

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM ACIDENTE SEVERO NA USINA DE  
ANGRA DOS REIS COM LIBERAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS PARA A  
ATMOSFERA

André Silva de Aguiar

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de  
Pós-graduação em Engenharia Nuclear, COPPE,  
da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como  
parte dos requisitos necessários à obtenção do  
título de Doutor em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim

Francisco Fernando Lamego

Simões Filho

Rio de Janeiro

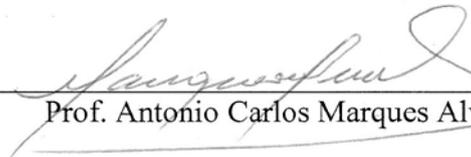
Abril de 2015

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM ACIDENTE SEVERO NA USINA DE  
ANGRA DOS REIS COM LIBERAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS PARA A  
ATMOSFERA

André Silva de Aguiar

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ  
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE) DA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS  
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM  
CIÊNCIAS EM ENGENHARIA NUCLEAR.

Examinada por:



---

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.



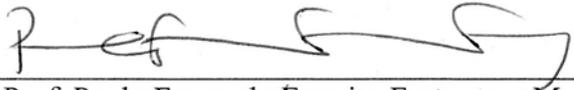
---

Prof. Francisco Fernando Lamego Simões Filho, D. Sc.



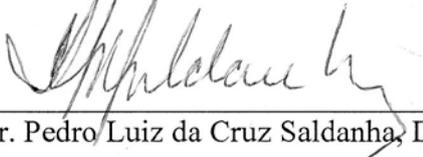
---

Prof. Luiz Claudio Gomes Pimentel, D. Sc.



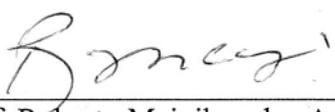
---

Prof. Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, D. Sc.



---

Dr. Pedro Luiz da Cruz Saldanha, D. Sc.



---

Prof. Roberto Meigikos dos Anjos, D. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

ABRIL DE 2015

Aguiar, André Silva de

Avaliação do Impacto de um Acidente Severo na Usina de Angra dos Reis com Liberação dos Radionuclídeos para a Atmosfera/ André Silva de Aguiar.

– Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2015.

XVIII, 140 p.: il.; 29,7 cm.

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim

Francisco Fernando Lamego Simões

Filho

Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Nuclear, 2015.

Referências Bibliográficas: p. 130-135.

1. Station Blackout. 2. Acidente Severo. 3. Dispersão Atmosférica. 4. Análise de Segurança. I. Alvim, Antonio Carlos Marques *et al.* II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Nuclear. III. Título.

“RETROCEDER *NUNCA*, RENDER-SE *JAMAIS*”.

*Filme: No Retreat, No Surrender.*

## AGRADECIMENTOS

Em primeiríssimo lugar agradeço a Deus, por ter me dado esperança nos momentos de desesperança, alegria quando eu era só tristeza, força para seguir em frente quando eu estava quase desistindo, colocando em cada passo que eu dava, pessoas maravilhosas que muito me auxiliaram e incentivaram para que assim, pudesse vencer mais uma etapa da minha vida. Pessoas essas que serão elencadas abaixo.

À minha família pelo suporte emocional como também aos meus amigos e pessoas de minha alta estima que com gestos, palavras ou até mesmo num simples olhar, puderam reavivar o ânimo que por muitas vezes se encontrava perdido. Agradecimento especial ao meu amigo Abner Duarte, amigo de várias batalhas, que me ajudou na elaboração do Cálculo de Dose.

Agradeço aos Professores Antônio Carlos Avim e ao Francisco Fernando Lamego Simões Filho, pela dedicada orientação mesmo com os percalços ocorridos ao longo do processo e principalmente pela confiança depositada, o que me motivou à superar todas as dificuldades.

Agradeço à equipe do Programa de Engenharia Nuclear – PEN/COPPE, que deu todo o suporte administrativo e por muitas vezes quebrando vários galhos.

Ao Professor Otto Corrêa Rotunno Filho do Programa de Engenharia Civil – PEC/COPPE, que simplesmente, no momento mais obscuro de minha jornada me mostrou a luz no fim do túnel não me fazendo desistir.

Ao Professor Luiz Claudio G. Pimentel do IGEO/UFRJ, que prontamente atendeu ao pedido do Prof. Otto para tornar possível esse momento. À toda equipe do NCQAr, em especial ao Maurício e ao Nilton incansáveis no desenvolvimento das modelagens do WRF e CALPUFF, ao Leonardo, mais conhecido como Léo, que sempre me ajudou nos momentos de necessidades, ao William, Vagner, vulgo cachaça, Anselmo, ao Prof. Edilson, e a outros que não me recordo o nome, mas que me ensinaram o mais importante, que é possível trabalhar num ambiente onde todos se ajudam, o que é raro nesse meio.

À Eletronuclear que prontamente cedeu as informações das Torres Meteorológicas da CNAAB, bem como as informações do núcleo de Angra I.

Agradecimento especial ao Sérgio, meu amigo de doutorado e funcionário da ETN, que possibilitou a aquisição dessas informações, ao Raimundo, Andrade, Wilson e ao Edson Kuramoto que me auxiliaram para um melhor entendimento da dinâmica do Acidente proposto.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear pelo suporte financeiro. Agradecimento especial ao Dr. Pedro Paulo que sempre esteve à disposição para me ajudar nas diversas etapas desta Tese, ao Dr. Pedro Saldanha que, da mesma forma, estava sempre à disposição para me atender.

À TODOS, o meu muito OBRIGADO!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.).

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DE UM ACIDENTE SEVERO NA USINA DE  
ANGRA DOS REIS COM LIBERAÇÃO DOS RADIONUCLÍDEOS PARA A  
ATMOSFERA

André Silva de Aguiar

Abril /2015

Orientadores: Antonio Carlos Marques Alvim

Francisco Fernando Lamego Simões Filho

Programa: Engenharia Nuclear

Este trabalho teve como objetivo avaliar o impacto de um acidente severo, além de analisar a dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera, a fim de que, mediante a concentração e dose de inalação da pluma, pudesse verificar se os resultados estariam de acordo com o apontado pelo Plano de Emergência da Usina no que tange à Zona de Impacto e de Controle. Tal exercício foi realizado com auxílio de um modelo atmosférico e um de dispersão, onde para a modelagem atmosférica foi utilizado o acoplamento de dados do WRF/CALMET e para a dispersão CALPUFF.

O acidente proposto consiste em um Station Blackout na usina de Angra 1, onde através do comprometimento total do núcleo, haverá liberação de 100% do  $^{131}\text{I}$  para a atmosfera. O valor da atividade total no núcleo para esse radionuclídeo é de  $7,44 \times 10^{17}$  Bq, que é relativo ao sexto dia de queima. Tal atividade será liberada pela chaminé a uma taxa em Bq/s correspondendo ao cenário de 12, 24, 48 e 72 horas de liberação. Aplicando o modelo no cenário proposto, verifica-se que a pluma apresenta concentrações da ordem de  $10^{20}$  Bq/m<sup>3</sup> e dose da ordem de  $10^8$  Sv cujo valor se encontra além da zona de impacto apresentado no plano de emergência atual da Eletronuclear.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

ASSESSMENT OF IMPACT OF A SEVERE ACCIDENT AT NUCLEAR POWER  
PLANT OF ANGRA DOS REIS WITH RELEASE OF RADIONUCLIDES TO THE  
ATMOSPHERE

André Silva de Aguiar

April /2015

Advisors: Antonio Carlos Marques Alvim

Francisco Fernando Lamego Simões Filho

Department: Nuclear Engineering

This study had as purpose the assess the impact of a severe accident, and also analyze the dispersion of  $^{131}\text{I}$  in the atmosphere, so that, through concentrating and inhaling dose of the plume, were possible to verify if the results are in accordance with the indicated data by the Plan of Emergency of the CNAAA regarding the Impact Zone and Control. This exercise was performed with the aid of an atmospheric model and a dispersion where to atmospheric modeling we used the data coupling WRF / CALMET and of dispersion, CALPUFF.

The suggested accident consists of a Station Blackout at Nuclear Power of Angra (Unit 1), where through the total core involvement, will release 100% of the  $^{131}\text{I}$  to the atmosphere. The value of the total activity in the nucleus to this radionuclide is  $7.44 \times 10^{17}$  Bq, that is relative on the sixth day of burning.

This activity will be released through the chimney at a rate in Bq/s in the scenario of 12, 24, 48 and 72 hours of release. Applying the model in the proposed scenario, it is verified that the plume has concentrations of the order of  $10^{20}$  Bq/m<sup>3</sup> and dose of about  $10^8$  Sv whose value is beyond of the presented by Eletronuclear in your current emergency plan.

# SUMÁRIO

	<b>Pág.</b>
<b>Capítulo 1 – Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Revisão Bibliográfica.....	2
1.2 Objetivo, Relevância e Originalidade da Tese.....	7
1.3 Estrutura da Tese.....	8
<b>Capítulo 2 – Descrição do Acidente.....</b>	<b>10</b>
2.1 Considerações Iniciais.....	10
2.2 Falha no Sistema de Energia Externa.....	11
2.3 Falha no Sistema de Energia Interna.....	16
2.4 Falha na Refrigeração do Núcleo.....	23
2.5 Falha no Sistema de Ventilação da Chaminé.....	26
<b>Capítulo 3 – Termo Fonte.....</b>	<b>29</b>
3.1 Considerações Iniciais.....	29
3.2 Núcleo de Angra I.....	30
3.3 Origem dos Elementos Radioativos.....	31
3.4 Radionuclídeo Utilizado na Dispersão.....	33
3.5 Cenário do Acidente Proposto.....	34
<b>Capítulo 4 – Caracterização da Área de Estudo.....</b>	<b>36</b>
4.1 Localização.....	36
4.2 Topografia.....	37
4.3 Aspectos Meteorológicos da Região.....	39
<b>Capítulo 5 – Metodologia.....</b>	<b>40</b>
5.1 Descrição dos Modelos.....	40
5.2 Modelo Atmosférico – WRF.....	43
5.3 Modelo de Dispersão.....	47
5.3.1 CALPUFF.....	49
<b>Capítulo 6 – Resultados.....</b>	<b>61</b>
6.1 Considerações Iniciais.....	61
6.2 Acoplamento WRF/CALMET.....	63
6.3 Modelo de transporte – CALPUFF.....	72
6.3.1. 12 horas de liberação.....	73
6.3.2. 24 horas de liberação.....	76

6.3.3. 48 horas de liberação.....	80
6.3.4. 72 horas de liberação.....	85
<b>Capítulo 7 – Avaliação do Impacto.....</b>	<b>91</b>
7.1 Considerações Iniciais.....	91
7.2 Cálculo de dose para a tireoide.....	92
7.2.1. Liberação de 100% de <sup>131</sup> I.....	94
7.2.2. Liberação de 1% de <sup>131</sup> I.....	107
7.3 Zonas de planejamento de emergência – ZPE.....	118
<b>Capítulo 8 – Conclusões e Recomendações.....</b>	<b>125</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>130</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>136</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>137</b>
<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>138</b>
<b>APÊNDICE D.....</b>	<b>139</b>
<b>APÊNDICE E.....</b>	<b>140</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
<b>Fig. 1</b>	O Sistema Elétrico de Furnas Centrais Elétricas.....	12
<b>Fig. 2</b>	Linhas de transmissão de 500 kV e de 138 kV.....	13
<b>Fig. 3</b>	Deslizamentos ocorridos entre os anos de 2007 e 2010.....	14
<b>Fig. 4</b>	Susceptibilidade a Deslizamentos.....	14
<b>Fig. 5</b>	Alimentação elétrica dos sistemas auxiliares de Angra 1.....	15
<b>Fig. 6</b>	Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico de Angra 1.....	18
<b>Fig. 7</b>	Diagrama do Sistema de baterias de Angra 1.....	22
<b>Fig. 8</b>	Local da ruptura no sistema primário – LBLOCA.....	24
<b>Fig. 9</b>	Departure from nucleate boiling – DNB.....	25
<b>Fig. 10</b>	Sistemas de controle da atmosfera da contenção.....	27
<b>Fig. 11</b>	Geometria do Termo-fonte.....	30
<b>Fig. 12</b>	Localização da área de estudo.....	36
<b>Fig. 13</b>	Campo tridimensional da topografia de Angra dos Reis.....	37
<b>Fig. 14</b>	Vista da brecha da Serra do Mar a uma posição 45° acima do horizonte Estrutura básica de funcionamento do WRF.....	38
<b>Fig. 15</b>	Estrutura básica de funcionamento do WRF.....	44
<b>Fig 16</b>	Fluxograma do sistema WRF.....	45

<b>Fig. 17</b>	Tipos de modelos aplicados de acordo com a complexidade da modelagem.....	49
<b>Fig. 18</b>	Fluxograma simplificado dos pré-processadores do Modelo CALMET.....	50
<b>Fig. 19</b>	Dispersão absoluta (a) e dispersão relativa (b).....	54
<b>Fig. 20</b>	Concentração do material poluente no interior de cada Puff.....	54
<b>Fig. 21</b>	Concentração para uma fonte pontual ao longo do eixo X, $H_{\text{efetivo}}$ .....	58
<b>Fig. 22</b>	Formas do material radioativo ser removido da atmosfera.....	60
<b>Fig. 23</b>	Domínios utilizados nas simulações com o modelo WRF.....	62
<b>Fig. 24</b>	Localização das Torres Meteorológicas da CNAAA.....	64
<b>Fig. 25</b>	Localização da Estação de Paraty.....	65
<b>Fig. 26</b>	Dados de entrada do modelo CALMET.....	66
<b>Fig. 27</b>	Intensidade e direção do Campo de Vento para cada período.....	70
<b>Fig. 28</b>	Intensidade e direção do Campo de Vento para todo o período.....	71
<b>Fig. 29</b>	Dados de entrada para uma fonte pontual.....	73
<b>Fig. 30</b>	Predominância SO/S no momento da liberação.....	74
<b>Fig. 31</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 1 hora em 12 horas de liberação.....	75
<b>Fig. 32</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 3 horas em 12 horas de liberação.....	75

<b>Fig. 33</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 24 horas em 12 horas de liberação.....	76
<b>Fig. 34</b>	Predominância SO/S e N/NE para a segunda liberação.....	77
<b>Fig. 35</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 1 hora em 24 horas de liberação.....	78
<b>Fig. 36</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 3 horas em 24 horas de liberação.....	79
<b>Fig. 37</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 24 horas em 24 horas de liberação.....	79
<b>Fig. 38</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 48 horas em 24 horas de liberação.....	80
<b>Fig. 39</b>	Predominância S para a terceira liberação.....	81
<b>Fig. 40</b>	Predominância S/SO e N/NO para a quarta liberação.....	82
<b>Fig 41</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 1 hora em 48 horas de liberação.....	83
<b>Fig. 42</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 3 horas em 48 horas de liberação.....	84
<b>Fig. 43</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 24 horas em 48 horas de liberação.....	84
<b>Fig. 44</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 96 horas em 48 horas de liberação.....	85
<b>Fig. 45</b>	Predominância Oeste para a quinta liberação.....	86
<b>Fig. 46</b>	Predominância SO/S para a sexta liberação.....	87
<b>Fig. 47</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 1 hora em 72 horas de liberação.....	88
<b>Fig. 48</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 3 horas em 72 horas de liberação.....	89
<b>Fig. 49</b>	Concentração do $^{131}\text{I}$ para o período de 24 horas em 72 horas de	

	liberação.....	89
<b>Fig. 50</b>	Concentração do <sup>131</sup> I para o período de 144 horas em 72 horas de liberação.....	90
<b>Fig. 51</b>	Rotas de entrada, transferência e excreção.....	91
<b>Fig. 52</b>	Biocinética do Iodo em um adulto.....	92
<b>Fig. 53</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	95
<b>Fig. 54</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	96
<b>Fig. 55</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	96
<b>Fig. 56</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	98
<b>Fig. 57</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	98
<b>Fig. 58</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	99
<b>Fig. 59</b>	Dose para tireoide referente a 48 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	99
<b>Fig. 60</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	101
<b>Fig. 61</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	102
<b>Fig. 62</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	102
<b>Fig. 63</b>	Dose para tireoide referente a 96 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	103
<b>Fig. 64</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	105
<b>Fig. 65</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	105

