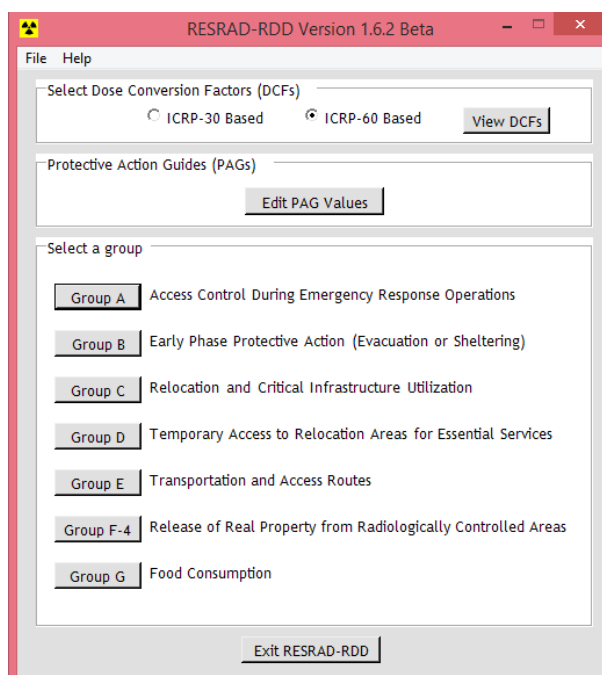


Fig. 1.9 – Grupos de Diretrizes Operacionais baseados nas PAG's. Fonte: (Dados de entrada do RESRAD-RDD)

As PAG's levam em consideração a dose projetada para um indivíduo a partir de uma liberação de material radioativo em que ações de proteção devem ser tomadas antes que a dose projetada seja atingida, preservando, assim, a segurança do público comum e do trabalhador em um incidente radiológico específico.

O HotSpot foi utilizado para estimar a TEDE e os níveis de concentração no solo que podem ser utilizados para estimar a dose efetiva em pessoas que entram na cena do incidente (após a pluma se dissipar) TECDOC 1162 (IAEA, 2000). A partir desses dados, foi possível calcular o risco relativo (RR) de desenvolvimento de câncer sólido, assim como a sua probabilidade de causalidade (PC), através das equações do modelo de risco RERF. O RESRAD-RDD foi utilizado para orientar em relação à redução de risco público e do pessoal de resposta à emergência. A figura 1.10 ilustra o conceito de convergência utilizado neste estudo.

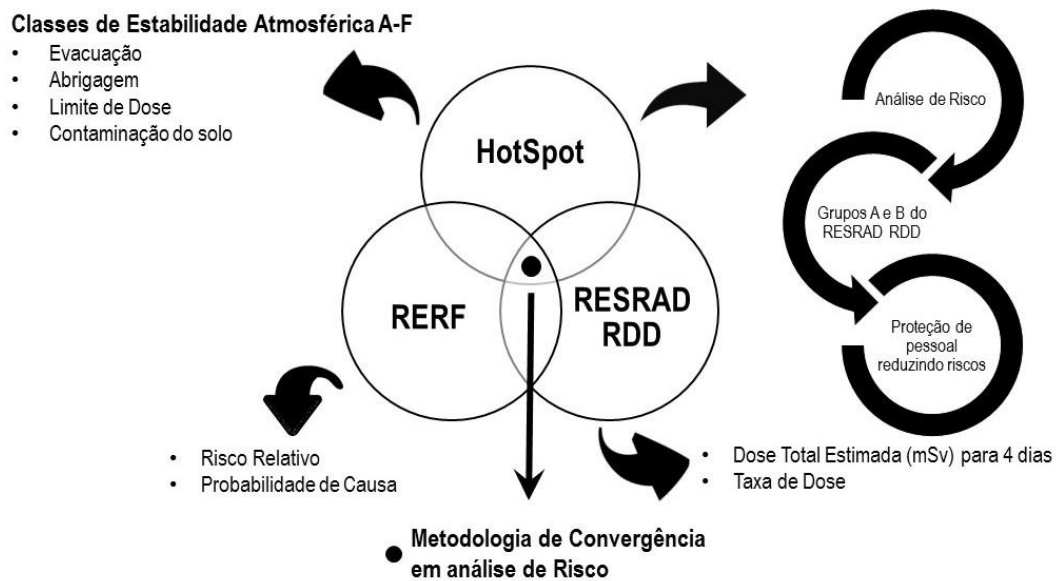


Fig. 1.10 – Metodologia de Convergência aplicada ao cenário RDD.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Desenvolver uma metodologia de convergência e análise de consequência sobre o risco de desenvolvimento de câncer sólido decorrente do enfrentamento de um cenário de terror proveniente da utilização de um RDD.

### **2.2 Objetivos específicos**

a) Desenvolver e utilizar uma metodologia de convergência, reunindo dados do software Hotspot e RESRAD-RDD para otimização do processo decisório e quanto ao emprego de pessoal nas medidas de proteção urgentes.

b) Estimar o risco de indução de câncer no modelo de Risco Relativo, ajustado para o tumor sólido, a partir de dados de saída do software HotSpot e do modelo bioestatístico RERF.

c) Construção de uma matriz de risco para o público exposto e para o pessoal envolvido na resposta ao RDD por meio da metodologia de convergência.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para este trabalho foi considerada a simulação de um RDD contendo Césio 137. Na primeira etapa foi utilizado o software HotSpot para estimar as doses recebidas nos indivíduos expostos e a contaminação no local do evento. Os valores de doses estimados foram utilizados no modelo bioestatístico RERF para estimar os riscos de detrimento por cânceres sólidos. Os dados referentes à contaminação no solo foram utilizados como dados de entrada no código computacional RESRAD-RDD, que facilita a aplicação das diretrizes operacionais, gerando estimativas para proteger o público e os trabalhadores em ações de emergência.

#### **3.1 Cenário de Exposição**

O cenário é caracterizado pelo tipo de material radioativo e pelas condições meteorológicas tais como: (a) velocidade e direção dos ventos, (b) estabilidade atmosférica, (c) índice de precipitação e (d) hora do dia, dentre outros.

Os dados meteorológicos utilizados nesta simulação foram obtidos a partir do site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), órgão do Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTi) do Brasil, onde foi considerada a média dos parâmetros ao longo do período de um mês de monitoração na área de interesse.

A área a ser analisada localiza-se no estado do Rio de Janeiro, coordenadas de Latitude 22°53'57.07" S Longitude 43°12'32.79" O, próxima à "Rodoviária Novo Rio", adjacente a rodovias e ao centro comercial da cidade.



### 3.2 Dados de entrada e parâmetros utilizados no HotSpot

Os parâmetros selecionados neste trabalho buscam a melhor condição para comparação com a realidade de uma emergência radiológica envolvendo um RDD.

A escolha do Césio 137 na simulação justifica-se pelo fato de ser muito reativo quimicamente e ser solúvel em água, possuindo alta mobilidade ambiental. O Césio 137 decai, através de decaimento beta menos, para o Bário 137, aproximadamente 94,6% do Bário produzido, apresenta-se em um estado isomérico, emitindo radiação gama com energia na ordem de 662 KeV para atingir a estabilidade.

No caso de contaminação interna, o Césio 137 distribui-se uniformemente após penetrar o organismo humano e, uma vez incorporado ao organismo, pode ser completamente absorvido por órgãos como pulmão e trato gastrointestinal (AFRRI, 2003).

Em adultos, 10% é excretado do organismo com uma meia-vida biológica de 2 dias, o restante é eliminado com uma meia-vida biológica de 110 dias (ARGONE, 2007), indicando que uma quantidade substancial desse material será excretada pelo organismo dentro de vários meses.

O Césio 137 pode ser utilizado em braquiterapia para tratar vários tipos de cânceres (braquiterapia é um método de radioterapia, em que as fontes seladas são inseridas no paciente de modo a prover irradiação constante).

Os parâmetros de maior consideração utilizados na simulação são listados na tabela 3.1.

TAB. 3.1 – Parâmetros de maior consideração utilizados na simulação (Dados de entrada do HotSpot).

<b>Dados de Entrada no HotSpot</b>	
Material e Taxa de Absorção	Cs-137 F (rápida) 30.0y (anos)
Material em risco (MAR) - é a quantidade total do radionuclídeo envolvido na liberação	3,7000E+14 Bq

Dose Total Efetiva Equivalente – TEDE	Dose Total Efetiva Equivalente = inalação + submersão + deposição no solo + ressuspensão.
Índice de Danos (DR), fração do MAR que é realmente impactado no cenário.	1,00 (100%)
Fração Liberada (ARF), fração do MAR que é liberada para a atmosfera.	1,00 (100%)
Fração Respirável (RF), fração de material aerossol que é respirável (diâmetro aerodinâmico (AD) $\leq$ 10 microns).	0,200 (20%)
Fator de Filtração (LPF), é a fração do MAR, que passa por algum mecanismo de confinamento ou de filtração. Para cenários de liberação livre, o Fator <b>Leakpath</b> é 1.	1,000
Material Respirável = $MAR \times DR \times LPF \times ARF \times RF$	7,40E+13 Bq
Material Não-Respirável = $MAR \times DR \times LPF \times ARF \times (1-RF)$	2,96E+14 Bq
Velocidade do Vento (h=10 m)	2,50 m/s
Material Explosivo	22,00 Libras de TNT $\approx$ 10kg
Tipo de Terreno	Padrão – Produz as estimativas mais conservativas.

Os valores de TEDE foram usados como entradas no modelo bioestatístico RERF a fim de se determinar o risco relativo de cânceres sólidos e a probabilidade de causalidade de seu desenvolvimento.

### 3.3 Risco Relativo para Câncer Sólido

O modelo bioestatístico RERF utiliza equações linear-quadráticas de Risco Relativo ajustadas para o tumor sólido, apresentadas da seguinte forma TECDOC 870 (IAEA, 1996):

$$RR = 1 + (\alpha_s D) \exp(\beta(e - 25)) \quad (10)$$

Onde  $\alpha_s$  é o excesso de risco linear em relação à idade específica por Sv,  $D$  é a dose em Sv,  $e$  é a idade no momento da exposição em anos e  $\beta$  é o coeficiente modificador em relação à idade na exposição.