<b>Fig. 66</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	106
<b>Fig. 67</b>	Dose para tireoide referente a 144 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	106
<b>Fig. 68</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	108
<b>Fig. 69</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	108
<b>Fig. 70</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação.....	109
<b>Fig. 71</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	110
<b>Fig. 72</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	111
<b>Fig. 73</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	111
<b>Fig. 74</b>	Dose para tireoide referente a 48 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação.....	112
<b>Fig. 75</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	113
<b>Fig. 76</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	114
<b>Fig. 77</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	114
<b>Fig. 78</b>	Dose para tireoide referente a 96 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação.....	115
<b>Fig. 79</b>	Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	116
<b>Fig. 80</b>	Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	117
<b>Fig. 81</b>	Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação.....	117
<b>Fig. 82</b>	Dose para tireoide referente a 144 horas de exposição no cenário de 72	

	horas de liberação.....	118
<b>Fig. 83</b>	Zonas de Planejamento de Emergência da CNAAA em Angra dos Reis	120

## ÍNDICE DE TABELAS

		<b>Pág.</b>
<b>Tabela 1</b>	Dados referentes aos geradores americanos e alemães.....	20
<b>Tabela 2</b>	Pior cenário para os estados possíveis dos geradores diesel.....	20
<b>Tabela 3</b>	Principais radionuclídeos que compõem o inventário.....	32
<b>Tabela 4</b>	Definição das categorias de estabilidade atmosférica de Pasquill..	59
<b>Tabela 5</b>	Características dos domínios utilizados nas simulações com o WRF.....	61
<b>Tabela 6</b>	Intensidade dos ventos referente à Figura 27-a.....	67
<b>Tabela 7</b>	Intensidade dos ventos referente à Figura 27-b.....	68
<b>Tabela 8</b>	Intensidade dos ventos referente à Figura 27-c.....	68
<b>Tabela 9</b>	Intensidade dos ventos referente à Figura 27-d.....	69
<b>Tabela 10</b>	Intensidade dos ventos referente à Figura 28.....	69

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

ETN	ELETRONUCLEAR
RBMK	Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy
PWR	Pressurized Water Reactor
DNB	Departure from Nucleate Boiling
CNEN	COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
ZPE	Zona de Planejamento de Emergência
WRF	Weather Research and Forecasting
CALPUFF	California Puff Model
CNAAA	CENTRAL NUCLEAR ALMIRANTE ALVARO ALBERTO
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LOCA	Loss of Coolant Accident
U.S.NRC	United States Nuclear Regulatory Commission
EPA	US Environmental Protection Agency
mrem	millirem
Sv	sievert
mSv	milisievert
Gy	gray
TEPCO	Tokyo Electric Power Company
IAEA	International Atomic Energy Agency
FSAR	Final Safety Analysis Report
LBLOCA	Large Break Loss-of-Coolant Accident
BIG	Baía da Ilha Grande
USGS	U.S. Geological Survey
GFS	Global Forecast System
ALARA	As Low As Reasonably Achievable
ICRP	International Commission on Radiological Protection

# 1 INTRODUÇÃO

Sob condições normais de operação, as usinas nucleares liberam pequenas quantidades de efluentes radioativos ao longo de sua vida útil (Lamarsh, 1975). No caso de um improvável acidente severo, seguido de falhas sucessivas das barreiras físicas e problemas nos sistemas de controle e proteção do reator, a liberação de material radioativo pode se tornar significativa. Os problemas gerados a partir destes eventos catastróficos podem acarretar um aumento dos níveis de radioatividade nas cercanias da usina, representando uma ameaça ao ser humano, à sociedade e a vida local.

Em qualquer um destes cenários, modelos apropriados e ferramentas computacionais são necessárias para prever e avaliar as consequências radiológicas para a população e para o meio ambiente. O propósito de estudar a dispersão de radionuclídeos produzidos e liberados por uma central nuclear é obter dados para Análise de Segurança, com o intuito de assegurar que, sob condições normais de operação, a eventual dose radioativa recebida pelo público seja inferior aos níveis estabelecidos pela regulamentação vigente e, no caso de um acidente severo, prover as informações necessárias para mitigar suas consequências.

O estudo da liberação de efluentes radioativos pode ser dividido em quatro fases distintas. A primeira delas diz respeito à estimativa do inventário de material radioativo que existe dentro da central nuclear, incluindo suas quantidades e suas propriedades físicas, químicas e biológicas. A segunda fase envolve o estudo dos possíveis caminhos pelos quais esse material pode ser liberado, depois de falhas sucessivas das barreiras.

A terceira fase abrange a dispersão de material radioativo para o meio ambiente. No caso de dispersão atmosférica ou em meios hídricos, deve ser considerado o comportamento da pluma radioativa e a avaliação da concentração de radionuclídeos a partir da central nuclear (Lamarsh, 1975).

Finalmente, a quarta etapa envolve o cálculo da dose recebida por um indivíduo do público e o impacto ambiental provocado pela liberação. A dose de radiação recebida e seus efeitos (riscos) associados à saúde dependem da meia-vida, energia e formas de decaimento dos radionuclídeos, bem como das propriedades biológicas dos seres vivos [Lewis, 1977].

Diferentemente das duas primeiras etapas, a terceira, além de depender do tipo de reator e condição de operação da usina e tipo de acidente, depende também das condições ambientais, como velocidade do vento, gradiente de temperatura, umidade relativa, topografia, no caso de liberação para a atmosfera.

A análise de segurança também é responsável pelo estabelecimento dos limites da área da central nuclear (área de exclusão), a qual não deve ser densamente povoada. Se estes limites pudessem ser reduzidos, diminuiriam também as restrições na ocupação, poderia ser melhorado o monitoramento dessa área, ou até mesmo simplificariam os planos de evacuação das regiões próximas à central nuclear.

Portanto, o estudo de dispersão pode gerar resultados com impactos na ocupação e dimensionamento do sítio. Ainda neste contexto, é importante lembrar que a severidade de um possível acidente associado às instalações nucleares de um modo geral está fortemente ligada à densidade populacional das regiões ao redor das instalações, bem como à política de evacuação, tratamento médico e outras medidas de saúde pública que devem ser tomadas para mitigar suas consequências radiológicas [Lewis, 1977].

## 1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Acidentes nucleares, conforme observou Saraiva (2007), podem ocorrer em reatores nucleares, instalações do ciclo do combustível nuclear, bem como no transporte de combustíveis nucleares. Considerando os antecedentes históricos relacionados à indústria nuclear, os acidentes ocorridos se caracterizaram pela severidade e abrangência das áreas.

Um Acidente Severo se caracteriza pelo comprometimento do núcleo e os eventos iniciadores são, geralmente, por fatores externos e/ou erros humanos, caso de Fukushima e fatores de erro humano, caso de Chernobyl e Three Mile Island que se destacaram como os casos mais expressivos em relação aos impactos gerados por um acidente nuclear.

O acidente de TMI foi o acidente mais grave da história dos Estados Unidos para uma usina nuclear operacional, embora suas liberações radioativas não tiveram efeitos para a saúde dos trabalhadores da usina ou do público.

Suas consequências trouxeram mudanças radicais no que tange ao plano de resposta de emergência, treinamento de operadores do reator, engenharia de fatores humanos, proteção contra radiações, e muitas outras áreas de operações nas usinas nucleares.

Uma combinação de mau funcionamento do equipamento, problemas relacionados ao design e erros dos trabalhadores, levaram **TMI-2** ao colapso parcial e liberação da radioatividade para atmosfera através do sistema de ventilação da chaminé da usina.

O acidente começou cerca de 4 horas da manhã de quarta-feira do dia 28 de março de 1979, e suas causas principais foram:

- Falha de equipamento (bomba d'água de alimentação do gerador de vapor) por mau estado e erro operacional;
- Aquecimento e fusão parcial do núcleo do reator, havendo vazamento de radioatividade para a atmosfera;
- O vazamento da radioatividade alcançou até 16 km da usina. Um total de 140 mil pessoas foram evacuadas.

O líquido refrigerante fluiu a partir do sistema primário através da válvula de alívio do pressurizador, sendo que os instrumentos de monitoração não informava com exatidão, para o operador, o que de fato estava ocorrendo. Não havia nenhum instrumento que mostrava o quanto de água havia no núcleo do reator, como resultado, o operador da planta assumiu mediante o nível de água no pressurizador, que o núcleo estava devidamente coberto com o líquido refrigerante.

Com a perda constante de refrigerante, o combustível nuclear se superaquece até o ponto de derretimento das varetas de combustível, 1200 °C. Análises feitas mais tarde identificaram que cerca da metade do núcleo do reator se fundiu nas fases iniciais do acidente.

A U.S.NRC (Nuclear Regulatory Commission), realizou estudos detalhados das consequências radiológicas do acidente, assim como a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos – EPA, onde foi estimado que cerca de 2 milhões de pessoas ao redor TMI-2 durante o acidente receberam uma dose média de radiação de apenas 1 mrem acima da dose de fundo de costume e a dose máxima do acidente para uma pessoa no limite do local teria sido menos de 100 mrem acima da dose de fundo. Conforme apresentado no link do site oficial da U.S.NRC. <http://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html> , acessado em 27/05/2015.

Após este acidente, alguns procedimentos passaram a ser adotados para licenciamento do operador. Estes procedimentos estão disponíveis no site oficial da U.S.NRC, acessado em 27/05/2015: <http://www.nrc.gov/reactors/operator-licensing/operator-licensing-files/chronology-program.pdf>.

Em *Chernobyl* (Ucrânia), considerado o maior acidente nuclear da história, o desastre ocorreu em 26/04/1986, e teve as seguintes características:

- Os principais motivos foram as falhas no projeto técnico na construção dos reatores RBMK, além de falhas humanas no manuseio em suas barras de controle, o que levou a complicações no nível de calor gerado pelo dispositivo. As altíssimas temperaturas destruíram o reator 4;

Apesar de terem ocorrido consequências catastróficas, Xavier et al. (2007) destacaram que após 36 h do acidente, toda a população de *Pripyat*, cidade onde moravam os trabalhadores do complexo de reatores, começou a ser evacuada, alcançando um raio de 10 km a partir da planta da usina.

O Reator estava parando para manutenção periódica anual. Estavam sendo feitos testes na parte elétrica com o reator quase parando, isto é, funcionando à baixa potência. Para que isso fosse possível, era preciso desligar o Sistema Automático de Segurança, caso contrário, o reator poderia parar automaticamente durante os testes, o que eles não desejavam.

Os reatores deste tipo não podem permanecer muito tempo com potência baixa, porque isso representa riscos muito altos. Ainda assim, a operação continuou desta forma. Os operadores da Sala de Controle do Reator, que não são treinados segundo as normas internacionais de segurança, não obedeceram aos cuidados mínimos, e assim,

acabaram perdendo o controle da operação. A temperatura aumentou rapidamente e a água que circulava nos tubos foi rapidamente transformada em vapor, de forma explosiva. Houve, portanto, uma explosão de vapor, que arreventou os tubos, os elementos combustíveis e os blocos de grafite. A explosão foi tão violenta que deslocou a tampa de concreto e destruiu o teto do prédio, que não foi previsto para aguentar tal impacto, deixando o reator aberto para o meio ambiente.

Como o grafite aquecido entra em combustão espontânea, seguiu-se um grande incêndio, arremessando para fora grande parte do material radioativo que estava nos elementos combustíveis, danificados na explosão de vapor.

O acidente de Chernobyl vitimou um grande número de pessoas e causou danos tanto econômicos como ao meio ambiente. Dos 600 trabalhadores presentes no momento do acidente, 134 receberam altas doses de radiação (0,7-13,4 Gy), sendo 30 o número de trabalhadores e bombeiros mortos nas primeiras semanas após o acidente e 20 outros nos meses subsequentes.

A incidência de câncer na tireoide de indivíduos que foram expostos quando ainda na infância, em particular, aqueles oriundos de áreas severamente contaminadas, foi identificada como sendo consideravelmente maior do que o esperado antes do acidente.

Em 4 de maio foi feito um cerco em um raio de 30 km (2.800 km<sup>2</sup>) ao redor de Chernobyl, conhecido como Zona de Exclusão, o que elevou o número de evacuados para 116.000.

Mais detalhes sobre o acidente pode ser encontrado no site oficial da U.S.NRC: <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML0716/ML071690245.pdf>, acessado em 27/05/2015.

*Fukushima* (Japão) teve um grande acidente nuclear no dia 11/03/2011, que apresentou as seguintes características:

- Após um grande terremoto de magnitude 9,0 na escala Richter e que fez danos consideráveis na região, um tsunami de 15 metros desativou o fornecimento de energia de emergência (geradores à diesel), interrompendo o resfriamento de três reatores de Fukushima Daiichi, provocando um acidente nuclear.

Todos os três núcleos foram derretidos nos primeiros três dias. O acidente foi classificado como 7 na escala INES, devido às altas emissões radioativas dos primeiros dias. Após duas semanas, os três reatores (unidades 1-3) estavam estáveis, com a adição de água, mas não o sistema de resfriamento do núcleo do reator. Em julho de 2011 eles estavam sendo resfriados com água reciclada da nova estação de tratamento.

As temperaturas do reator caíram abaixo de 80° C no final de outubro de 2011 e o desligamento oficial foi anunciado em meados de dezembro de 2011. Mortes ou casos de doenças pela radiação nuclear não foram registrados, mas uma quantidade superior a 100.000 pessoas tiveram de ser retiradas de suas casas.

Depois desse acidente nuclear, em função da liberação de efluentes radioativos gasosos, cerca de 200 mil pessoas foram evacuadas de localidades próximas da central de Fukushima Daiich. A TEPCO, empresa que operava as usinas nucleares da Central de Fukushima, divulgou, na ocasião, os resultados da monitoração dos trabalhadores envolvidos nas ações iniciais de resposta à emergência nas usinas, sendo que 21 deles foram expostos a doses acima de 100 mSv.

Desses, dois receberam doses entre 200 e 250 mSv, 8 receberam doses entre 150 e 200 mSv e os outros 11 registraram doses entre 100 e 150 mSv. A radioatividade total liberada para o meio ambiente foi estimada em cerca de 1/10 daquela liberada em Chernobyl. Este acidente desencadeou uma rejeição à energia nuclear no mundo e provocou uma revisão das normas de segurança, especialmente aquelas aplicáveis à previsão de acidentes nas bases de projeto de reatores.