TAB. 3.2 – Os parâmetros utilizados para o modelo de cânceres sólidos TECDOC 870 (IAEA, 1996).

Gênero	$\alpha_s$ (Sv <sup>-1</sup> )	$\beta$
Masculino	0.45	-0.026
Feminino	0.77	-0.026

Por conta da dificuldade em determinar se a causa do desenvolvimento de câncer está relacionada com a exposição à radiação, foi elaborado o conceito de probabilidade de causalidade (PC) pelo *U.S. National Institute of Health (NIH)*, que pode ser definida como a fração de risco de desenvolvimento de um determinado câncer atribuível a uma exposição prévia e assume a definição matemática dada pelo TECDOC 870 (IAEA, 1996):

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

Embora o risco relativo de câncer sólido induzido por radiação não seja frequentemente observado em dez ou mais anos após a exposição, foi apresentado um aumento relacionando a dose de radiação com a incidência de mortalidade por

câncer sólido nos sobreviventes das bombas atômicas sobre o Japão durante os cinco a dez anos seguintes (IAEA, 1996).

### 3.4 Dados de entrada e Parâmetros usados no RESRAD-RDD

O HotSpot estima os níveis de concentração no solo de radionuclídeos em Bq/m<sup>2</sup> para diferentes distâncias de contaminação e classes de estabilidades. Estes são os dados de entrada para o RESRAD-RDD, onde se pode obter parâmetros relacionados ao controle de acesso durante a resposta em situações de emergência e ações protetoras urgentes de fase inicial da resposta. A tabela 3.3 apresenta os grupos e subgrupos que foram utilizados nesta simulação.

TAB. 3.3 – Grupos e Subgrupos da Guia Operacional considerando ações protetoras de fase inicial (DOE/HS-001; ANL/EVS/TM/09-1 2009).

<b>Grupos</b>	<b>Subgrupos</b>
A – Acesso durante a operação de resposta a emergência	Medidas para salvar vidas ou propriedades; Demarcação da área feita pelo pessoal de resposta envolvido na ação de emergência
B – Ações protetoras de fase inicial	Evacuação Abrigagem

Sempre que possível, foram utilizados dados do local. Na ausência de dados reais, os valores *default* do código foram utilizados desde que considerados adequados ao cenário. Os parâmetros usados nas simulações com o RESRAD-RDD são apresentados a seguir:

Fator de Conversão de dose externa: ICRP 60

Fator de dose interna: ICRP 72 (adulto)

Fator de risco: FGR 13 Morbidade

Nuclídeo Césio 137 com concentração em kBq/m<sup>2</sup> em função da distância

Fator de correção de rugosidade para radiação externa: 1

Fator de ressuspensão ( $m^{-1}$ ):  $1 \times 10^{-6}$

Taxa de exposição para fator de conversão de dose (rem/R): 0,7

Taxa de Inalação ( $m^3/h$ ): 1,4

Taxa de Ingestão de particulados ( $m^2/h$ ):  $1,25 \times 10^{-5}$

### 3.5 Avaliação de Risco da Missão

O Risco da missão pode ser expresso como uma relação matemática entre ameaça e a vulnerabilidade, sendo representado pela equação 12:

$$\text{Ameaça} \times \text{Vulnerabilidade} = \text{Risco da Missão} \quad (12)$$

Para este estudo, a ameaça foi associada ao TEDE e a vulnerabilidade, multiplicando o RR (risco relativo) que considera a idade e sexo nos cálculos. Essa metodologia pode auxiliar a montar equipes minimizando os riscos ocupacionais individuais por meio da estimativa do Risco da Missão para um cenário envolvendo um RDD, calculado de acordo com a equação 13:

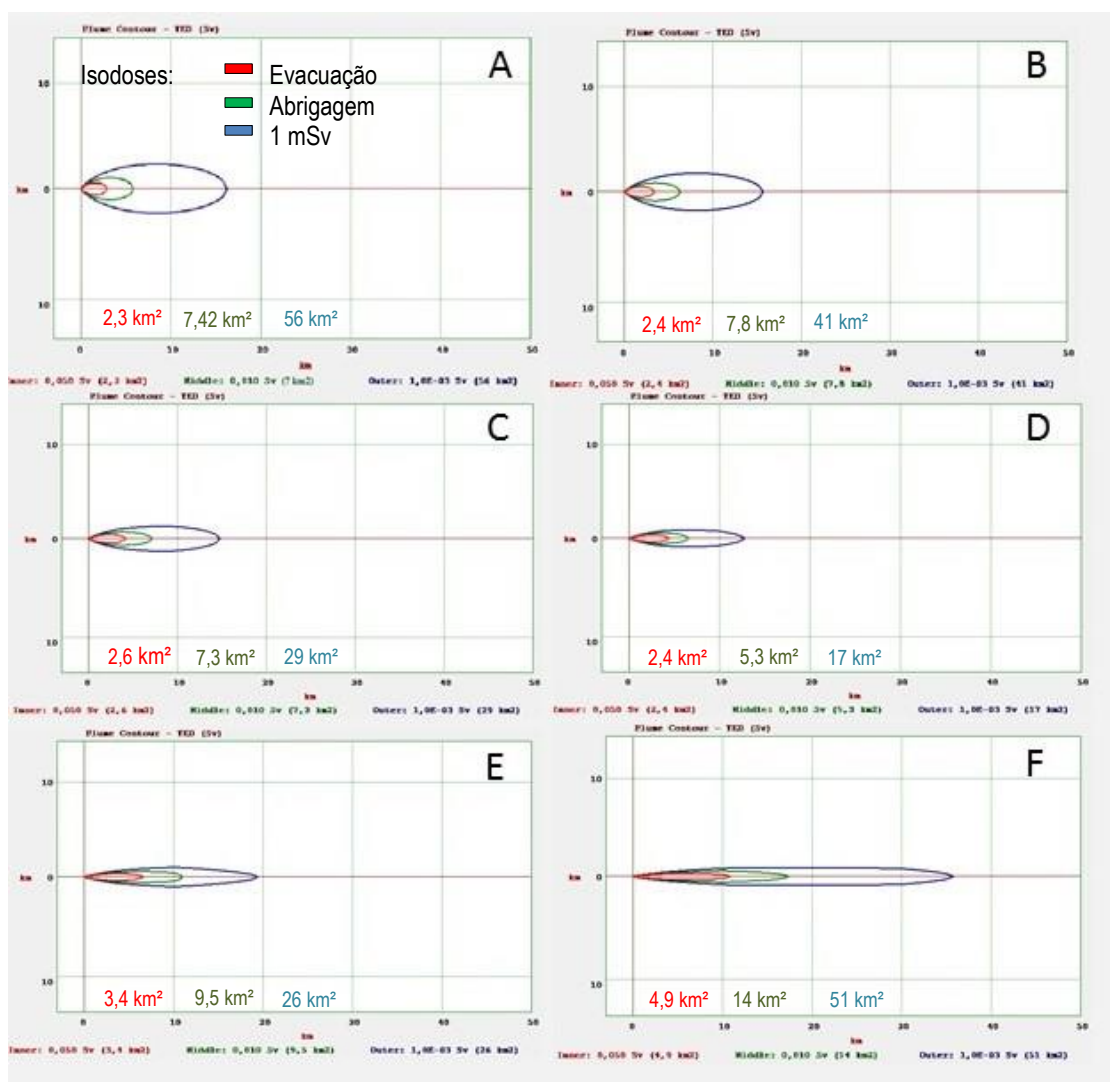
$$\text{Risco da Missão} = \left[ \frac{\text{TEDE (Sv)} \times \text{RR} \left( \frac{1}{\text{Sv}} \right) \times F\sigma_{\theta}}{\text{BgR}} \right] - 1 \quad (13)$$

Onde TEDE é a dose efetiva calculada pelo RESRAD-RDD, RR é o risco relativo de desenvolvimento de câncer, calculado de acordo com as equações de RERF,  $F\sigma_{\theta}$  é fator de desvio-padrão da direção do vento horizontal (adimensional) e BgR é o risco para dose de radiação *background* (Bg). A validação da equação está determinada pela situação de risco nulo para doses iguais ao “background” (para este caso o numerador se equipara a BgR).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 HotSpot

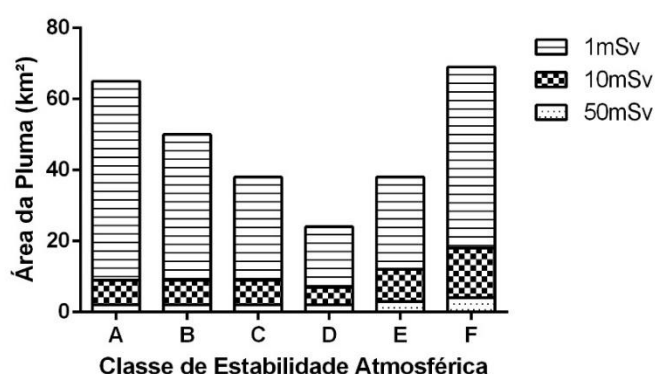
As plumas para as diferentes classes de estabilidades atmosféricas foram obtidas a partir da simulação utilizando o HotSpot. As condições de contorno para as curvas das isodoses interior, media e externa representam uma TEDE (dose total efetiva equivalente) de 50, 10 e 1 mSv, respectivamente.



**Fig. 4.1** – Plumias estimadas utilizando diferentes classes de estabilidade de A (extremamente instável) a F (extremamente estável). Fonte: HotSpot

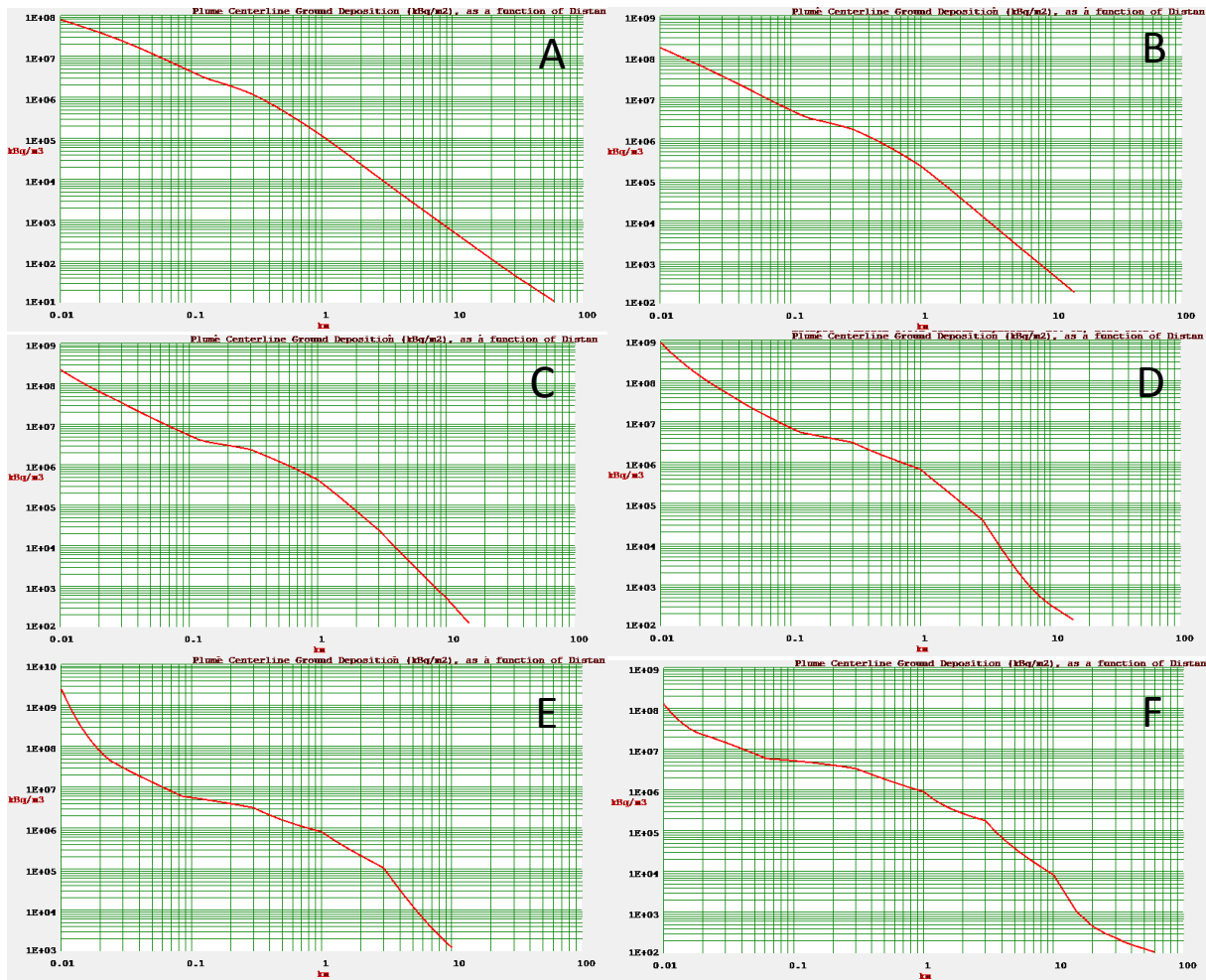
Considera-se os limites de doses de exposição do público como 1 mSv/ano (ICRP 60, 1991) e os limites estabelecidos para intervenção em situações de emergência. A ação de abrigo é recomendada caso a dose efetiva a ser recebida pela população num período máximo de 2 dias seja superior a 10 mSv. A ação de evacuação quando num período máximo de uma semana a dose efetiva recebida for superior a 50 mSv.

Analisando os resultados das simulações e as classes de estabilidade atmosférica, pode ser estimada a área da pluma (figura 4.2) onde seriam necessárias estas ações de proteção.



**Fig. 4.2** – Área da pluma (km<sup>2</sup>) em função da dose efetiva de exposição (mSv) e classe de estabilidade atmosférica.

Com o software HotSpot é possível estimar os níveis de concentração de material radioativo no solo em função da distância para as diferentes classes de estabilidade, esses dados podem ser observados na figura 4.3. Os resultados foram utilizados como parâmetros de entrada nos cálculos realizados com o código RESRAD-RDD, conforme metodologia proposta.

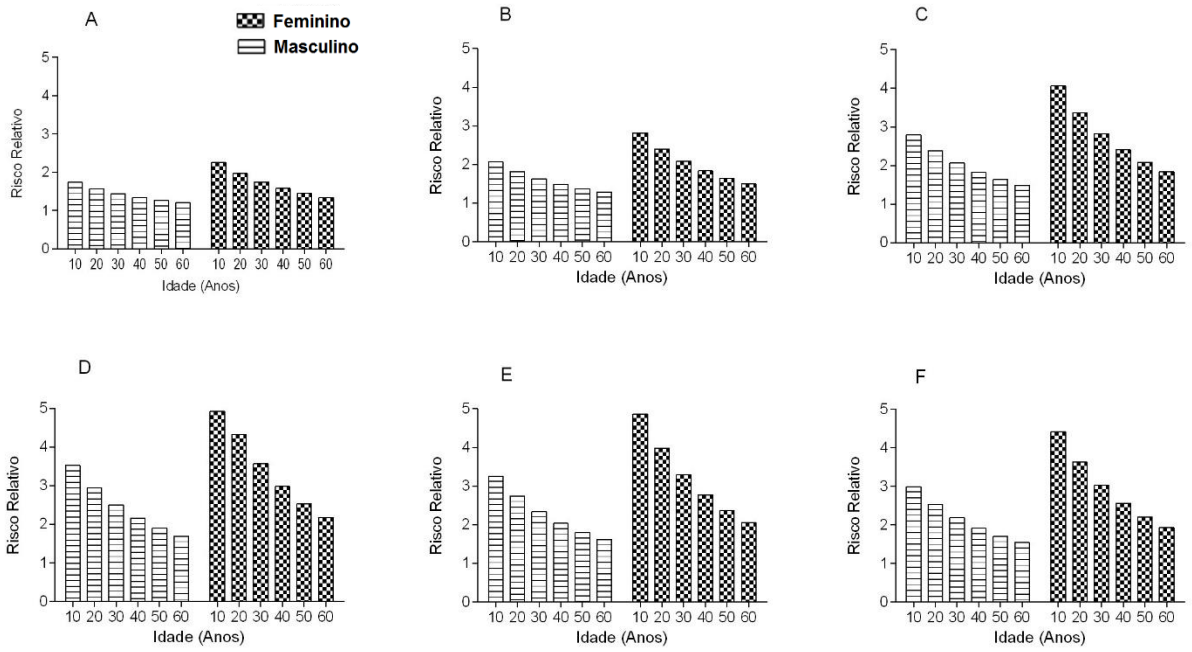


**Fig. 4.3** – Estimativas de níveis de concentração do solo (kBq/m<sup>3</sup>) para diferentes classes de estabilidade de A (extremamente instável) a F (extremamente estável). Fonte: Hotspot

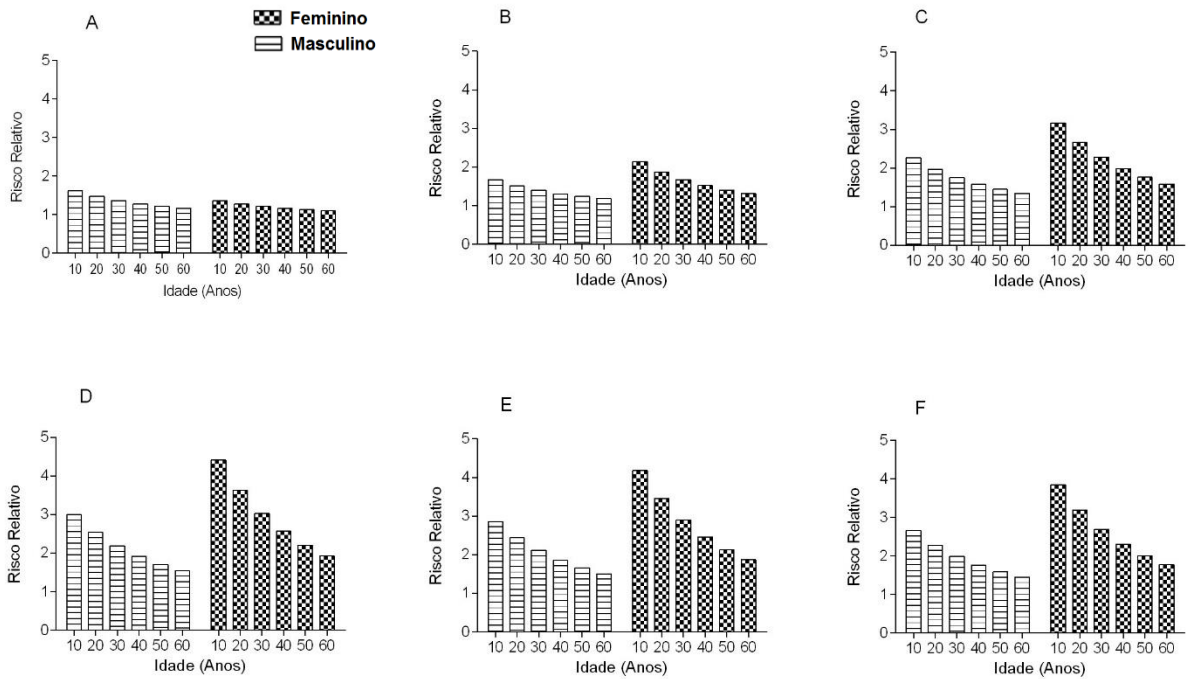
## 4.2 Estimativa do Risco para Câncer Sólido

Utilizando a aproximação do modelo RERF, ajustado para tumor sólido, em conjunto com a dose total efetiva equivalente (TEDE), obtida a partir dos dados de saída do HotSpot, foi possível estimar o Risco Relativo e a Probabilidade de Causa. As figuras 4.4, 4.5 e 4.6 ilustram graficamente o risco relativo (RR) para a incidência de cânceres sólidos, entendido como o risco adicional dos indivíduos expostos devido à deflagração do RDD em relação à população que não foi exposta. Estes valores dependem dos fatores: (a) dose, (b) idade no momento da exposição e (c) gênero.