O acidente ocorrido na usina nuclear de Fukushima liberou para a atmosfera uma quantidade de radioisótopos que formaram a chamada, *nuvem radioativa*. Apesar disso, mesmo tendo gerenciado a catástrofe, a partir da aplicação do plano de emergência que abrangeu a ZPE 30 (*zona de planejamento de emergência com raio de 30 km a partir da usina*), o acidente ocasionado a partir de um desastre natural (*o tsunami*), gerou na mídia e na população uma desconfiança com relação ao uso da energia nuclear que, a partir deste acidente, tem sido debatida com grande preocupação e criticidade. Mais detalhes sobre o acidente pode ser encontrado na notas da IAEA no site oficial da CNEN: <http://www.cnen.gov.br/noticias/documentos/nota-IAEA.pdf>

Tal fato, mesmo considerando as medidas praticadas e que de alguma maneira minimizaram maiores consequências, alerta para a adoção de procedimentos que necessitam ser implantadas a fim de organizar e gerenciar eventos com tais características a partir do planejamento de emergência. No entanto, devido à complexidade e especificidade de cada área onde se situa uma central nuclear, as ações de planejamento e emergência necessitam de componentes tecnológicos que incorporem cada vez mais ferramentas que possam auxiliar na tomada de decisão nas situações de emergência, integrando aspectos representativos sobre a sua área de influência.

## 1.2 RELEVÂNCIA, OBJETIVO E ORIGINALIDADE DA TESE

A **Relevância** da Tese se justifica dentro do contexto relativo aos questionamentos levantados pelo meio acadêmico por Célio Bermann – Professor do Programa de Pós-graduação em Energia do Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo – USP (Bermann,2012) – disponível *no link* [http://br.boell.org/sites/default/files/downloads/Estudo\\_Angra\\_3-garantia\\_Hermes\\_-\\_Celio\\_Bermann.pdf](http://br.boell.org/sites/default/files/downloads/Estudo_Angra_3-garantia_Hermes_-_Celio_Bermann.pdf), e as indagações do Ministério Público Federal – disponível *no link* <http://www.prrj.mpf.mp.br/institucional/mpf-nos-municipios/prm-angra-dos-reis-1/atuacao/recomendacoes/recomendacao-para-corriger-licenca-de-angra-iii> quanto a estudos sobre acidentes severos e a frequência e magnitude dos deslizamentos de encosta na região, uma vez que possuem potencial de comprometer as torres de transmissão de energia para o complexo nuclear. Além disso, não há um estudo de impacto ambiental para Acidentes Severos na região, a fim de avaliar o *Plano de Emergência* uma vez que o mesmo não contempla eventos dessa magnitude, o que afeta significativamente os requisitos do *Plano de Evacuação*.

O presente trabalho tem como **Objetivo Geral**, Avaliar o impacto da liberação radioativa causado pela perda de controle da fonte através do estudo de caso de um acidente severo postulado.

Os *objetivos específicos* deste trabalho são:

- Estabelecer os eventos iniciadores e o cenário proposto do acidente a partir das informações disponíveis da Unidade 1 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA – Angra 1)
- Calcular o termo fonte liberado pelo acidente a partir do inventário de radionuclídeos previamente selecionados para avaliação do impacto
- Modelar a dispersão atmosférica do radionuclídeo selecionado, através do acoplamento entre o modelo numérico de previsão do tempo e o modelo de transporte de pluma na camada limite, gerando resultados de concentração do poluente para o domínio considerado.
- Calcular a dose de inalação da pluma, a fim de se verificar se os resultados estão de acordo com o apontado pelo Plano de Emergência da Usina no que tange à Área de Exclusão e a Zona de Controle;

Esse estudo privilegia uma abordagem que contempla os quatro níveis de avaliação de segurança, com ênfase na avaliação do impacto radiológico. Assim, a *Originalidade da Tese* está demonstrada pela lacuna de estudos em sítios nucleares no país que priorizem uma análise holística do impacto de um acidente severo para reatores do tipo PWR.

### 1.3 ESTRUTURA DA TESE

A Tese se divide em oito capítulos sendo o primeiro *Capítulo 1* referente à introdução, revisão e objetivos.

No *Capítulo 2* é apresentada a descrição do acidente, onde através das falhas latentes sucessivas no complexo nuclear se produzirá um cenário de *Station Blackout*, comprometendo o núcleo do reator e causando assim uma liberação não controlada do material radioativo para a atmosfera.

No **Capítulo 3** é feita uma abordagem do conceito termo fonte, onde é mostrada a estrutura do núcleo de Angra I, a origem dos radionuclídeos no reator, além do inventário do acidente proposto.

No **Capítulo 4** observamos a caracterização da área de estudo, como sua localização, topografia e principais aspectos meteorológicos que afetam a dispersão atmosférica.

No **Capítulo 5** é apresentada a metodologia que descreve os modelos mais conhecidos e a justificativa da escolha do modelo para o presente estudo de caso.

No **Capítulo 6** são apresentados os resultados do campo de vento da região bem como o transporte do radionuclídeo selecionado obedecendo o cenário proposto.

No **Capítulo 7** são apresentados os resultados do cálculo de dose de inalação da pluma para a zona de impacto e a discussão sobre o impacto do acidente, incluindo a avaliação sobre a adequação das zonas de planejamento de emergência (ZPEs) da CNAAA, no que tange a área de exclusão e zona de controle tanto para o caso postulado quanto para o descrito no relatório de análise de segurança de Angra I.

No **Capítulo 8** são apresentadas as principais conclusões e recomendações para estudos futuros.

## 2 DESCRIÇÃO DO ACIDENTE

Este capítulo visa identificar as diversas falhas latentes no complexo nuclear de Angra que eventualmente levarão a um *acidente severo* em uma das usinas.

Uma central nuclear possui sistemas, dispositivos e equipamentos que exigem energia elétrica para colocá-los em operação nas mais diversas condições. Em operação normal, essa energia alimenta os sistemas de refrigeração, monitoração, sistemas de controle, iluminação e outros serviços rotineiros. Em condições de emergência, aciona os sistemas e dispositivos de segurança denominados de *CLASSE IE*, que asseguram um desligamento forçado seguro do reator num eventual acidente.

Após o desligamento do reator, o calor residual, proveniente do decaimento radioativo dos produtos de fissão, deve ser removido para evitar a fusão das varetas combustíveis, impedindo assim, a liberação de materiais radioativos para a atmosfera. Porém, em um station blackout, as bombas de remoção de calor do reator não funcionariam e com isto, haveria um aumento gradual da temperatura no núcleo ocasionando um acidente severo na usina.

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Acidente Severo é aquele que excede as bases de projeto (*conjunto de informações que identificam as funções específicas a serem desempenhadas por um item de uma instalação nuclear ou valores específicos escolhidos para parâmetros de controle como dados fundamentais de referência para o projeto*) e que acarreta falhas em estruturas, sistemas ou componentes, impedindo dessa forma a refrigeração do núcleo do reator conforme projetada, levando a uma degradação significativa do mesmo, (CNEN-NE-1.26,1997).

Os acidentes severos têm frequência de ocorrência inferior a  $10^{-7}$  por reator-ano, ou seja, o equivalente a um acidente a cada 10 milhões de anos, dependendo de sucessivas falhas operacionais e dos vários sistemas de segurança da Usina. Não é trivial enfatizar que a probabilidade de que Angra 1 e Angra 2 venham a sofrer acidentes severos simultaneamente é da ordem de  $10^{-13}$  a  $10^{-14}$ , o que afasta completamente essa hipótese do terreno dos cenários considerados em análise de riscos,

(Natrontec, 1998). Um acidente em uma das usinas, por outro lado, não tem como se propagar à outra, não sendo assim plausível considerar efeito do tipo dominó.

Mediante o que foi exposto acima, veremos a seguir, as sucessivas falhas que levarão a este acidente.

## 2.2 FALHA NO SISTEMA DE ENERGIA EXTERNA

O sistema elétrico externo é formado por linhas de transmissão de 500 kV e de 138 kV, conforme *Figura 2*. O sistema de 500 kV é independente do de 138 kV. As duas linhas de 500 kV interligam Angra 1 à subestação de *Cachoeira Paulista*, distância de 80 km, e à de *Adrianópolis*, distância de 120 km.

A principal função dessas linhas é transmitir para a rede externa a energia gerada em Angra 1. No entanto, se o gerador principal não estiver produzindo energia e se estiver isolado do sistema elétrico, as linhas de 500 kV poderão fornecer energia para alimentar, através do transformador auxiliar, T1A1, as cargas do sistema auxiliar, atuando como uma fonte alternativa de energia externa.

Na subestação de *Adrianópolis* existem transformadores que reduzem a tensão de 500 kV para 345 kV e de 345 kV para 138 kV. A subestação de *Cachoeira Paulista* está conectada às de *Campinas* e de *Poços de Caldas* através de linhas de 500 kV. Nas duas últimas subestações, têm-se transformadores que reduzem a tensão de 500 kV para 345 kV e 138 kV.

Além das linhas de 500 kV, três linhas de transmissão de 138 kV, com extensão de 80 km, interligam a Central Nuclear à *Usina térmica de Santa Cruz*. Esta pertence ao sistema Furnas e localiza-se no município do Rio de Janeiro, *Figura 1*. Parte da energia por ela gerada é dedicada ao *Complexo Nuclear de Angra – CNAAA*, constituindo a fonte de alimentação externa principal para os barramentos elétricos de segurança.

A energia provida do gerador principal de Angra 2 via subestação de 500 kV, possui uma ramificação para o autotransformador AT e representa mais uma fonte de alimentação da subestação de 138 kV.

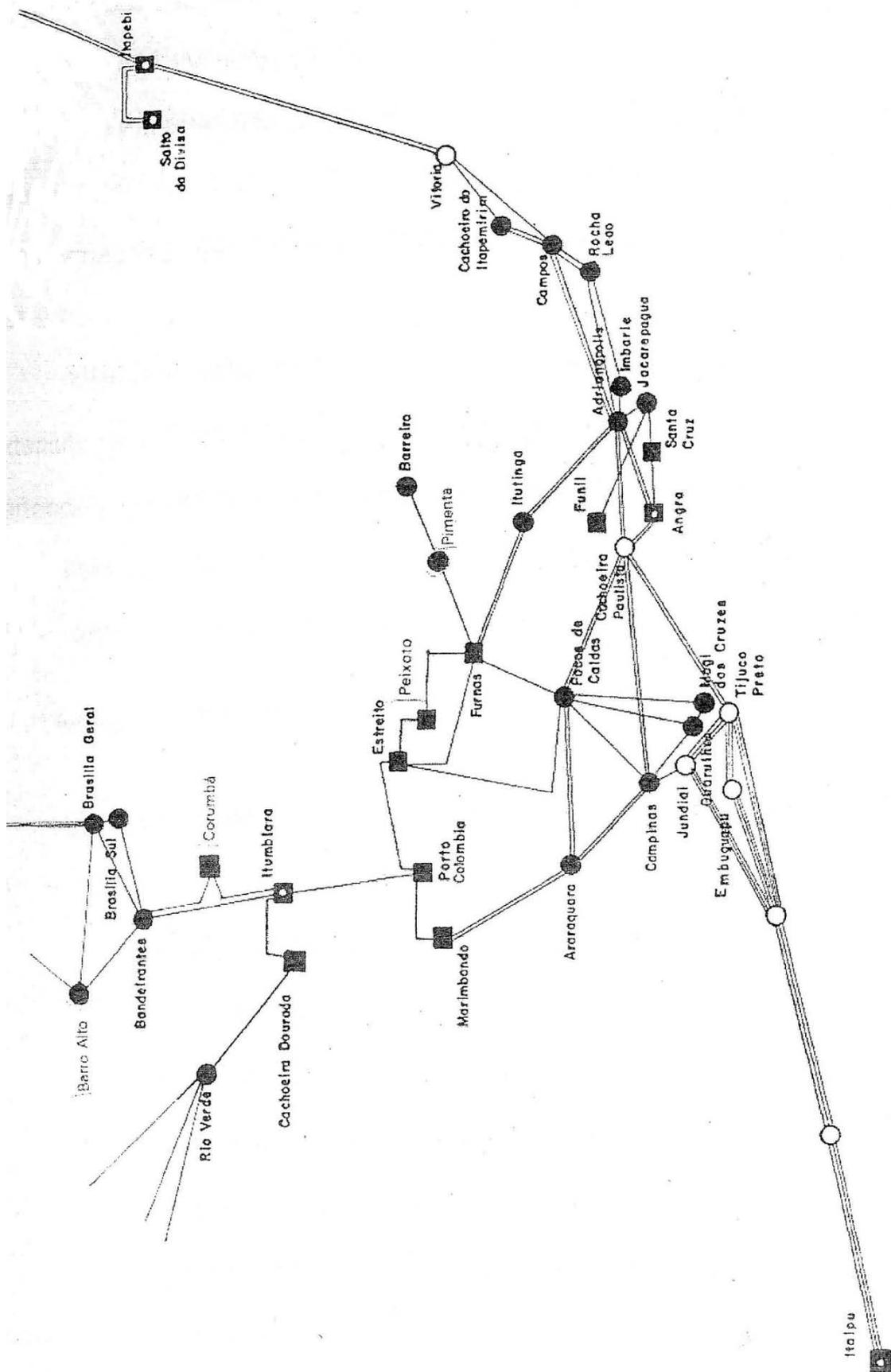


Fig 1 – O Sistema Elétrico de Furnas Centrais Elétricas, FSAR (2011)

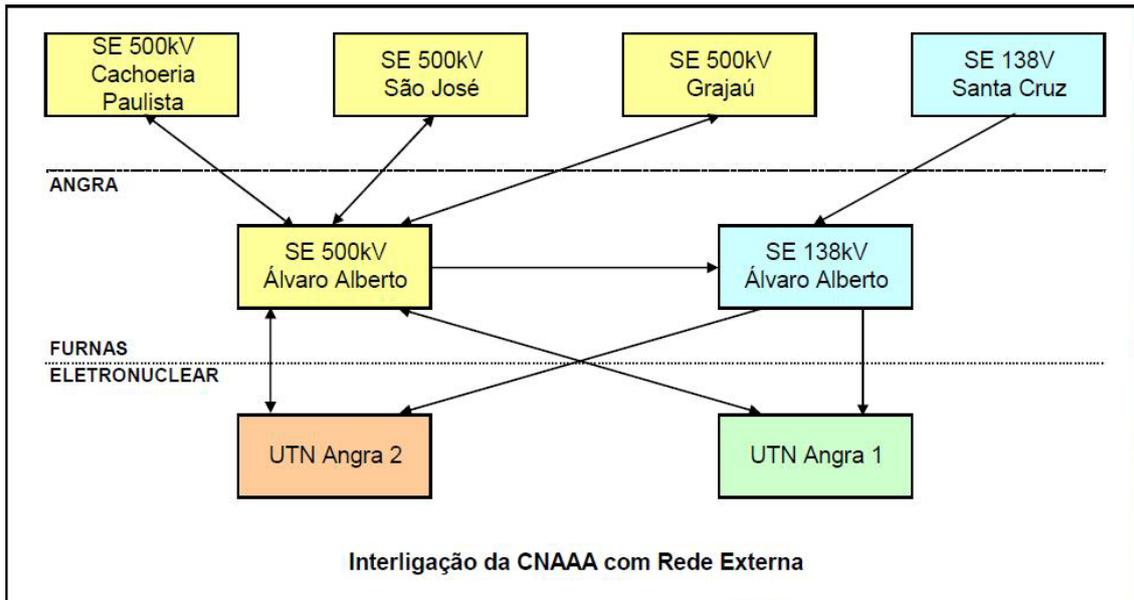


Fig 2 – Linhas de transmissão de 500 kV e de 138 kV, FSAR (2011)

A região de Angra dos Reis se caracteriza pela ocorrência frequente de deslizamento de encosta. Segundo PIMENTEL (2010), a região possui um conjunto de variáveis do meio-físico que apresentam uma elevada fragilidade frente aos processos dinâmicos de encosta, tanto naturais como induzidos pelas pressões do uso e ocupação. O histórico de eventos recorrentes a cada período anual de chuvas, principalmente de novembro a março, confirma a elevada suscetibilidade natural da região de Angra dos Reis frente aos processos dinâmicos em encostas.