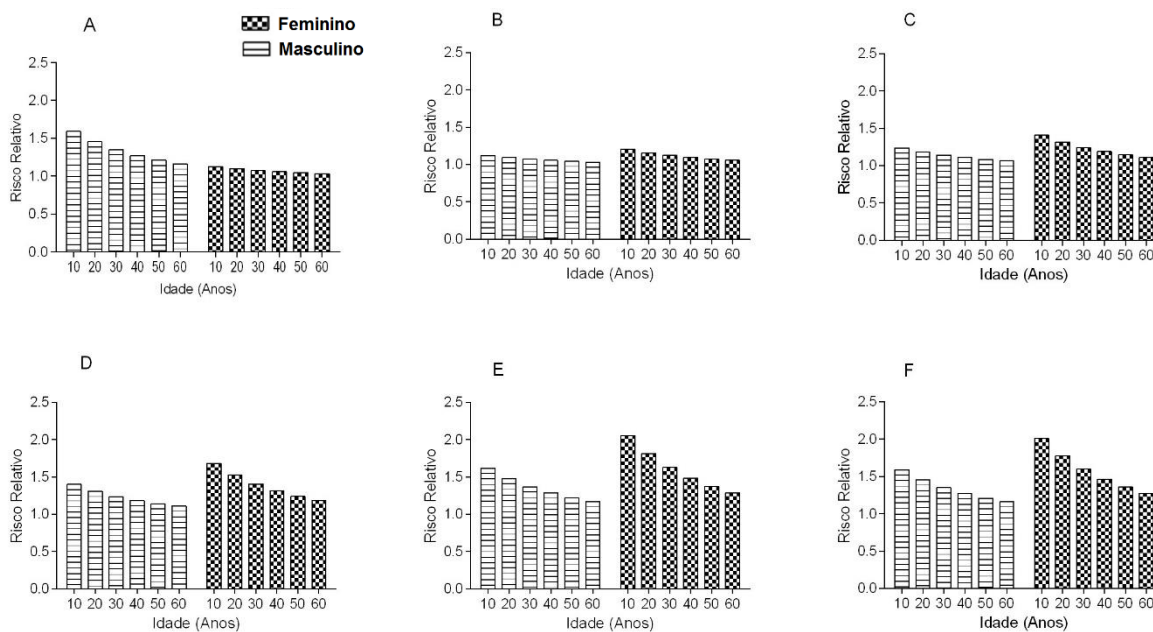




**Fig. 4.4** – Risco Relativo para uma distância de 800 metros a partir do local de detonação considerando diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F) e gênero.



**Fig. 4.5** – Risco Relativo para uma distância de 1000 metros a partir do local de detonação considerando diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F) e gênero.

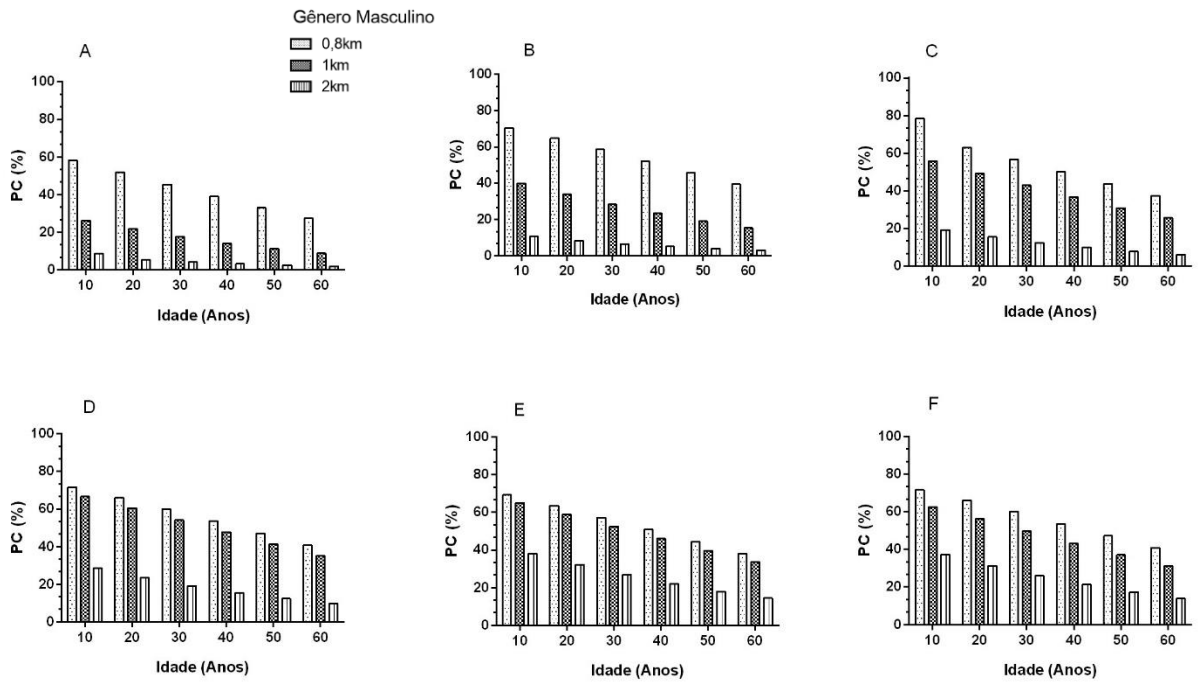


**Fig. 4.6** – Risco Relativo para uma distância de 2000 metros a partir do local de detonação considerando diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F) e gênero.

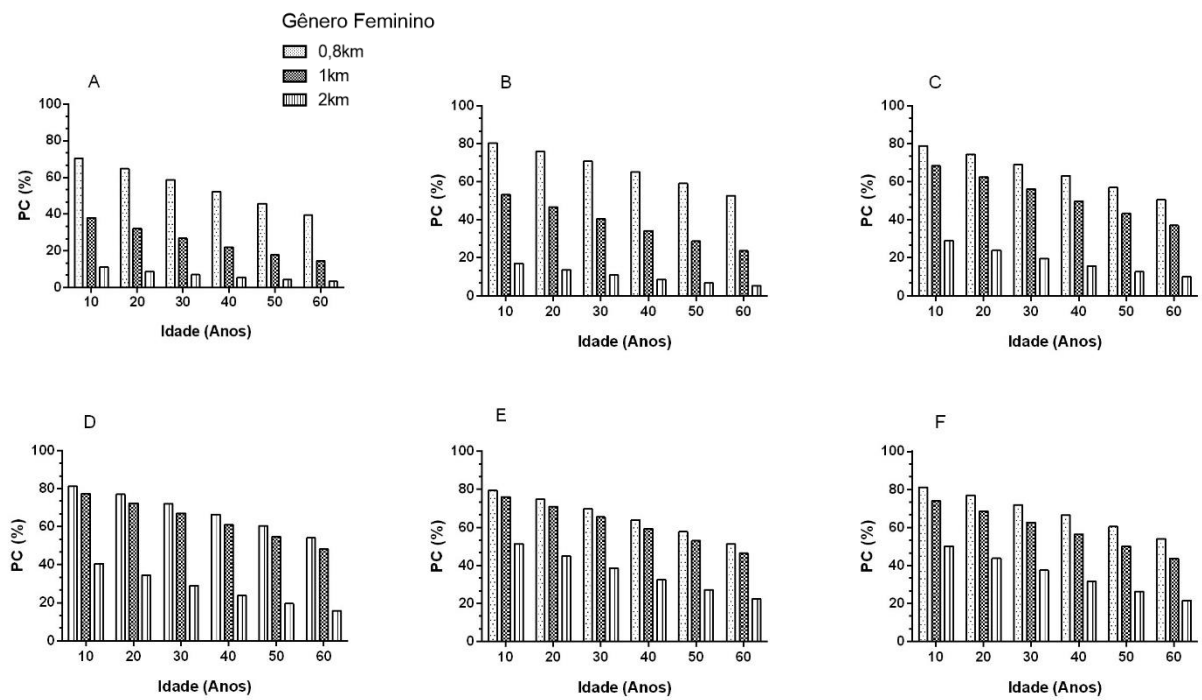
Os resultados de Risco Relativo das figuras 4.4 a 4.6 estão de acordo com a literatura, considerando que o risco estimado para o gênero feminino apresentou-se maior que para o gênero masculino, comportamento esperado na análise para cânceres sólidos. Outra verificação é o aumento do risco para indivíduos jovens.

Nas figuras 4.7 e 4.8, são apresentadas as estimativas de probabilidade de causalidade (PC), obtidas a partir da estimativa de risco relativo para o desenvolvimento de câncer sólido.

A análise foi realizada considerando que PC pode ser útil na condução do processo de tomada de decisão em casos de emergências radiológicas, uma vez que, contribuindo para a eficiência de resposta médica, facilitaria a triagem das pessoas expostas em função de informação sobre riscos futuros. A montagem das equipes com base nessas informações pode minimizar os riscos ocupacionais individuais.