Analisando o território de Angra dos Reis sob tal ponto de vista, observa-se a partir da *Figura 3* que a distribuição dos deslizamentos demonstra, entre os anos de 2007 até 2010, que houve intensa atividade de movimentos, o que configura um espaço temporal importante para se avaliar a periodicidade de tais eventos e sua intensidade.

No sentido de avaliar a vulnerabilidade da região de Angra dos Reis sob o ponto de vista dos deslizamentos, a *Figura 4* mostra a suscetibilidade da região em relação aos processos dinâmicos de encosta. O resultado obtido apresenta regiões com áreas de alta e muito altas suscetibilidade, com ocorrência predominante próxima à linha de costa, área mais densamente ocupada, e principalmente nas proximidades das vias de acesso, onde está concentrada grande parte das ocorrências.

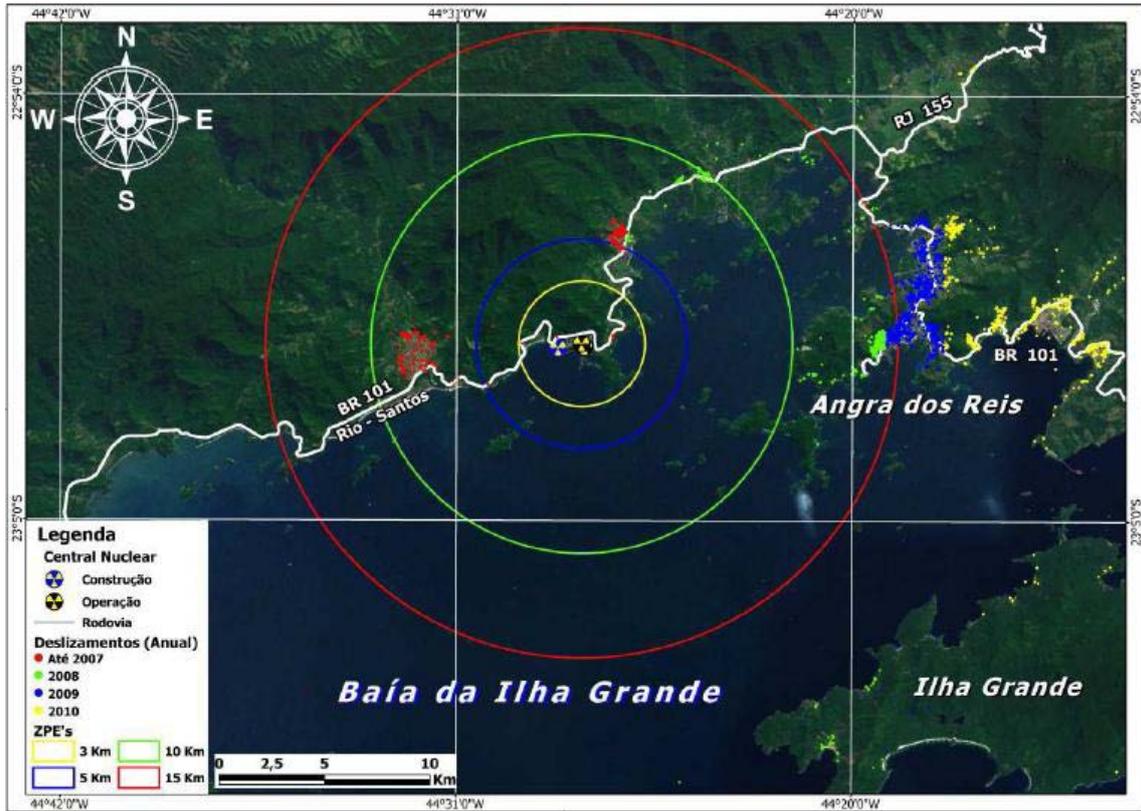


Fig 3 – Deslizamentos ocorridos entre os anos de 2007 a 2010, Silva (2013)

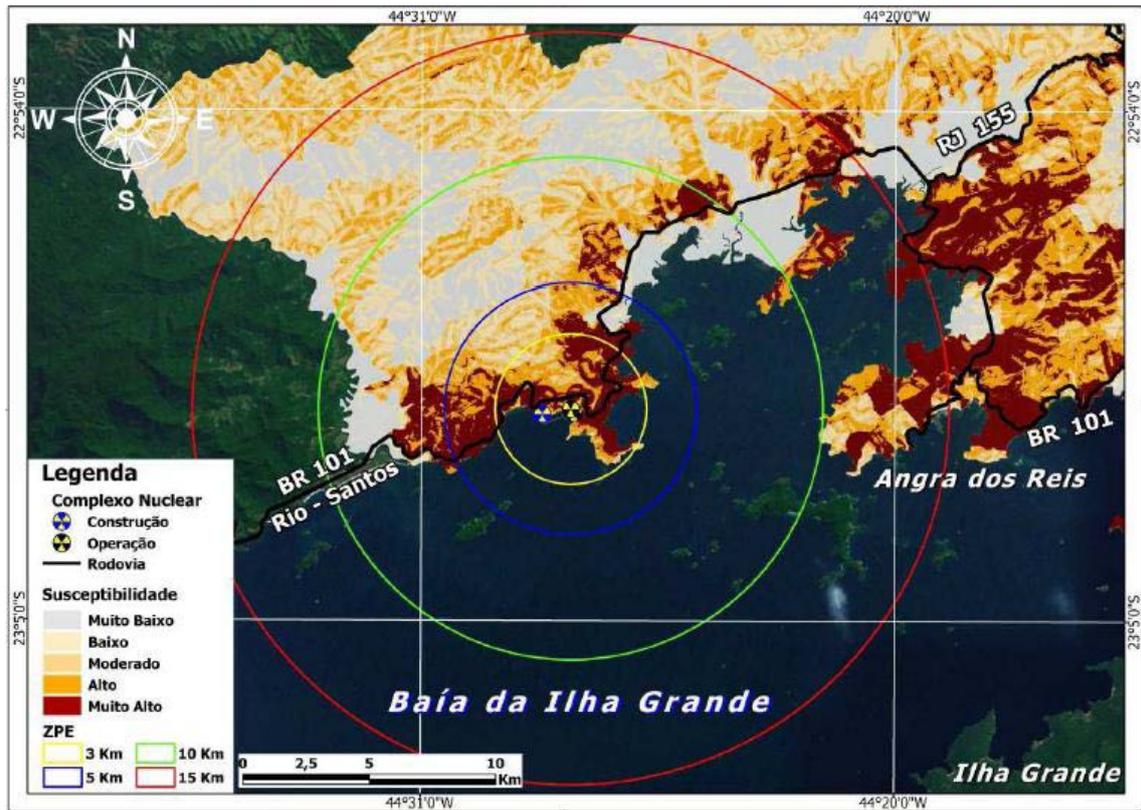


Fig 4 – Susceptibilidade a Deslizamentos, Pimentel (2010)

Podemos observar, mediante as *Figuras 3 e 4*, que a região apresenta um alto índice de deslizamento que, além de prejudicar o fluxo na rodovia BR – 101, numa possível rota de fuga, como mostrado por Silva (2013), apresenta também um grave problema quanto ao fornecimento de energia para a usina.

O grande problema, nesse cenário apresentado, é que a malha energética passa justamente nesses pontos de risco, fazendo com que haja uma *falha latente* no que se refere à alimentação das Usinas de Angra pelo sistema de energia externa.

O *Sistema de Energia Externa* alimenta os sistemas elétricos (SE) de 500 kV e de 138 kV que por sua vez alimentam os barramentos de serviço e de segurança conforme mostra a *Figura 5*. Ocorrendo a perda de energia nos barramentos de serviço 1A1 e 1A2, devido à perda do *SE 500 kV*, tem-se a parada da Bomba de Refrigeração do Reator – *RCP* e, com isto, o líquido refrigerante do primário circula por circulação natural que segundo as especificações técnicas de FSAR (2011), se mantém por tempo suficiente para que o sistema de remoção residual do núcleo entre em ação.

Porém com as sucessivas falhas, um station blackout na usina se torna algo iminente, evento que comprometerá o sistema de remoção residual do núcleo e sua integridade, assunto que veremos a seguir.

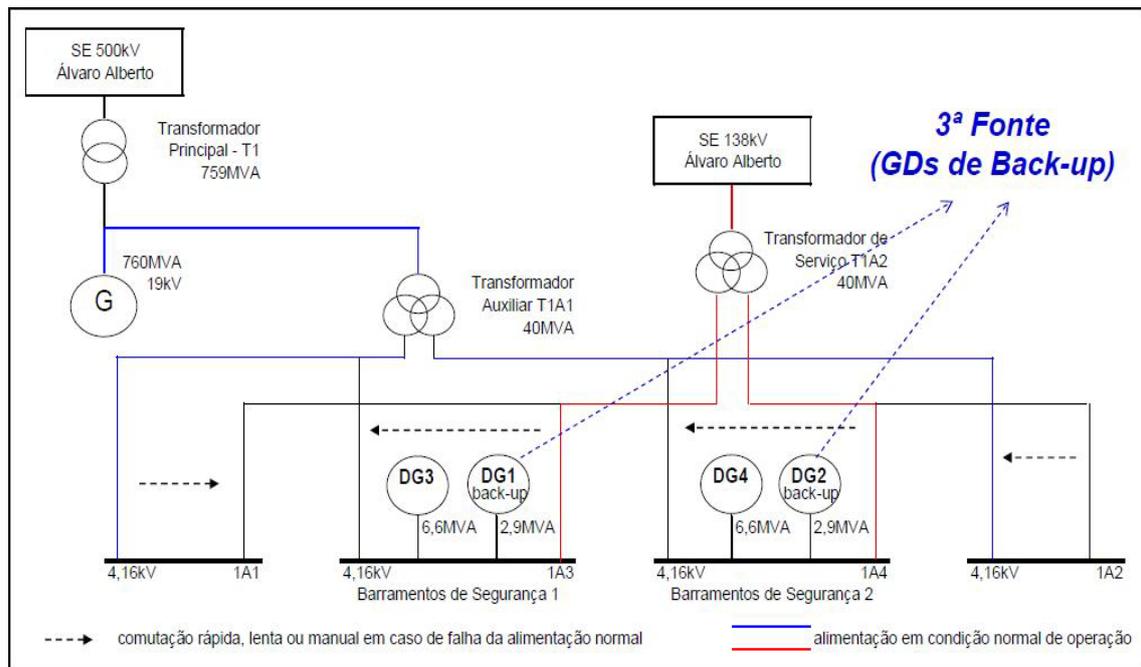


Fig 5 – Alimentação elétrica dos sistemas auxiliares de Angra 1, FSAR (2011)

## 2.3 FALHA NO SISTEMA DE ENERGIA INTERNA

O sistema de suprimento elétrico de emergência de Angra 2 é subdividido em quatro trens redundantes, parciais e independentes entre si, cada um com 50% de capacidade de suprimento da potência requerida para o cumprimento das funções de segurança. Os trens são redundantes em virtude da consideração do caso de falha de uma redundância coincidente com o isolamento para manutenção de outra redundância, de modo que, sendo 4x50%, na indisponibilidade de dois trens os outros dois são suficientes para controlar um acidente postulado, o que diminui consideravelmente um *station blackout* na usina.

Por outro lado, o sistema de suprimento elétrico de emergência de Angra 1 é subdividido em 2 trens cada um com 100% de capacidade de suprimento da potência requerida para o cumprimento das funções de segurança. Contudo, esse sistema 2x100% aumenta a probabilidade de falha na partida, o que torna latente um *station blackout* nesta usina. Devido a isso, iremos entender como se dará um *station blackout* na usina de Angra 1.

No sistema elétrico interno de distribuição de energia elétrica de Angra 1, destacam-se:

- O gerador principal;
- O transformador principal;
- O transformador auxiliar e de serviço;
- Os geradores diesel de emergência;
- Os barramentos de serviço e de segurança.

O diagrama unifilar simplificado mostrando o sistema elétrico é apresentado na *Figura 6*, onde têm-se os seguintes componentes:

- T1 – transformador principal;
- T1A1 – transformador auxiliar;
- T1A2 – transformador de serviço;
- 1A1 e 1A2 – barramentos de serviço;
- 1A3 e 1A4 – barramentos de segurança;
- GD-3 e GD-4 – geradores diesel preferenciais;

- GD-1 e GD-2 – geradores diesel de reserva.

Como o presente trabalho visa o comprometimento do núcleo, focaremos somente nos *barramentos de segurança* e nos *geradores diesel*.

Em funcionamento normal, os barramentos de segurança são alimentados pelas linhas de 138 kV. Caso haja perda destas, tenta-se a transferência rápida ou lenta de T1A1 para T1A2, de modo que este passe a alimentar as barras 1A3 e 1A4. Estas barras estão conectadas às cargas de classe IE que se referem aos equipamentos elétricos essenciais ao desligamento e manutenção da unidade em condições seguras, ou à limitação da liberação de radioatividade para o meio ambiente. As cargas de classe IE são conectadas aos barramentos 1A3 e 1A4 que também são denominadas, respectivamente por *trem A* ou ramo A e *trem B* ou ramo B.

As barras de segurança são redundantes, separadas fisicamente, isoladas eletricamente e independentes para evitar as falhas de causa comum.

Porém, com a falta de energia externa o transformador principal T1 ficará inativo, impossibilitando a alimentação de energia para o sistema interligado, ou seja, para o transformador auxiliar T1A1, que alimenta os barramentos de serviço 1A1 e 1A2 e para o transformador de serviço T1A2 que alimenta os barramentos de segurança 1A3 e 1A4. Neste, cada barramento de segurança é conectado a um gerador diesel de emergência para garantir a alimentação das cargas essenciais à segurança da usina.

A usina Angra I, dispõe de quatro geradores diesel de emergência, dois deles (*GD-3 e GD-4*), são chamados preferenciais, os demais (*GD-1 e GD-2*) são os geradores reservas.

O gerador preferencial GD-3 é conectado ao barramento de segurança 1A3 e o gerador GD-4 ao barramento 1A4. Os geradores reservas substituem os preferenciais no caso de falha destes. A substituição será feita do seguinte modo: *GD-1 substitui o GD-3 e o GD-2 substitui o GD-4*.