**Fig. 4.7** – Gráficos comparativos de Probabilidade de Causalidade (PC) para o Gênero Masculino.



**Fig. 4.8** – Gráficos comparativos de Probabilidade de Causalidade (PC) para o Gênero Feminino.

O conjunto de dados dos sobreviventes das bombas atômicas fornecem evidências de diferenças entre os gêneros para cânceres sólidos, o risco relativo para o gênero feminino é geralmente maior que para o masculino (IAEA, 1996). Os resultados obtidos para probabilidade de causalidade não contradizem a literatura.

### **4.3 Estimativas e Riscos obtidos pelo RESRAD-RDD**

#### **4.3.1 Grupo A – Controle de Acesso Durante Operação de Resposta à Emergência**

O grupo “A” das guias de operação do código RESRAD-RDD foi desenvolvido para dar assistência ao processo de tomada de decisão e também quanto ao emprego de pessoal na resposta inicial de um incidente envolvendo um RDD.

Pode ser utilizado para limitar o tempo de acesso na área do evento, tendo como informação uma medida preliminar da contaminação, sendo apresentado como um guia para o tempo de permanência. Adicionalmente, pode ser utilizado como uma ferramenta para o estabelecimento de limites de controle radiológico, considerando, por exemplo, um critério de dose de 100 mSv para o trabalhador de emergência em operação.

Auxilia na implementação de ações, nas quais, se verifica que a dose inevitavelmente excederá o limite de exposição dos trabalhadores em emergência (doses >100mSv somente para voluntários) prevendo os riscos.

Os equipamentos de proteção respiratória (respiradores ou máscaras) são utilizados quando se manipula substâncias de risco químico ou biológico em situações de emergências. Os respiradores mais utilizados são: (a) de adução de ar (fornecem ar ao usuário, independentemente do ar ambiente) e (b) purificador de ar (purificam o ar ambiente antes de ser inalado pelo usuário).

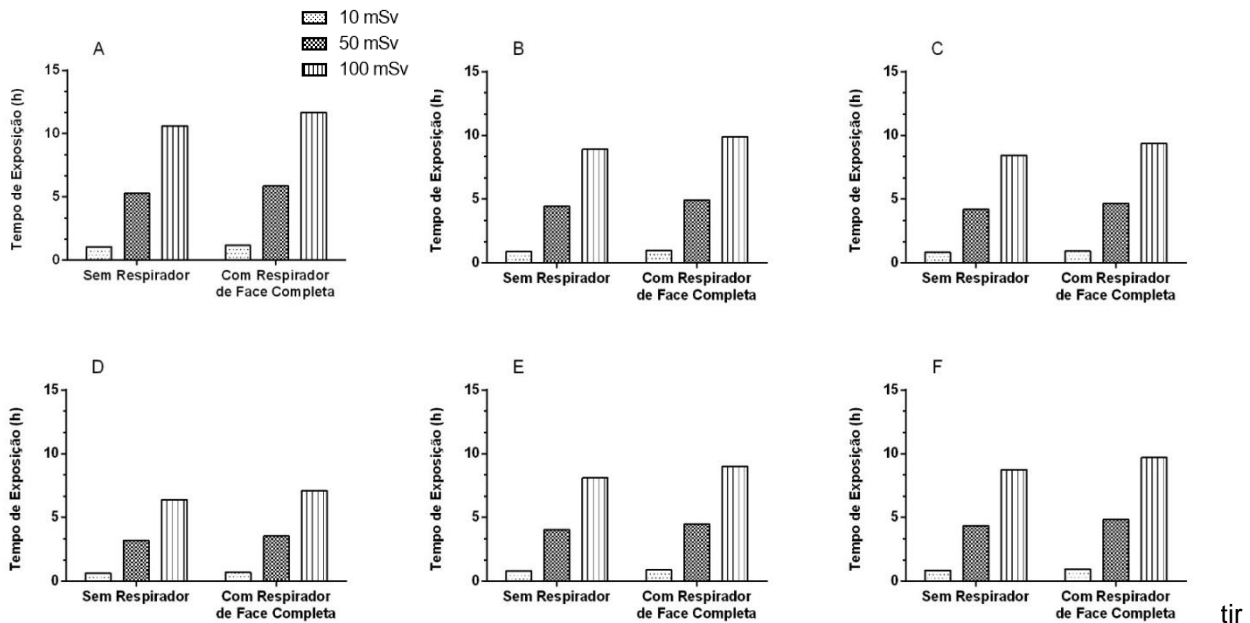
Para os socorristas que não usam equipamentos de filtragem de respiração, a dose de radiação também resultaria da inalação de partículas radioativas, portanto foram considerados os seguintes meios de exposições:

- a) Inalação de partículas radioativas.
- b) Exposição externa devido à submersão.
- c) Exposição externa proveniente de materiais depositados sobre a superfície do solo.

O RESRAD-RDD permite estimar, por meio de parâmetros como níveis de concentração no solo, o tempo de exposição em horas para limites de doses de interesse a serem respeitados. O cálculo é feito considerando dois casos: (a) pessoas do público em geral (sem respirador) e (b) para o pessoal de resposta (com respirador de face completa).

As distâncias analisadas representam as áreas delimitadas conforme o nível de contaminação. As áreas nas distâncias de 100m são consideradas quentes (*hotspot*) e as áreas compreendidas a partir de 1000m frias.

As figuras 4.9 a 4.11 expressam o tempo de permanência para as doses projetadas de 10, 50 e 100 mSv, que são limiares de doses para ações de abrigo, evacuação e exposição dos trabalhadores em emergência.



do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F).

tir

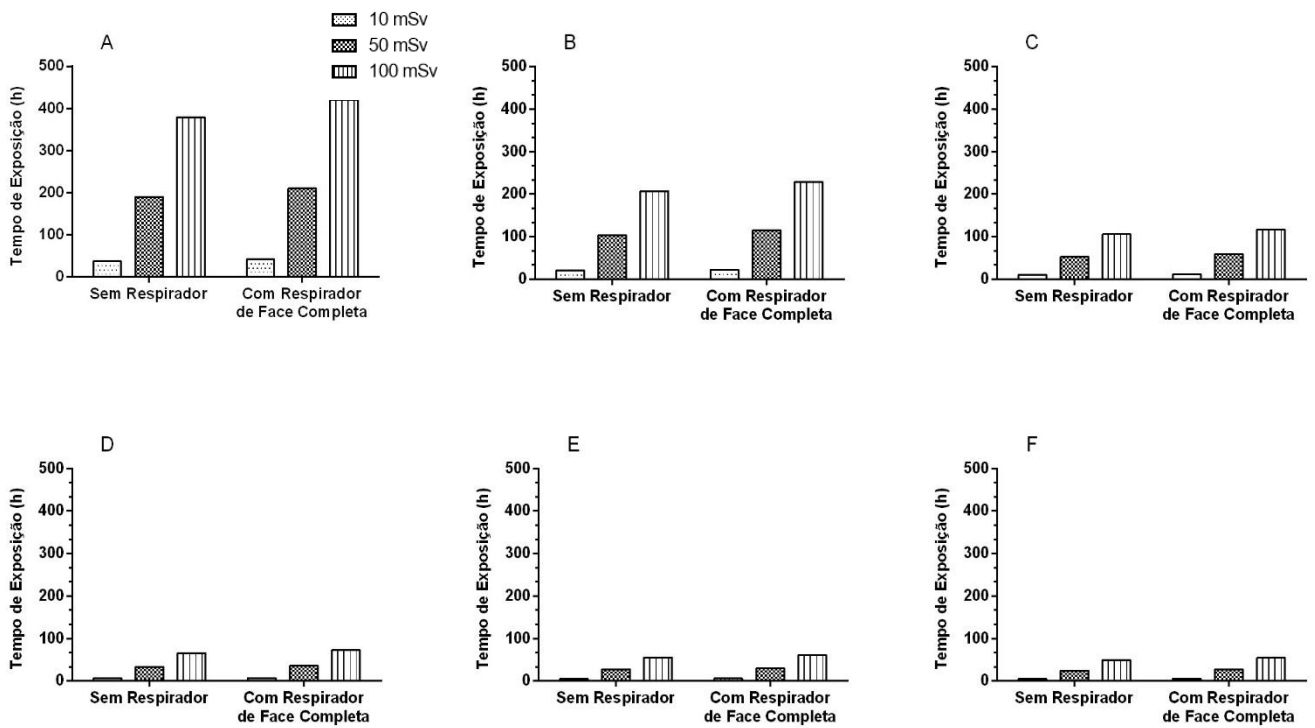


Fig. 4.10 – Tempo de Exposição em função da dose projetada a uma distância de 1000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de estabilidade atmosférica (A a F).

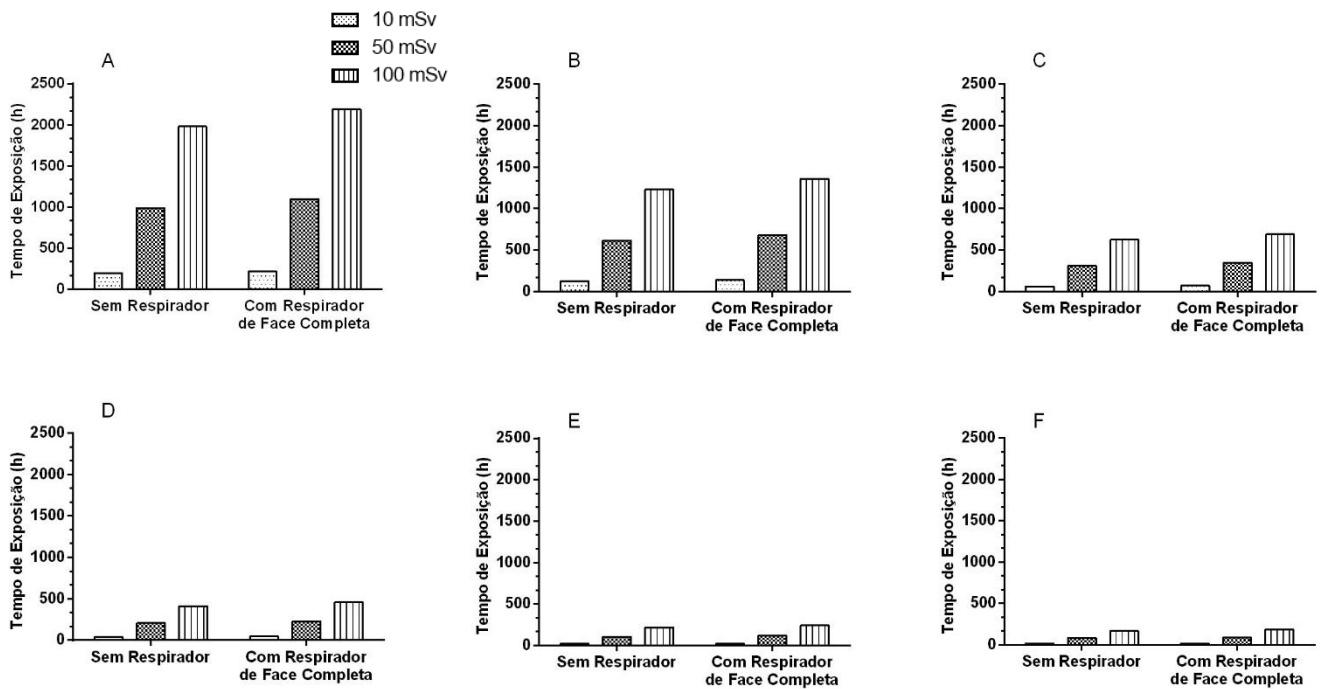


Fig. 4.11 – Tempo de Exposição em função da dose projetada a uma distância de 2000 metros a partir do local de detonação para diferentes classes de Estabilidade atmosférica (A a F).

Em relação à ocupação durante as operações de campo, os resultados mostraram diferenças para cada classe de estabilidade atmosférica. Por exemplo, para uma distância de 2000m a classe de estabilidade A indica que um respondedor equipado com respirador pode trabalhar continuamente por 2.300 horas antes de chegar ao limite de exposição de 100mSv. Nas mesmas condições para classe de estabilidade F, o tempo de exposição para atingir o limite de exposição é reduzido para cerca de 180 horas.

#### 4.3.2 Estimativa do Risco da Missão para o Grupo A (RESRAD-RDD), Classe de Estabilidade Atmosférica A ( $\sigma_0 = 25$ ).

Estes resultados são apresentados a fim de testar a capacidade do método, sendo apenas considerada a classe de estabilidade atmosférica A (extremamente Instável) como referência por apresentar dispersão do material radioativo de forma mais rápida e resultados de riscos menores em comparação aos obtidos nas classes de estabilidade mais estáveis.

O grupo A foi projetado para permanecer na área de controle de acesso localizada a uma distância de 2000m. Os resultados foram estimados a partir da expressão para análise de Risco da Missão (ver equação 13)

TAB. 4.1 – Estimativa do Risco da Missão para o Grupo A.

<b>Grupo A – Estimativa de Risco Individual</b>		
<b>Idade (anos)</b>	<b>Risco da Missão</b>	
	<b>Masculino</b>	<b>Feminino</b>
20	11.25	12.86
30	10.74	11.97
40	10.34	11.29
50	10.03	10.77
60	9.80	10.36

A Tabela 4.1 mostra o cálculo de risco para o pessoal de resposta a emergência, entre 20 e 60 anos. As diferenças nos riscos calculados variam no intervalo de 5 a 12% considerando os gêneros e as faixas etárias de interesse.

Neste local pode haver rotatividade de pessoal e, portanto, a administração do tempo torna-se viável. As diferenças percentuais ( $\Delta$ ) entre os riscos para homens e mulheres no grupo A estão no intervalo  $5 < \Delta < 14$ .

#### **4.3.3 Doses Baseadas nas Medidas para o Grupo B – Resposta inicial, ações de proteção urgentes (Evacuação e Abrigagem)**

O grupo B das diretrizes operacionais do RESRAD\_RDD foi projetado para auxiliar no processo de tomada de decisão para ações de proteção de abrigagem e evacuação. A capacidade de um indivíduo sobreviver à radiação associada a uma detonação de material radioativo considera dois principais fatores: (a) a distância da detonação e (b) o tipo de estrutura em que está localizada.

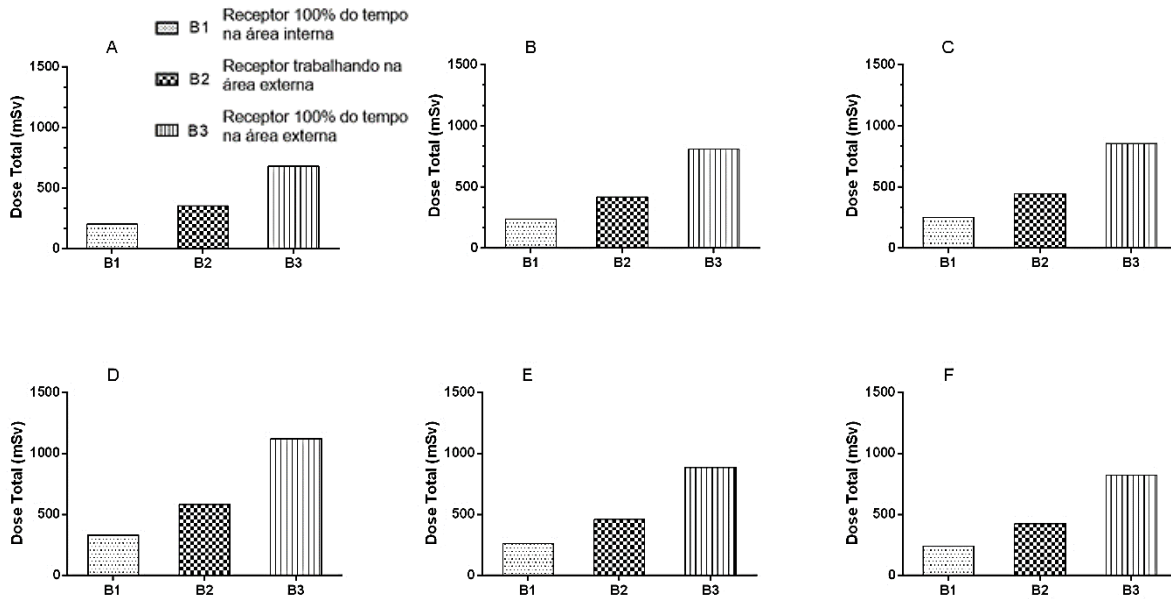
Prédios, mesmo aqueles com janelas, fornecem um nível de proteção à radiação. Portanto, as pessoas que estão localizadas em áreas abertas são mais suscetíveis do que pessoas no interior de estruturas físicas fechadas.

Na simulação do cenário admitiu-se que a emergência radiológica ocorreu em um ambiente urbano onde a ressuspensão de radionuclídeos foi reforçada pelo tráfego de carros, aumentando assim a contaminação do ar.

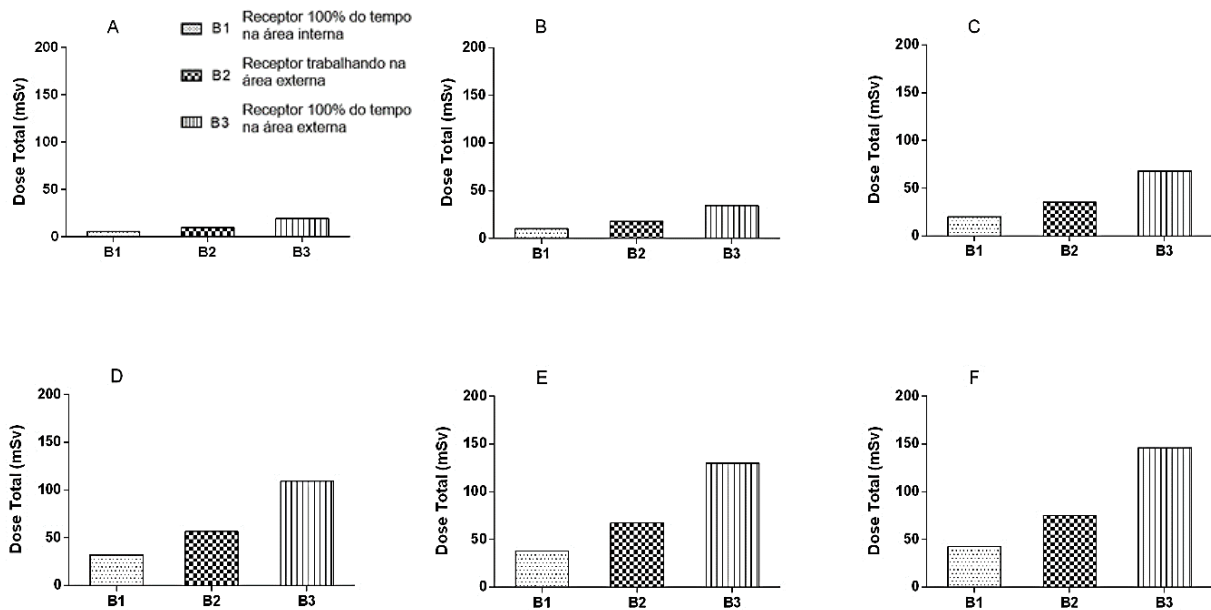
As figuras 4.12 a 4.14 mostram as doses totais projetadas a partir de 4 dias de exposição, considerando o indivíduo como receptor em função do tempo de permanência na área externa:

- (a) 100% do tempo na área interna (dentro do abrigo) (B1);
- (b) receptor trabalhando ocasionalmente na área externa (B2);
- (c) 100% do tempo na parte externa (B3).