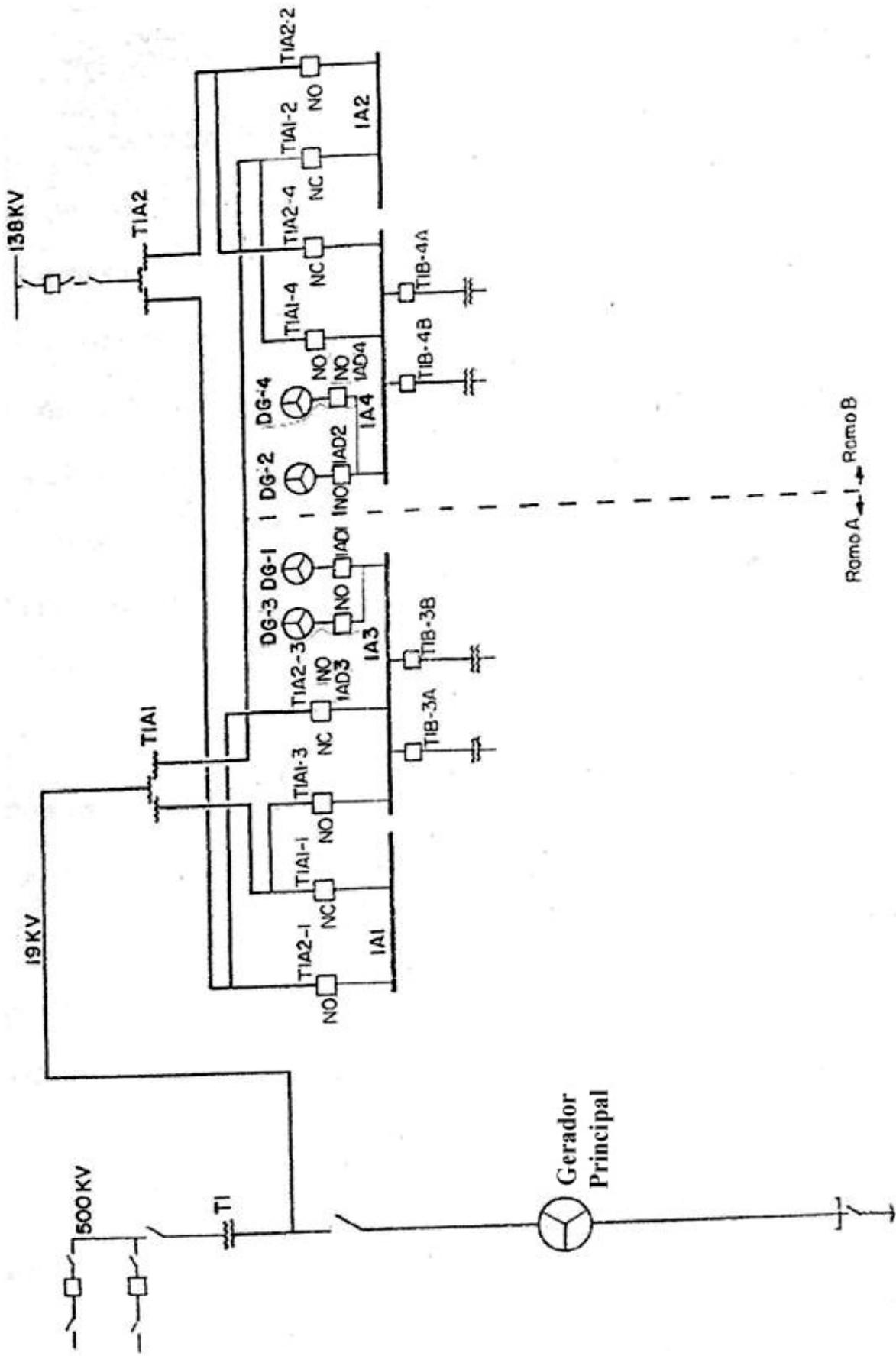


Fig 6 – Diagrama Unifilar do Sistema Elétrico de Angra 1, FSAR (2011)

Cada gerador é capaz de fornecer energia suficiente para alimentar as cargas de segurança do barramento ao qual foi conectado. Além disso, cada gerador pode partir de forma automática ou manual. Naquela a partida se dá em resposta a um “ *sinal de injeção de segurança, SIS*” ou a um “ *sinal de Black-out, BO*”, nesta a partida pode ser feita do painel de controle do gerador, na sala de controle ou do painel de controle local do gerador. Se apenas um deles responder adequadamente, a situação estará sob controle para a usina, pois um único trem é suficiente para garantir as condições de segurança.

A situação crítica ocorre quando nenhum dos geradores preferenciais respondem ao sinal de partida ou não aceitam as cargas, neste caso, os barramentos de energia estarão desenergizados. Tenta-se então conectar um dos dois geradores diesel reserva. Esta manobra tem que ser rápida, já que o problema deve ser sanado em dez minutos, pois segundo Saldanha (1994), após este tempo poderá ocorrer rompimento do selo das bombas de refrigeração do reator.

As Especificações Técnicas exigem que a Usina de Angra dos Reis sempre inicie sua operação com os dois geradores preferenciais de prontidão, (FSAR, 2011). Se for necessário, trabalha-se com um gerador diesel preferencial e um de reserva, ou com os dois de reserva, mas sempre se tenta voltar à situação em que se têm os dois geradores preferenciais alinhados.

Quando os geradores diesel recebem o sinal para partir, três situações são possíveis:

- os dois geradores partem;
- um deles parte e o outro não;
- e nenhum deles partem (*Station Blackout*).

Segundo estudos da U.S.NRC (1983) que apresentou resultados do sistema elétrico de emergência em usinas nucleares americanas, no que tange à falha nos geradores diesel, o que mais se aproximou das características dos geradores de Angra 1 – *GD-1 e GD-2*, que possuem tecnologia americana, foram os geradores diesel da usina de Kewaunee.

Para os geradores diesel *GD-3 e GD-4*, com tecnologia alemã, as probabilidades de falha para esse tipo de gerador são encontradas nos estudos da EPRI (1991).

Na Tabela 1 podemos ver a taxa de falha para os dois tipos de gerador diesel.

Tabela 1 – Dados referentes aos geradores americanos e alemães

<b>Componente</b>	<b>Falha em partir (falha/demanda)</b>	<b>Falha em continuara operar (falha/hora)</b>	<b>Tempo de reparo (hora)</b>
<b>GD-1 ou GD-2</b>	$2,86 \times 10^{-2}$	$2,4 \times 10^{-3}$	19,2
<b>GD-3 ou GD-4</b>	$1,74 \times 10^{-4}$	$9,06 \times 10^{-4}$	17

Nota-se que os geradores diesel GD-3 e GD-4 possuem taxa de falha de operação e de partida muito menor do que a do GD-1 e GD-2. Isto se deve ao fato desse tipo alemão de gerador possuir algumas vantagens que são : um sistema de aquecimento que faz com que o gerador, na partida, se encontre na temperatura de operação e o fato deles conseguirem alimentar as cargas de segurança sem se sobrecarregar evitando o problema de “stress” na partida.

Os geradores GD-1 e GD-2 fazem parte do projeto inicial da usina, ou seja, para esse tipo de gerador já existe uma experiência operacional de aproximadamente 30 anos, tempo total da usina Angra 1, onde num pior cenário haveria o comprometimento desses geradores e, por conseguinte, do sistema elétrico interno, ocasionando um station blackout. Este pior cenário é mostrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Pior cenário para os estados possíveis dos geradores diesel

	<b>Estado</b>	<b>Definição</b>
<b>1</b>	GD-3 ou GD4	Um gerador diesel falha na partida e o outro está em manutenção
<b>2</b>	GD-1 ou GD-2	Um gerador diesel falhou na partida e o outro partiu, porém apresenta problemas no sistema de refrigeração

Todos os estados possíveis, para eventos não severos, encontram-se nos trabalhos de dissertação e tese de Crossetti (1997, 2006).

Para esse tipo de gerador diesel, um problema no sistema de refrigeração dá a este uma parada quase que imediata da sua operacionalidade, fazendo com que os barramentos de segurança 1A3 e 1A4 fiquem desenergizados, ocasionando a perda dos carregadores de bateria e o sistema DC da usina passará a ser suprido pelas baterias, conforme *Figura 7*.

Cada bateria é capaz de iniciar e operar todas as suas cargas necessárias, além de estar imediatamente disponíveis durante a operação normal e em caso de perda de alimentação do sistema AC. Cada bateria é independente da outra, na medida em que é reduzida o problema de falha de causa comum por qualquer um dos eventos de acidentes de base de projeto.

A bomba de remoção de calor residual do núcleo – **RHR** (localizada no trem 1B3B-4B), a bomba de injeção de segurança – **SIP** (localizada no trem 1A3-09) e a bomba de spray da contenção – **SP-1A/1B** (localizada no trem 1A3-11) estão conectadas ao ramo A e ramo B e devido a isto, com a parada de todos os geradores diesel, estes já apresentariam problemas e com isto teríamos o comprometimento do núcleo devido as falhas que veremos a seguir.

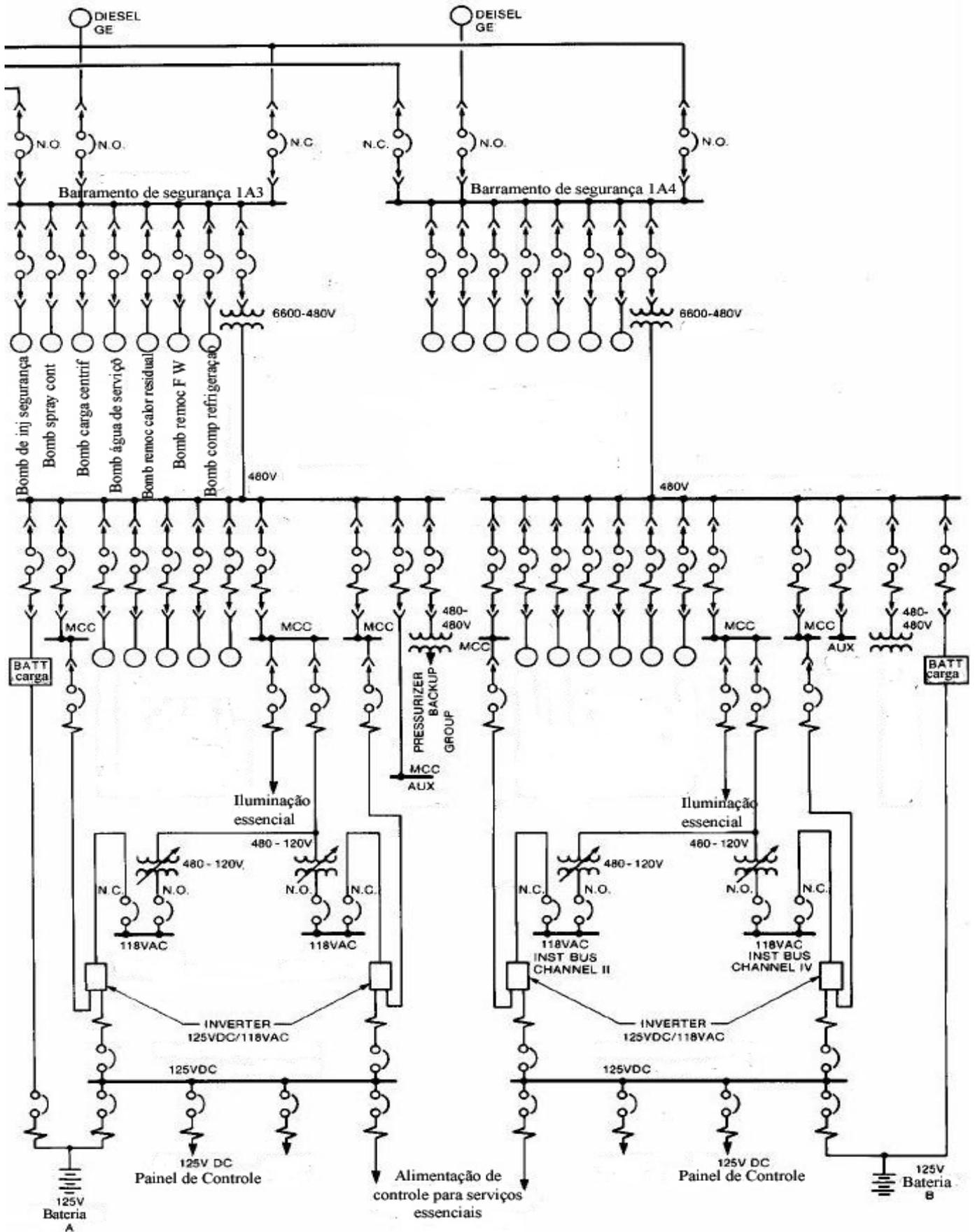


Fig 7 – Diagrama do Sistema de baterias de Angra 1, Westinghouse (1984)

## 2.4 FALHA NA REFRIGERAÇÃO DO NÚCLEO

Com o *station blackout*, a usina começa a apresentar problemas em seu núcleo, devido à falha na refrigeração e na remoção do calor residual. Sem a remoção do calor das varetas combustíveis, a temperatura no interior do núcleo cresce abruptamente e com isto advém uma série de eventos, que são:

- *Aumento da pressão no sistema primário;*
- *LOCA no sistema primário;*
- *Liberação do inventário para o interior da contenção;*
- *DNB e reação  $Zr + H_2O$ ;*
- *Fusão do núcleo.*

Como foi dito anteriormente por Saldanha (1994), num primeiro momento do evento há o rompimento do selo das bombas de refrigeração do reator, porém não é suficiente para baixar a pressão do sistema primário e com isto, com o aumento de temperatura no núcleo, a pressão no sistema continua a crescer.

A Usina Angra 1, como já foi dito, tem um tempo de operacionalidade de 30 anos e embora sempre haja manutenção nas tubulações, um *LOCA*, provocado pelo aumento de pressão no sistema primário, não é um evento que possa ser descartado dentro deste cenário.

Um *LOCA*, ou seja, *Loss of Coolant Accident*, varia de pequenos vazamentos até grandes rupturas nas tubulações do Sistema de Refrigeração do Reator. O pior cenário seria a ruptura tipo guilhotina, *LBLOCA* (conhecido como o grande *LOCA*), de uma das tubulações do sistema, resultando no escoamento do refrigerante por ambas as extremidades da ruptura, conforme a *Figura 8*.

O refrigerante escoa em poucas dezenas de segundos e, embora a reação nuclear já esteja interrompida, o calor de decaimento provoca um aumento descontrolado de sua temperatura colocando em perigo a integridade do núcleo e acarretando a sua fusão total ou parcial.