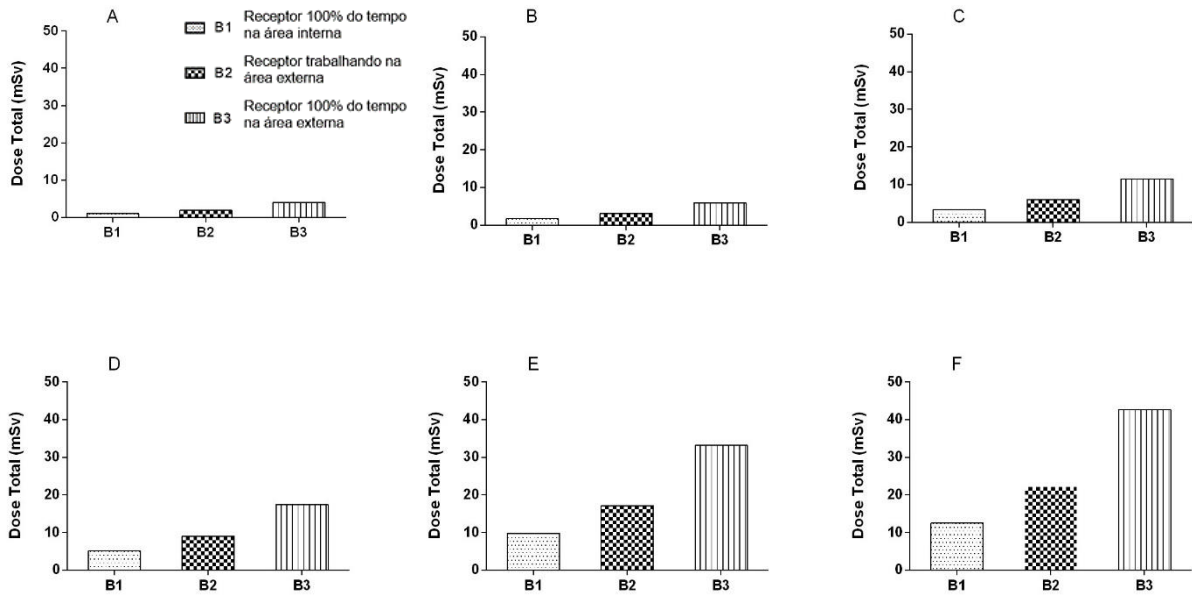




**Fig. 4.12** – Dose total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 100 metros a partir do local da detonação para diferentes Classes de Estabilidade Atmosférica (A a F).



**Fig. 4.13** – Dose total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 1000 metros a partir do local da detonação para diferentes Classes de Estabilidade atmosférica (A a F).



**Fig. 4.14** – Dose total projetada (mSv) a partir de 4 dias de exposição com base nos dados de medição para uma distância de 2000 metros a partir do local da detonação para diferentes Classes de Estabilidade atmosférica (A a F).

Nas medidas do grupo B, para trabalhadores em turnos em uma área de controle criada a 100m do ponto do evento, as classes de estabilidade atmosférica B, C, E e F parecem não diferir sobre a dose projetada. A melhor condição atmosférica parece ser a classe de estabilidade A, que apresenta dose total estimada menor e a classe D o pior caso, apresentando a maior (ver figura 4.12).

#### 4.3.4 Estimativa do Risco da Missão para o Grupo B (RESRAD-RDD), Classe de Estabilidade Atmosférica A ( $\sigma_{\theta} = 25$ ).

Os resultados apresentados para os subgrupos B (B1, B2 e B3) são para os respondedores que atendem de forma avançada à emergência. Esses resultados são apresentados a fim de testar a capacidade do método, sendo apenas considerados os cálculos para a classe de estabilidade atmosférica A como exemplo.

O grupo B está sob maior risco quando comparado com o grupo A. Para os cálculos, foi considerada a média dos riscos para missões dos grupos A e B. A

tabela 4.2 expressa a comparação dos resultados de excesso de risco relativo para os subgrupos B: (a) o subgrupo B1 aumentou em cerca de 90%, (b) o subgrupo B2 apresentou elevação de cerca de 360% e (c) o subgrupo B3 mostrou elevação de cerca de 800%.

TAB. 4.2 – Estimativas de Risco de Missão para o Grupo B.

<b>Grupo B1 - 100% dentro do abrigo</b>		
<b>Idade (Anos)</b>	<b>Risco da Missão</b>	
	<b>Homens</b>	<b>Mulheres</b>
20	21.05	22.51
30	20.58	21.70
40	20.22	21.09
50	19.94	20.61
60	19.72	20.24
<b>Grupo B2 – Receptor na área externa (ocasional)</b>		
<b>Idade (Anos)</b>	<b>Risco da Missão</b>	
	<b>Homens</b>	<b>Mulheres</b>
20	40.28	44.74
30	38.84	42.28
40	37.73	40.39
50	36.88	38.92
60	36.22	37.80
<b>Grupo B3 - 100% na área externa</b>		
<b>Idade (anos)</b>	<b>Risco da Missão</b>	
	<b>Homens</b>	<b>Mulheres</b>
20	90.70	107.55
30	85.27	98.26
40	81.09	91.11
50	77.86	85.59
60	75.38	81.33

Esses resultados foram obtidos a partir da expressão para análise de Risco da Missão (ver equação 13), as diferenças percentuais ( $\Delta$ ) entre riscos para os gêneros masculino e feminino dentro do grupo B e subgrupos foram: (a) subgrupo B1 apresenta diferenças no intervalo  $3 < \Delta < 7$ ; (b) subgrupo B2 apresenta diferenças no intervalo  $4 < \Delta < 11$ ; e (c) o subgrupo B3 mostra diferenças no intervalo  $8 < \Delta < 19$ .

No geral, esses resultados indicam que as variações no nível de risco da missão entre os gêneros masculino e feminino tendem a aumentar, uma vez que o risco relativo para o gênero feminino e em pessoas jovens é geralmente maior que para o masculino na análise específica para cânceres sólidos.

## 5 CONCLUSÃO

Perdas em potencial e o sofrimento causado por uma detonação de um RDD podem ser drasticamente reduzidos através de planejamento e preparação. Um atentado terrorista pode resultar em depressão na economia e no estado fisiológico da população nas proximidades da explosão.

A proposta da metodologia é a utilização de diferentes ferramentas com a convergência de dados para otimizar as respostas a crises em um enfrentamento de emergência radiológica, gerando caminhos preferenciais para evitar ou mitigar prejuízos à saúde, obtendo estimativas essenciais ao processo decisório de forma rápida e eficiente, sendo possível ter grande impacto positivo em pesquisas endereçadas ao enfrentamento de emergências radiológicas.

Observou-se uma diferença na característica na pluma de dispersão em função da classe de estabilidade atmosférica, conforme figura 4.1. Os resultados de maior preocupação são os obtidos para as classes de estabilidade E (Moderadamente Estável) e F (Muito Estável), uma vez que, mesmo a distâncias superiores a 10km, estima-se valores de concentração no solo (figura 4.3) e TEDE relativamente altos.

Considerando os limites de doses estabelecidos para intervenção em situações de emergência, foi possível estimar a área (km<sup>2</sup>) para ações de proteção urgentes, como na figura 4.2. As classes de estabilidade que apresentaram uma área mais extensa para ações de evacuação (50mSv) e abrigagem (10mSv) foram E (Moderadamente Estável) e F (Muito Estável). A área mais extensa para a isodose de 1mSv foi aquela relativa à classe de estabilidade A, (Muito Instável), com comportamento esperado por dispersar mais rapidamente o material radioativo em forma de aerossol.

Para tumores sólidos, a probabilidade de causalidade e o risco relativo de câncer sólido para mulheres apresentaram valores superiores em comparação aos homens e podem ser observados nos gráficos para ambos os gêneros.

Os resultados para o Grupo A – Controle de Acesso Durante Operação de Resposta à Emergência do código RESRAD-RDD, são apresentados na forma de tempo de exposição em horas para três distâncias distintas.

As doses de referência são as mesmas preconizadas para ações de proteção urgentes, os valores de tempo de permanência encontrados para as classes de estabilidade E e F apresentou-se aproximadamente dez vezes menores para as distâncias de 1000m e 2000m em comparação com classes de estabilidade mais instáveis.

No Grupo B, as medidas relacionam as doses totais projetadas para os quatro dias seguintes ao incidente envolvendo um RDD. Tais estimativas são cruciais nas ações de proteção urgentes para determinar qual medida seria mais eficaz (Evacuação ou Abrigagem).

A dose total no período de quatro dias para as classes de estabilidade E e F apresentaram-se aproximadamente dez vezes menores para as distâncias de 1000m e 2000m em comparação com classes de estabilidade mais instáveis.

O objetivo deste estudo foi propor uma metodologia capaz de convergir recursos, com uma interface amigável que poderia essencialmente ser utilizada de forma rápida e eficaz, mesmo remotamente, no campo de ação.

O conceito de metodologia de convergência apresentado mostrou ser consistente e viável. Os resultados não contradizem a literatura e adicionam ferramentas de apoio à tomada de decisão. Tais resultados reforçam:

- (a) base científica para a escolha da equipe de resposta;
- (b) designar uma equipe específica para um cenário específico;
- (c) reduzir o risco por antecipação;
- (d) determinar as distâncias adequadas para a instalação de bases operacionais de grupos e subgrupos, e
- (e) determinar com maior certeza os tempos de permanência e riscos.

Este trabalho, embora necessite de maior detalhamento, apresenta potencial de inovação nas ações de resposta a emergências. Pode-se considerar um fator de inovação a capacidade de previsão de dano futuro para a equipe de resposta oferecendo condições para que seja personalizada de forma a reduzir riscos individuais no cumprimento das missões no cenário de resposta a um RDD.

## 6 REFERÊNCIAS

ARMED FORCES RADIOBIOLOGY RESEARCH INSTITUTE. **Medical Management of Radiological Casualties**. Washington, DC, 2003.

ARGONNE NATIONAL LABORATORY ENVIRONMENTAL SCIENCE DIVISION, **Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Health Risk Analyses for Contaminated Areas**. USA. March 2007.

ATIXX, F.H., **Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1986. 607 p. il.

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

CENTRE OF DISEASE CONTROL AND PREVENTION, **Acute radiation Syndrome**. US Department of Health and Human Services. USA. 2003.

CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION, **Population Monitoring in Radiation Emergencies: A Guide for State and Local Public Health Planners**. USA. 2014.

COLLELA, LOGAN, MCINTOSH and THOMSON (2005), **An Introduction to radiological terrorism**. The Australian Journal of Emergency Management, Vol. 20 No 2. 2005.

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.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Medidas de Proteção e Critérios de Intervenção em Situações de Emergência**. Posição Regulatória 3.01/006:2011. Rio de Janeiro: CNEN. 2011.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Protective Action Guides And Planning Guidance For Radiological Incidents.** Março 2013.

FERGUSON, C.D., KAZI, T & PEREIRA J, **Comercial Radioactive Sources.** Monterey Institute of International Studies, Center for Nonproliferation Studies. Occasional Paper no. 11. 2003.

FLORIG HK and FISCHHOFF B. **Individuals decision affecting radiation exposure after a nuclear explosion.** Health Phys 92(5):475-83. 2007

GRANOT, H. **Planning for the unthinkable: Psychosocial reaction to Chemical and Biological Warfare (CBW) Weapons.** Australian Journal of Emergency Management. p. 21-24. Spring 2000.

Hanna, S., R. Briggs, and R. Hosker, Jr. **Handbook on Atmospheric Diffusion, prepared for the Office of Health and Environmental Research.** pp. 6871 Office of Energy Research, U.S. Department of Energy. 1982.

HANNA, S. R., Briggs, R., Britter, R. E. **Wind Flow and Vapor Cloud Dispersion at Industrial and Urban Sites.** 3 Park Ave, New York, NY. 2002. p. 140. ISBN No: 0-8169-0863-X, CCPS/AIChE.

HOMANN, S.G. **HotSpot Health Physics Codes Version 2.07 User's Guide.** Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA. 2009.

HOMANN, S. G. **HotSpot Health Physics Codes Version 3.0 User's Guide.** Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA. 2013.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Categorization of Radioactive Sources.** IAEA – TECDOC – 1344. 2003.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Generic procedures for assessment and response during a radiological emergency.** IAEA – TECDOC – 1162. 2000.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Inadequate Control of World's Radioactive Sources.** IAEA PRESS RELEASE. 2002.



INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Incident and Trafficking Database (ITDB)**. Incidents of nuclear and other radioactive material out of regulatory control. 2014

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **“Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency”**. IAEA Safety Series 109. Vienna, Austria, 1994.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Methods for Estimating the Probability of Cancer from Occupation Radiation Exposure**. IAEA – TECDOC – 870. 1996.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **“Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”**, ICRP Publication 60, Pergamon Press, 1990.

INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, **“Recommendations of the International Commission on Radiological Protection”**, ICRP Publication 103, Pergamon Press, Oxford, 2007.

LEVETT, J. **Radiological Terrorism Scenarios**. Prehospital and Disaster Medicine 22(4):346, 2007. Volume 22. pp 346-346. August 2007.

NATIONAL HEALTH AND MEDICAL RESEARCH COUNCIL, **Recommended limits on radioactive contamination on surfaces in laboratories**. Radiation Health Series n. 38. Australia. 1995.

PASQUILL, F., **The Estimation of Dispersion of Windborne Material, Meteorology**, 90, pp. 3349, 1961.

RIBEIRO, A.S.; ALMEIDA, E.; ELIAS, E.A.; SILVA, R.M.C. **Dosimetria**. Trabalho apresentado como requisito parcial para aprovação na Disciplina de Física Atômica e Nuclear II, Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

ROCHEDO, E. R. R., AMARAL, E. C. S., GODOY, J. M. O., Wasserman, M. A. V. **Avaliação de Impacto Radiológico Ambiental**. Rio de Janeiro, Brasil, Instituto de Radioproteção e Dosimetria. RS-G-1.9, I. S. S. S. N. (2005).

SHIN H AND KIM J., **Development of realistic RDD scenarios and their radiological consequence analyses**. Appl Radiat Isot 67(7-8):1516-20, 2009.

TAUHATA, L.; SALATI, I.P.A.; PRINZIO, R.Di.; PRINZIO, M.A.R.R.Di.  
**Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos** – 5ª revisão agosto/2013 – Rio de Janeiro – IRD/CNEN 242p.

THACKER, S. B., **Time-Space Cluster**. Health & Environment Digest 1989, 3 (5), 4-5

THIESSEN K. M., ANDERSON K. G., BATANDJIEVA B., et al. **Modeling the long-term consequences of an hypothetical dispersal of radioactivity in a urban area including remediation alternatives**. Journal of Environmental Radioactivity. 100(6):445-55, 2009.

Van der Hoven, I., "**Deposition of Particles and Gases**," in **Meteorology and Atomic Energy**-1968, D.H. Slade, Ed. (U.S. Atomic Energy Commission, Report TID-24190, National Technical Information Service), pp. 202-207 (1968).

YVES, Thalys S. **Potenciais impactos ambientais e riscos para a saúde humana decorrentes de explosão de um dispositivo de dispersão radiológica (RDD)**. 2014. 99 p. Dissertação (Mestrado em Radioproteção e Dosimetria) Instituto de Radioproteção e Dosimetria. 2014

## 7 ANEXO

### 7.1 Principais considerações no Planejamento de Monitoramento da População

#### 7.1.1 Identificar e priorizar a população afetada

A maior prioridade é o tratamento para as pessoas que tenham lesões com risco de vida ou que estão em necessidade imediata de atendimento médico que pode ou não estar relacionada com a radiação (um estado crítico pré-existente).

Autoridades devem garantir os seguintes recursos nas primeiras 24 a 48 horas (CDC, 2014):

- Fazer projeções dose de radiação (irradiação externa e previsões pluma);
- Avaliar o risco de exposição por hora e local;
- Identificar vítimas dentro do alcance, localização e proximidade com o incidente;
- Identificar potenciais sintomas de síndrome aguda de radiação;
- Fornecer equipamentos de detecção de radiação para detectar a evidência de radiação externa beta, gama ou alfa ou de contaminação conforme o caso, e prosseguindo com a descontaminação;
- Realizar testes periódicos de sangue (hemograma com contagem de células brancas) para avaliação da exposição direta;
- Coleta de amostras de urina para bioensaios se houver suspeita de contaminação interna (não é uma prioridade, após um cenário de RDD).

O sistema de prioridades para o controle e identificação de indivíduos em risco pode basear-se no seguinte:

- projeções de doses de radiação, se disponível (previsões da pluma);
- Os períodos específicos e os locais onde as pessoas possam ter uma maior probabilidade de serem expostos ou contaminados;
- Apresentação de sintomas clínicos compatíveis com síndrome de radiação aguda;

- Outros fatores, como idade, gênero e gravidez.

### **7.1.2 População para atendimento Especial**

Autoridades de saúde pública e planejadores de emergência devem identificar e priorizar as populações especiais, após um incidente de radiação. Estas incluem:

- Crianças (menores sem responsáveis presentes, por exemplo, crianças na escola);
- Mulheres grávidas;
- Mães lactantes;
- Pessoas idosas;
- Indivíduos imunocomprometidos;
- Deficientes que requerem o uso de cadeira de rodas ou outros meios auxiliares de locomoção;
- Os sem-teto;
- Institucionalizados que podem ou não ser capaz de evacuar ou realocar
- Pacientes de hospitais;
- Residentes de casas de repouso ou outras instituições; e
- Presidiários, guardas e trabalhadores obrigados a manter, operar, ou proteger uma infraestrutura crítica;

### **7.1.3 Monitorando a População (Horas Iniciais)**

Em grandes áreas metropolitanas, a densidade populacional é alta durante o horário comercial e dezenas ou centenas de milhares de pessoas podem estar nas imediações do incidente. Pode haver uma inclinação para isolar a área e conter a população que pode estar contaminada até que todos sejam adequadamente avaliados e descontaminados. Por uma variedade de razões, essa resposta é ineficaz. Quanto mais membros do público são mantidos em espera, maior o seu nível de ansiedade. Um longo tempo de espera também pode aumentar a dose de

radiação de fontes externas e a probabilidade de ingestão ou inalação de material radioativo. A maior prioridade é cuidar de pessoas que estão gravemente feridas; os outros podem ser divididos em dois grupos:

#### **7.1.3.1 Pessoas que realizaram auto-evacuação.**

A orientação deve ser dada a essa população por meio de vários métodos de comunicação (televisão, rádio, Internet e mídia social) sobre as ações a tomar e como se descontaminar. Despir-se na entrada ou na garagem é preferencial. Fornecer instruções para que eles façam as seguintes tarefas:

- Evite contato desnecessário no corpo e face para minimizar potencial propagação da contaminação (evitar fumar, goma de mascar, etc., até depois da descontaminação);
- Retirar a roupa e colocá-la em um saco plástico selado;
- Soprar delicadamente nariz, limpar as pálpebras e orelhas;
- No chuveiro utilizar água morna e sabão neutro;
- Utilizar meios de comunicação para obter mais instruções dos oficiais de saúde e pessoal de resposta a emergências.

#### **7.1.3.2 Pessoas que permaneceram no cenário radiológico.**

Essas pessoas precisam de instruções imediatas sobre o que fazer enquanto esperam para ser ajudadas. Estas instruções podem incluir o seguinte:

- Evitar tocar superfícies suspeitas de contaminação.
- Manter as mãos longe do rosto (especialmente a boca) e não fumar, comer ou beber até ter lavado as mãos e o rosto.
- Remover cuidadosamente a roupa e colocar em sacos plásticos (fornecido).
- Lavar as mãos e o rosto, se a água estiver disponível, ou limpar as mãos e o rosto com toalhas úmidas ou lenços descartáveis para bebês (fornecido).

Com estes objetivos em mente, este guia pode ser utilizado no processo de planejamento para monitoramento da população.