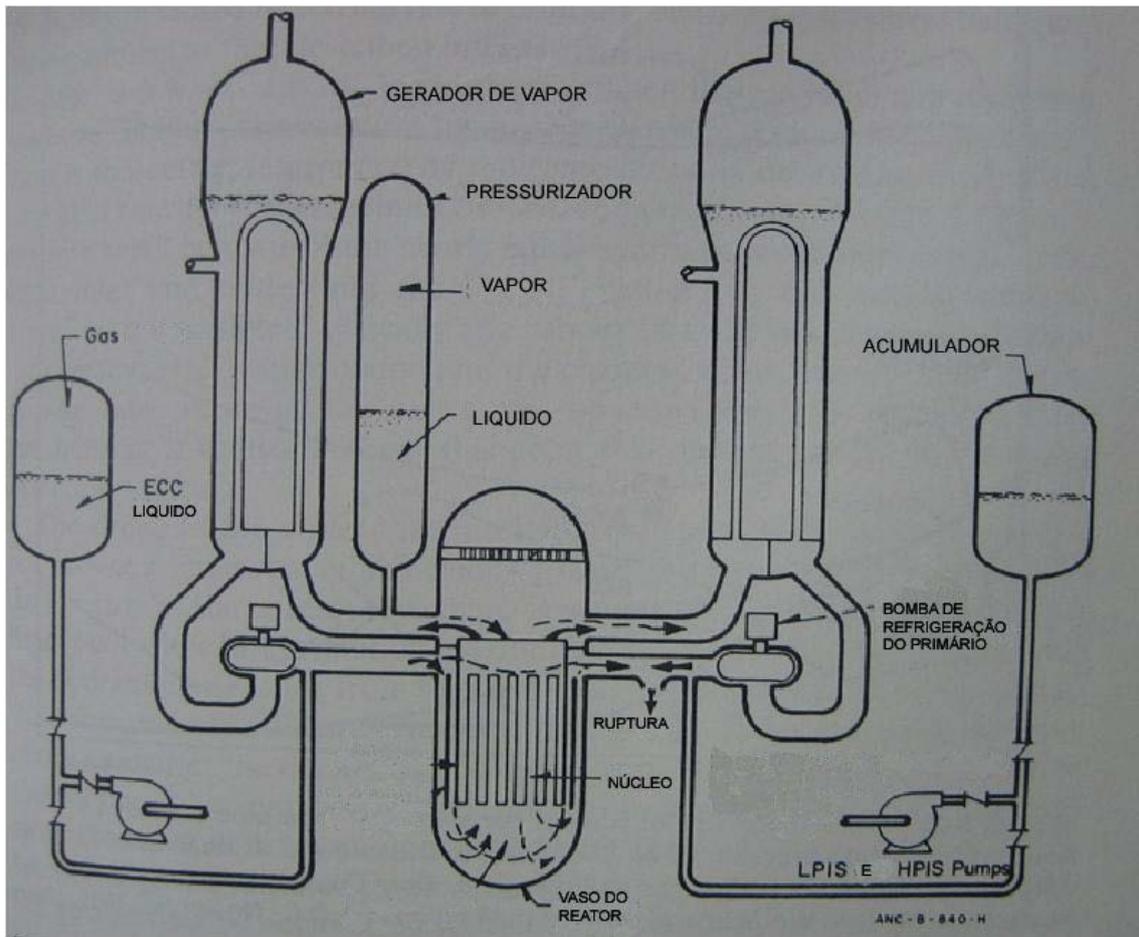


Fig 8 – Local da ruptura no sistema primário – LBLOCA, Todreas&Kazimi (1990)

Com a perda constante de inventário do primário e o aumento da temperatura no núcleo do reator, surgirão bolhas nas varetas de combustível até o aparecimento de um filme de vapor, fenômeno este conhecido como *Departure from nucleate boiling* – *DNB*, Figura 9.

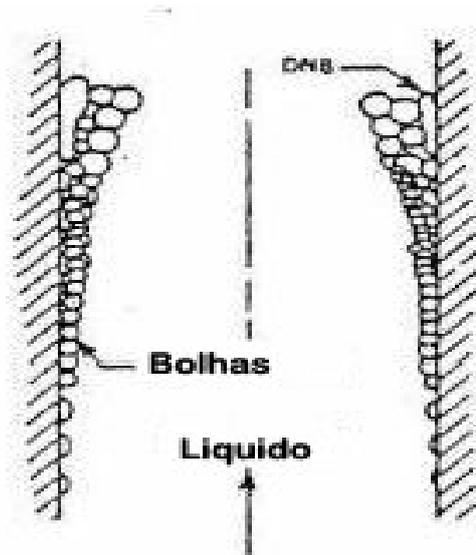


Fig 9 – Departure from nucleate boiling – DNB, Todreas&Kazimi (1990)

Não havendo mais possibilidade de transferência de calor gerado para o refrigerante, a temperatura cresce exponencialmente ultrapassando o valor limite de 1200 °C. A partir desta temperatura ocorre fusão das varetas de combustível e num pior cenário, fusão total do núcleo.

A partir desta temperatura, 1200 °C, também ocorrerá a reação *zircônio + água* ( $Zr + 2H_2O \rightarrow ZrO_2 + 2H_2$ ), e juntamente com o vapor-liquido saturado, haverá agora acúmulo de hidrogênio no interior da contenção.

Segundo Todreas & Kazimi (1990), para um reator PWR, caso da usina em estudo, depois da ocorrência de um LBLOCA, a temperatura do vapor-liquido saturado no interior da contenção chega a valores que variam de 600 a 700 °C.

No caso em estudo, como haverá fusão total do núcleo e o spray da contenção não será acionado, pois estará desenergizado, a temperatura do vapor-liquido saturado compreenderá valores estimados de 700 a 1000 °C, a fim de se analisar a altura que a pluma atingirá no momento da liberação. Esta liberação ocorrerá através do sistema de ventilação da chaminé que veremos a seguir.

## 2.5 FALHA NO SISTEMA DE VENTILAÇÃO DA CHAMINÉ

O sistema de refrigeração da contenção (chaminé) é projetado para remover o calor gerado no interior do edifício da contenção, mantendo assim a pressão no seu interior a valores recomendáveis em situações de operação normal ou em caso de acidente (LOCA), (FSAR,2011).

Durante a operação normal o ar passa por filtros e é continuamente monitorado antes da liberação para a atmosfera. Em situação de acidente ou detecção de radioatividade no ar, este passa por um sistema de filtros de carvão ativado e é monitorado, sendo liberado para a atmosfera após apresentar valores mínimos de radiação.

O *spray da contenção*, vide *Figura 10*, que faz parte do sistema de refrigeração da contenção, tem por função diminuir o calor gerado no seu interior e fazer o arraste do material particulado. Em caso de acidente, LOCA, os radionuclídeos, em especial o iodo, são arrastados para a superfície da contenção, como gotas, onde são capturados pelos “*sugadores*” – *bombas de sucção*, e acondicionados nos tanques de armazenamento.

Em situação normal, *sem um station blackout*, o sistema é acionado automaticamente pelo *signal de injeção de segurança*, proporcionando cerca de 30 minutos de pulverização de uma mistura de água borada e hidróxido de sódio. No caso de um station blackout, o sistema de injeção de segurança que fica conectado ao trem de emergência da usina não será acionado, portanto o sistema não receberá o sinal para que haja a pulverização para controle da atmosfera da contenção.

Sem esta pulverização, os 174 m<sup>3</sup> de vapor-liquido saturado vão preencher toda a atmosfera da contenção elevando sua temperatura juntamente com o hidrogênio formado pela reação no núcleo do reator, (FSAR, 2011).

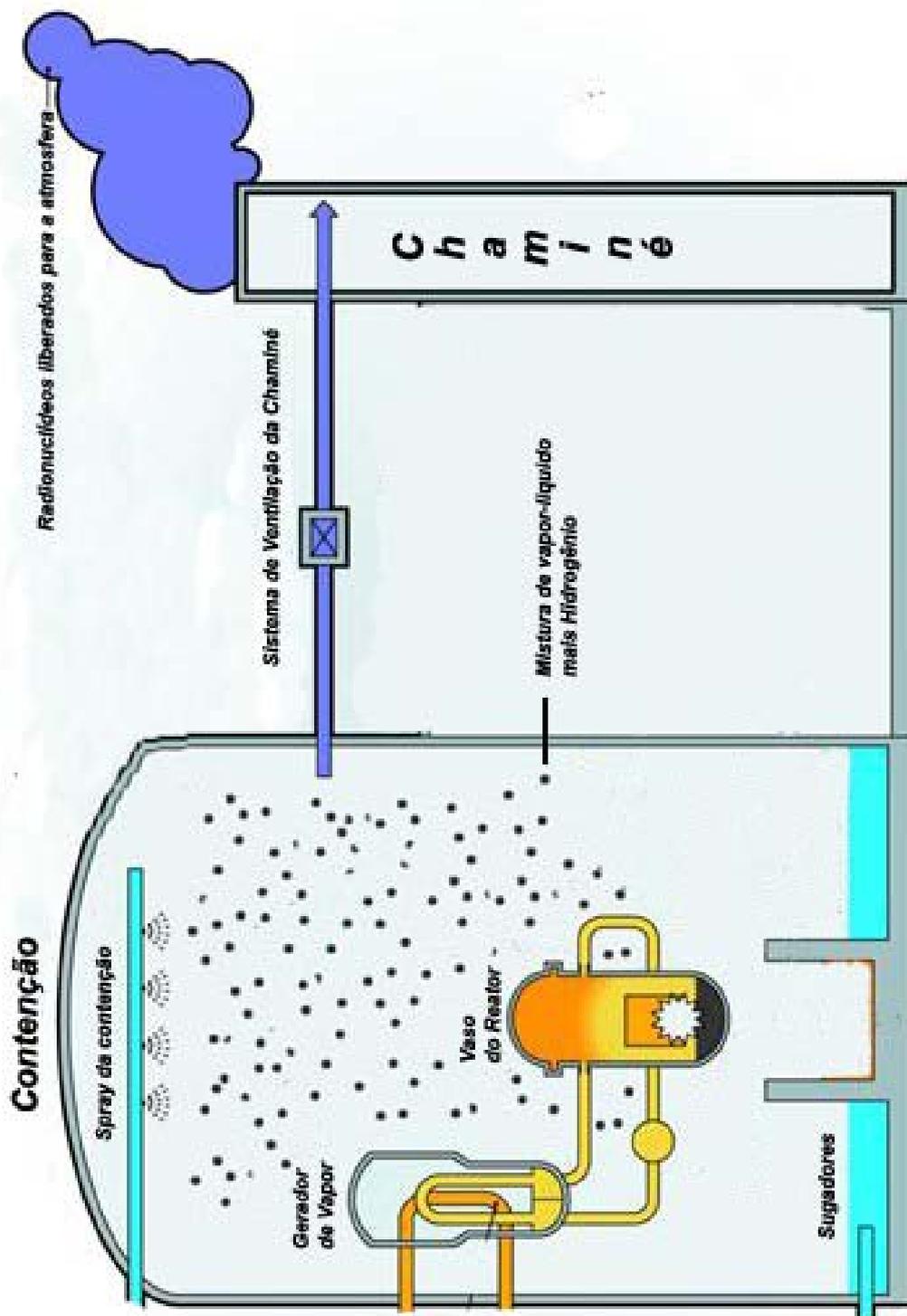


Fig 10 – Sistemas de controle da atmosfera da contensão, Adaptado de Jean-Pierre (2011)

No interior da contenção há também os recombinadores de hidrogênio que queimam o hidrogênio livre, combinando com o oxigênio, resultando em água. Os recombinadores provocam a redução com acúmulo abaixo de 4%, limite seguro da contenção.

No sistema de ventilação da chaminé, existe a possibilidade da liberação não controlada, dependendo somente das válvulas de isolamento tipo borboleta do *sistema purga da contenção*, que libera por diferença de pressão entre as válvulas, fazendo com que se evite o aumento do acúmulo de hidrogênio, e com isso as explosões, e também o aumento da pressão da contenção.

O tempo de liberação de todo o material no interior da contenção para a atmosfera, se dará em quatro cenários de liberação, a saber:

- *12 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas*

A taxa de emissão se dará em **Bq/s**, mais detalhes no Capítulo 6.

Para isto é necessário conhecer o “termo fonte”, para que se possa saber a atividade produzida no interior do núcleo, fato que veremos a seguir.

### 3 TERMO FONTE

#### 3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O termo fonte representa o inventário radioativo localizado em um sistema, equipamento ou componente, o qual serve como referência para avaliar os aspectos de segurança em diferentes condições de operação do reator analisado. Representa também uma das bases de projeto mais importante para o estudo do desempenho da instalação, distribuição dos produtos de fissão nos sistemas do reator e no meio ambiente, em caso de acidentes. Sabendo-se o termo fonte, existe a possibilidade de modelar a dispersão dos radionuclídeos, calcular as concentrações e as doses de radiação, bem como fazer a espacialização das áreas e ambientes atingidos.

Para o caso de um acidente com liberação radioativa, o termo fonte consiste das seguintes informações, HAEA (2006):

- A composição de isótopos radioativos liberados,
- A atividade dos isótopos radioativos liberados,
- O tempo de início da liberação,
- A duração da liberação,
- A altura efetiva da liberação.

O termo fonte deve ser avaliado para estados operacionais e condições de acidentes pelas seguintes razões:

- Garantir que o projeto seja otimizado;
- Demonstrar que o projeto assegura que os requisitos para proteção de radiação, incluindo restrições de dose, sejam atendidas;
- Proporcionar uma base para as medidas de planejamento de emergência que são necessárias para proteger o público que vive na vizinhança do reator;

### 3.2 NÚCLEO DE ANGRA 1

O reator é refrigerado e moderado a água leve e submetida a uma pressão de 155 bar. Possui potência térmica de 1882 MWt e potência elétrica de 640 MWe. Seu núcleo é formado por 121 elementos combustíveis onde cada elemento possui 235 varetas combustíveis. O reator compõe-se basicamente de um *vaso de pressão* e um *núcleo*, vide *Figura 11*.

O combustível nuclear do reator é o urânio enriquecido, presente na forma de pastilhas cerâmicas de dióxido de urânio de formato cilíndrico tendo cada pastilha 9,11 mm de diâmetro e 11 mm de altura, empilhadas no interior de tubos fabricados de uma liga de zircônio e estanho. Esses tubos, denominados varetas de combustível, são hermeticamente fechados e internamente pressurizados com gás hélio, que reduz as tensões e deformações durante a operação.

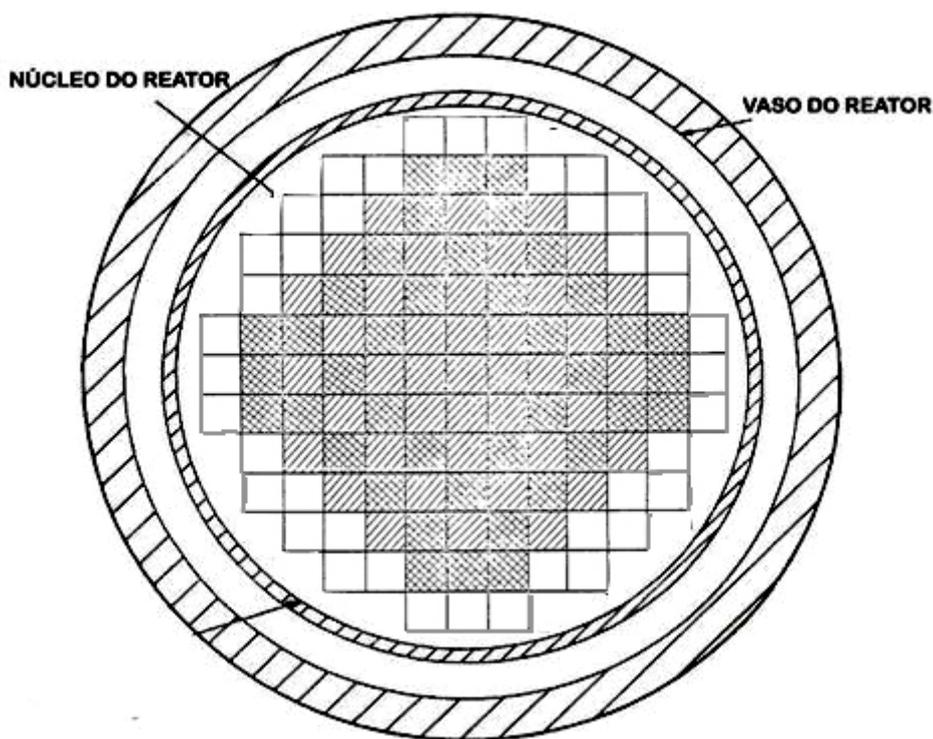


Fig 11 – Geometria do Termo-fonte, FSAR(2011)

O rápido desligamento do reator, interrompendo instantaneamente a reação em cadeia, ocorre com a queda por gravidade, dentro do núcleo, de todas as barras de

controle, mediante a interrupção da corrente elétrica nas bobinas de atracamento desses mecanismos.

### 3.3 ORIGEM DOS ELEMENTOS RADIOATIVOS

Todos os elementos radioativos produzidos em uma usina nuclear têm sua origem no núcleo do reator ou em suas imediações. Os dois grandes processos responsáveis pela sua presença são a fissão nuclear e a ativação por nêutrons.

Na fissão do urânio os elementos resultantes são denominados de *produtos de fissão* e estes são os grandes responsáveis pela radioatividade, porém como são produzidos no interior do combustível, para que possam contaminar a água do primário, esses produtos de fissão têm que atravessar a própria barreira cerâmica das pastilhas combustível deslocando-se por meio de difusão até atingirem o espaço livre entre elas e a parede da vareta combustível.

Este processo é muito lento, de modo que apenas uma fração muito pequena do inventário consegue fazê-lo. Uma vez vencida essa etapa, uma passagem para a água do primário só é possível se alguma vareta apresentar defeito, perdendo sua estanqueidade. Apesar dos rigorosos controles exercidos nas fases de projeto, a incidência desses defeitos provoca o acúmulo de radionuclídeos resultantes da liberação do combustível, tais como  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$  e  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{88}\text{Kr}$ ,  $^{87}\text{Kr}$  e  $^{85}\text{Kr}$ , que contribuem para o inventário do refrigerante. Na Tabela 3 encontram-se alguns dos radionuclídeos presentes no refrigerante, (FSAR, 2011).

A ativação por nêutrons pode se dá dentro do combustível ou fora dele, bastando para isso a presença de um fluxo neutrônico. Os isótopos radioativos produzidos fora do combustível podem ter duas origens. A primeira é a partir de elementos estáveis que constituem o próprio refrigerante primário ou que nele estão dissolvidos, onde podemos citar o nitrogênio ( $^{16}\text{N}$ ), produzido do oxigênio da água, e o trítio ( $^3\text{H}$ ), produzido a partir do ácido bórico diluído no refrigerante para efeito de controle.

A segunda é a partir de elementos, também estáveis, que constituem os materiais em contato com o refrigerante ou dos demais sistemas a ele conectados. Esses elementos entram na água do primário por processos de erosão e corrosão que quando

passam pelo núcleo, são ativados. Entre estes produtos estão o ferro ( $^{59}\text{F}$ ), cobalto ( $^{60}\text{Co}$ ) e o manganês ( $^{54}\text{Mn}$ ).

Tabela 3 – Principais radionuclídeos que compõem o inventário

<b>Gases inertes</b>	<b>Meia – vida</b>
Criptônio-85	10,72a
Xenônio-133	5,25d
<b>Elementos voláteis</b>	
Telúrio-132	3,26d
Iodo-131	8,04d
Iodo-133	20,8h
Césio-134	2,06a
Césio-136	13,1d
Césio-137	30,0a
<b>Elementos com volatilidade intermediária</b>	
Estrôncio-89	50.5 d
Estrôncio -90	29.12 a
Rutênio-103	39.3 d
Rutênio -106	368 d
Bário-140	12.7 d
<b>Elementos refratários</b>	
Zircônio-95	64.0 d
Molibdênio-99	2.75 d
Cério-141	32.5 d
Cério -144	284 d
Neptúnio-239	2.35 d
Plutônio-238	87.74 a
Plutônio -239	24 065 a
Plutônio -240	6 537 a
Plutônio -241	14.4 a
Plutônio -242	376 000 a
Cúrio-242	18.1 a

Para fins de purificação e desgaseificação, uma parte do fluxo total de água de refrigeração que circula no reator é extraída continuamente pelo sistema de controle de volume, purificada em leito de resinas trocadoras de íons contidas em filtros de leito misto e reinjetada no sistema de refrigeração do reator.

Segundo as *especificações técnicas*, (FSAR, 2011), a cada ano (12 meses), se completa um ciclo do combustível, onde 1/3 do núcleo é trocado por novos elementos ou por elementos que não tiveram sua queima completa, estes estocados em piscinas.

Para fins de modelagem da dispersão, o radionuclídeo utilizado neste trabalho será o  $^{131}\text{I}$ , que será melhor detalhado no próximo tópico.

### 3.4 RADIONUCLÍDEO UTILIZADO NA DISPERSÃO

O iodo radioativo  $^{131}\text{I}$  é obtido a partir de reações de fissão nuclear que ocorrem do decaimento do elemento urânio. O  $^{131}\text{I}$  pode ser encontrado como subproduto de explosões nucleares e de usinas nucleares, e é um dos principais componentes da radiação liberada nos acidentes nucleares de *Chernobyl*, em 1986, e de *Fukushima*, em 2011, sendo que nesse último, as concentrações encontradas de  $^{131}\text{I}$  foram aproximadamente 7,5 milhões de vezes acima do permitido, chegando a 300 000 Bq/cm<sup>3</sup> na água contaminada (muito acima do permitido). O iodo radioativo pode causar câncer e mutações genéticas, especialmente na glândula tireoide.

O iodo é rapidamente absorvido na circulação após a inalação ou ingestão, o mesmo se concentra na tireoide e é excretado, predominantemente, na urina. Assim depois da captação, o  $^{131}\text{I}$  pode ser diretamente detectado por medição de atividade na tireoide ou indiretamente em amostras de urina.

O  $^{131}\text{I}$  decai com uma meia-vida de 8,02 dias por beta menos ( $\beta^-$ ) e radiações gama ( $\gamma$ ). Seu decaimento se dá em duas etapas :

- $^{131}_{53}\text{I} \mapsto \beta^- + \bar{\nu}_e + ^{131}_{54}\text{Xe}^* + 606 \text{ keV}$
- $^{131}_{54}\text{Xe}^* \mapsto ^{131}_{54}\text{Xe} + \gamma + 364 \text{ keV}$

A primeira emissão de  $\beta^-$  também produz um anti-neutrino que carrega quantidades variáveis de energia, sendo 606 keV na primeira emissão e 364 keV na segunda por radiação gama, tendo como produto final o xenônio - um gás nobre.

A justificativa do uso desse radionuclídeo na tese se dá devido ao impacto desse elemento no ser humano, por meio da tireoide, e que devido a isto, é de suma importância saber as concentrações nas primeiras horas. Outro motivo, dentro desse mesmo aspecto, é a *atividade específica e meia vida curta*.

A meia vida possui um efeito profundo sobre a atividade específica. Quanto mais curta é a meia vida, maior é a atividade específica. Quando um radionuclídeo de meia vida curta sofre o processo de decaimento, os átomos do radionuclídeo em questão emitem radioatividade quando decaem. Quanto maior for esta taxa de decaimento (atividade), ao mesmo tempo em que mantém uma massa constante, maior será a atividade específica.

Em outras palavras, os átomos de um radionuclídeo de meia vida longa, não decaem com uma frequência muito rápida, portanto, ocorrerá uma menor taxa de decaimento dentro de uma massa específica do material, resultando numa atividade específica menor, (FSAR, 2011).

Mais detalhes sobre o valor da atividade específica do  $^{131}\text{I}$  serão apresentadas no Capítulo 6.

### 3.5 CENÁRIO DO ACIDENTE PROPOSTO

O cenário proposto abrange dois momentos (*visando o pior cenário*). O *primeiro*, *Fusão total do Núcleo*, se dará com o reator a 100% de sua potência e a partir do início do ciclo combustível, considerando 6 dias efetivos de queima. O código utilizado pela Eletronuclear foi o *OrigenArp*, (Eletronuclear, 2014) que calcula a variação da concentração de vários isótopos ao longo do tempo gerados através da transmutação neutrônica, fissão ou decaimento radioativo, após um período de irradiação ou de decaimento.

Conforme descrito em FSAR (2011), o ciclo do combustível, *para as Usinas de Angra*, se dá em 12 meses, onde 1/3 do núcleo é trocado por novos elementos ou por elementos que já obtiveram sua queima, estes acondicionados em piscinas.

O *segundo*, *Atmosférico*, se dará no mês mais quente e chuvoso do ano, *Janeiro* (Silva, 2013); (Soares, 2006) e (Paiva, 1998), o que afetará significativamente as brisas vale-montanha e também os coeficientes de dispersão, fator que influencia na dispersão do Puff.

Levou-se em conta para este acidente a liberação de todo o  $^{131}\text{I}$  contido no núcleo, a fim de se analisar o pior caso para este tipo de radionuclídeo.

## 4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

### 4.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo, vide *Figura 12*, está situada no litoral do estado do Rio de Janeiro, no sul fluminense, região conhecida como *Costa Verde*, no município de Angra dos Reis. Abrange uma área de 819 km<sup>2</sup>, distribuídas por 645 km<sup>2</sup> de continente e 174 km<sup>2</sup> de ilhas, onde se encontra a CNAAA (23,00°S – 44,28°W).

A região está localizada entre a Baía da Ilha Grande e a Serra do Mar, região que apresenta uma meteorologia bastante peculiar, em função da topografia complexa e do contraste oceano-continente, que influencia drasticamente o regime de vento e a estabilidade, causando modificações na atmosfera local, (LEÃO, 1998, NICOLI, 1986). A CNAAA possui uma orografia de altitude média da ordem 700 m e dista 1 km da área central.

O nível do fundo do vale da CNAAA está entre 3 e 5 m acima do *Nível Médio do Mar (NMM)* e é aproximadamente retangular com área de 264.000 m<sup>2</sup>.



Fig 12 – Localização da área de estudo, (Silva, 2013)

## 4.2 TOPOGRAFIA

A geomorfologia regional é extremamente acidentada, com encostas bastante íngremes, declividades acentuadas e por vezes negativas, com diferenças de cotas de até 800 m. Apresenta duas unidades de relevo, uma formada por cristas e escarpas, e a outra, pelas baixadas.

As escarpas apresentam um desnível médio de 700 m e são dissecadas por vales semi paralelos que se alternam com trechos de recortes menos profundos, intermediários entre os rios que descem a serra. Possuem ainda vertentes longas, de mais de 2 km de extensão, (ROSA, 2003). A área da CNAAA é caracterizada pelo contraste deste relevo, onde as escarpas da Serra do Mar chegam junto ao litoral num raio de 80 km em seu entorno, onde estas montanhas possuem altitudes superiores a 2500 m e platôs bastante amplos acima de 1300 m. Na *Figura 13* podemos observar a topografia de Angra dos Reis.

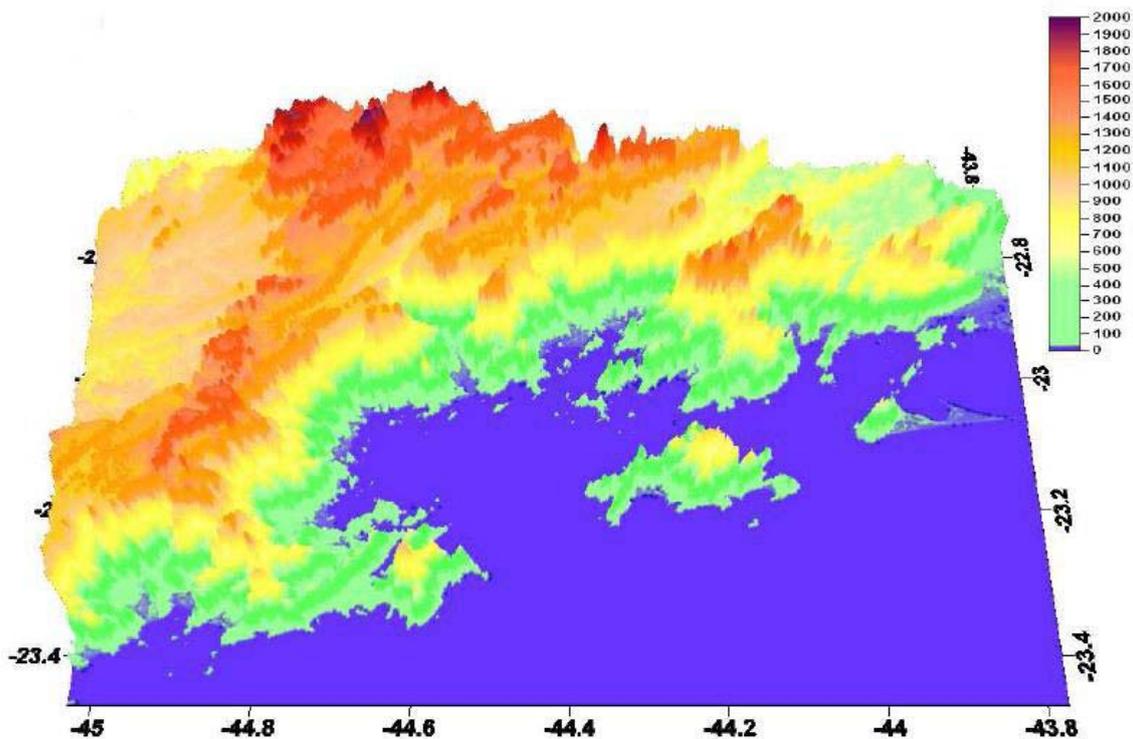


Fig 13 – Campo tridimensional da topografia de Angra dos Reis, (USGS,2003)

Na direção NNW, a pouco mais de 6 km, depara-se com o Pico do Frade com aproximadamente 1.589 m de altitude. Seguindo na mesma direção, a distâncias de cerca de 35 km, há diversos cumes com alturas em torno de 2.000 metros.

Partindo-se da BIG e penetrando-se pelo continente, na direção NE, verifica-se que a Serra do Mar apresenta uma descontinuidade, formando uma grande calha entre as Serras da Carioca e as Serras das Araras, cujo nível mais elevado possui altitude de cerca de 600 metros.

Esta brecha na muralha da Serra do Mar é um importante fator na formação dos regimes de ventos da região, conforme mostrado na *Figura 14*. A linha tracejada indica a rota principal dos ventos (Natrontec, 1998).

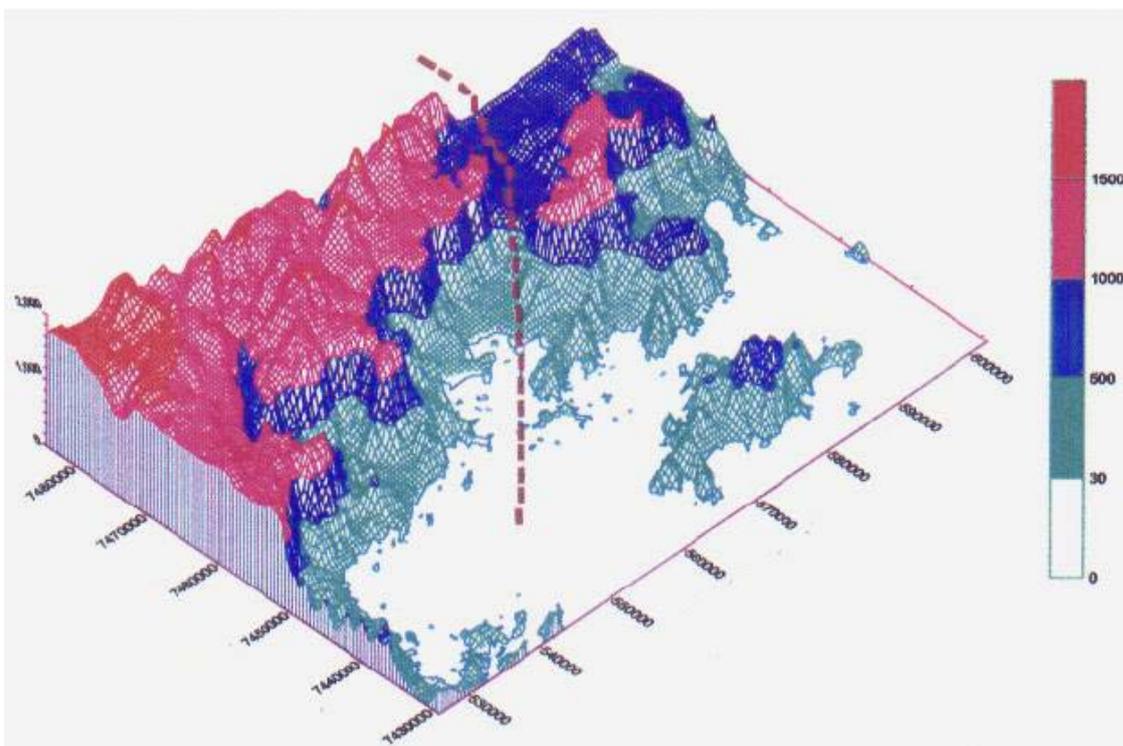


Fig 14 – Vista da brecha da Serra do Mar, a uma posição 45° acima do horizonte, (Natrontec, 1998)

### 4.3 ASPECTOS METEOROLÓGICOS DA REGIÃO

A região possui uma meteorologia complexa, principalmente devido à configuração geomorfológica que contribui para a diversidade climatológica de toda a área. Os principais aspectos que caracterizam o quadro meteorológico local (direções predominantes dos ventos, intensidades e estabilidade atmosférica) são fundamentais para a definição de cenários no sentido de serem aplicadas modelagens específicas, especialmente no que diz respeito à dispersão de poluentes.

Oliveira Júnior (2008) ressaltou que nesta região há fortes indícios de que as brisas marítimas interagem com a cadeia montanhosa, provocando a recirculação local, e que a proximidade com o oceano, a topografia e a forte insolação tornam o regime de ventos muito inconstantes e fracos.

Angra dos Reis é conhecida por altas taxas pluviométricas, que ultrapassam os 2000 mm anuais, sendo mais intensas entre os meses de novembro a março. As chuvas são acentuadas não apenas pela interação das massas úmidas marítimas com as escarpas, mas também pela passagem e semi-estacionamento das frentes que muitas vezes são, em parte, retidas nas reentrâncias do relevo local (ROSA,2003).

A região apresenta um clima local muito úmido e quente, semelhante ao encontrado nas florestas tropicais, entretanto, existem alguns fatores que alteram o seu clima, sendo elas: *as correntes oceânicas, a altitude e a posição em relação às serras*. As temperaturas máximas ocorrem em fevereiro e as mínimas em julho, sendo a máxima na média próximo de 39,3° C e a mínima de 9,4° C, (ROSA, 2003).

Em Angra, ocorrem em média 158 dias chuvosos por ano, com médias mensais acima de 70 mm. As grandes chuvas acontecem nos meses de outubro a abril, sendo janeiro o mês mais chuvoso, com 276,4 mm em média.

A umidade média do ar em Angra é de cerca de 81%, valor que não se altera muito durante o ano; a nebulosidade média varia de 50% no inverno a 80% no verão. Os sistemas meteorológicos dominantes na região são baseados nos sistemas *sinóticos* e *sub-sinóticos*. Maiores detalhes podem ser encontrados no trabalho de tese de Oliveira Júnior (2008).

## 5 METODOLOGIA

### 5.1 DESCRIÇÃO DOS MODELOS

O uso de modelos matemáticos facilita o processo de simulação dos mecanismos de transporte e deposição de poluentes. Esses modelos fornecem uma estimativa teórica conservadora dos níveis de concentração de poluentes no ar, possibilitando a avaliação da evolução espacial e temporal destes poluentes na atmosfera.

A abordagem teórica sobre a dispersão de substâncias na atmosfera utiliza modelos matemáticos para descrever o campo de concentração a partir de dados da fonte emissora e das condições meteorológicas, onde muitos desses modelos baseiam-se em distribuições estatísticas e necessitam de dados experimentais para que os seus parâmetros sejam estimados.

O potencial de risco de uma liberação depende das formas pelas quais os efluentes são diluídos e transportados pela atmosfera, além dos mecanismos em que os mesmos são depositados na superfície. Nesta perspectiva, a fim de se prever estes processos atmosféricos, faz-se uso dos modelos numéricos de dispersão atmosférica.

O uso de modelos meteorológicos vem sendo consolidado, entre outros fatores, com a maior disponibilidade de dados provenientes das observações meteorológicas (de superfície e altitude). A previsão realizada por eles tenta simplificar a descrição da atmosfera e, em geral, têm contribuído para o crescimento da pesquisa meteorológica no mundo, tendo como resultado a melhoria do conhecimento de vários fenômenos de interesse.

Os modelos utilizam as equações de conservação para produzir uma previsão do estado futuro da atmosfera e parametrizações com base no conhecimento teórico e empírico para modelar fenômenos onde há dificuldade de se estabelecer leis gerais. Normalmente, as parametrizações disponíveis nos modelos são referentes ao balanço de radiação e sua interação com a superfície e atmosfera.

Nas últimas décadas, muitas pesquisas sobre o desenvolvimento de modelos numéricos de mesoescala mais realísticos têm sido feitas e alguns desses veremos a seguir.

O **MM5** – Model Mesoscale 5, foi desenvolvido pela Pennsylvania State University – Universidade do Estado da Pensilvânia, com o suporte do National Center for Atmosphere Research – Centro Nacional para Pesquisas Atmosféricas. É um modelo de área limitada e destinada à realização de previsão de tempo, a partir de simulações de circulações atmosférica regional ou de mesoescala. Baseado no modelo originalmente desenvolvido por GRELL et al. (1994), o MM5 vem sendo continuamente modificado.

As parametrizações da camada limite atmosférica disponíveis no MM5 podem ser classificadas em dois grupos: o primeiro inclui esquemas baseados na camada limite superficial, desenvolvido por BLACKADAR (1976). O segundo grupo é baseado nos trabalhos de MELLOR e YAMADA (1974, 1982), onde os fluxos turbulentos são modelados em função da turbulent kinetic energy – energia cinética turbulenta.

O modelo **Advanced Regional Prediction System** – *ARPS*, possui técnicas numéricas avançadas que incluem esquemas de advecção para o transporte escalar de 4ª ordem e outras variáveis. O *ARPS* é capaz de simular alguns fenômenos, particularmente as tempestades (tropicais e orográficas), as frentes frias, as brisas marítimo-terrestres, a convecção rasa e profunda, o regime de precipitação e tornados. No caso da estrutura da camada limite atmosférica, ele foi usado para simular num período de 48 horas, sendo usados esquemas de advecção, espécie da água, da turbulent kinetic energy e de microfísica de nuvens. Os resultados simulados concordaram substancialmente com dados observacionais, para os dias 33 e 34 do experimento Wangara (XUE et al., 1996).

O **RAMS** – *Regional Atmospheric Modeling System*, possui seis opções básicas para computar o coeficiente de difusão turbulento. Dois destes são baseados nos esquemas de SMAGORINSKY (1963) apud (ATMET, 2003) que relaciona os coeficientes de mistura à taxa de deformação, e incluem correções para a influência da frequência de Brunt-Väisällä e do número de Richardson.

Estes esquemas são considerados modelos locais, onde os coeficientes de mistura dependem somente das propriedades locais e atuais do fluxo. As demais opções parametrizam os coeficientes de mistura através da parametrização da escala subgrade da turbulent kinetic energy que é prognosticada.

O **AERMET/AERMOD**, é um modelo de dispersão gaussiano, ou seja, a pluma se dispersa na direção vertical e horizontal em regime permanente, sendo que a distribuição em grandes distâncias se altera por efeito da turbulência na camada da superfície da Terra (HOLMES e MORAWASKA, 2006). Neste modelo, o sistema de coordenadas é fixo e as propriedades do fluido como densidade, temperatura e velocidades do vento, são calculadas em um ponto do espaço fixo com coordenadas nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , no tempo  $t$  desejado.

O pré-processador de dados meteorológicos do modelo matemático AERMOD é o AERMET. Dentre as suas funções, a principal é a organização dos dados meteorológicos para posterior uso no AERMOD. Para isso, o pré-processador é dividido em três etapas complementares: na primeira ocorre a extração e o processamento dos dados meteorológicos a serem considerados no estudo.

Na segunda etapa ocorre o agrupamento dos dados em períodos de 24 horas e gera com eles um único arquivo, e na última etapa de processamento o programa lê o arquivo gerado pelo estágio anterior e estima os parâmetros de camada limite, que são necessários como dados de entrada do AERMOD (EPA, 2004b). O AERMOD utiliza esses valores para gerar um perfil de variáveis meteorológicas, necessário na simulação da dispersão dos poluentes.

Para o trabalho de tese o modelo atmosférico utilizado foi o **WRF**, modelo que melhor representa as condições topográficas da região e o modelo **CALPUFF** – modelo de dispersão. Será feito acoplamento dos dados de prognóstico do WRF com os dados observáveis (*dados das 4 torres da CNAAA*), através do CALMET, uma das ferramentas do CALPUFF. A descrição desses modelos veremos a seguir e a parte do acoplamento dos dados meteorológicos no Capítulo 6.

## 5.2 MODELO ATMOSFÉRICO – WRF

O *WRF* – *Weather Research and Forecasting*, é um sistema de modelagem numérica, desenvolvido para a previsão do tempo e estudo de fenômenos atmosféricos de micro e meso escala. O seu desenvolvimento é resultado da colaboração entre centros de pesquisas e agências governamentais dos *EUA*: *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*, *National Centers for Environmental Prediction (NCEP)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, *US Department of Defense*, *Oklahoma University* and *Federal Aviation Administration (FAA)*.

De domínio público e disponibilizado gratuitamente, cientistas de universidades em todo o mundo participam de seu desenvolvimento. É composto pelo sistema de modelagem *ARW (Advanced Research WRF)*, desenvolvido nos últimos anos e que atualmente está na versão 3.41, disponível desde abril de 2012. Tal sistema é utilizado para diversas aplicações, entre as quais aquelas que mais se destacam são, (SKAMAROCK *et al.*, 2008):

- simulações idealizadas,
- pesquisa de parametrizações,
- pesquisa de assimilação de dados,
- pesquisa de previsão do tempo,
- previsão numérica do tempo em tempo real,
- pesquisa de furacões,
- pesquisa do clima regional,
- aplicações de modelagem acoplada, e ensino.

O *ARW* é o coração do sistema do *WRF*, uma vez que ele realiza todas as integrações numéricas e aplica as parametrizações escolhidas pelo usuário. O *WRF* caracteriza-se como um modelo totalmente compressível e não hidrostático (com uma opção de simulação hidrostática), apresentando coordenada de pressão hidrostática do tipo *terrain-following*, em termos de coordenada vertical.

Sua grade é do tipo *Arakawa C*, uma das estruturas mais eficientes computacionalmente e conveniente para a representação de fenômenos atmosféricos em amplo espectro de escalas.

O modelo utiliza esquema de integrações no tempo *Runge-Kutta* de segunda e terceira ordem, além de esquemas de advecção de segunda e sexta ordem, tanto na horizontal como na vertical. A versão 3 do *WRF* suporta uma variedade de capacidades, entre elas: simulações de dados reais e simulações idealizadas; diversas opções de condições de fronteiras laterais para simulações reais e idealizadas; opções físicas completas e diversas opções de filtros; análise de *nudging* tridimensional; *nudging* observacional; aplicações regionais e globais.

A estrutura deste sistema de modelagem integra alguns módulos principais, vide *Figura 15*. O sistema de processamento do *WRF*, os núcleos de cálculo da solução dinâmica e o pós-processamento.

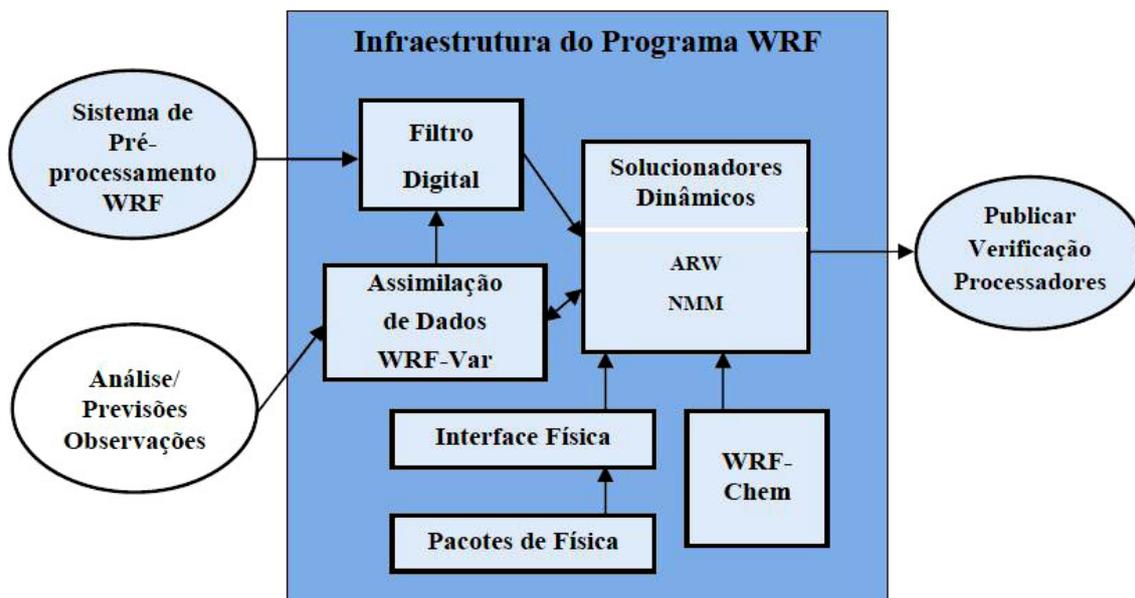


Fig 15 – Estrutura básica de funcionamento do *WRF*, Adaptado de (SKAMAROCK, 2008)

De uma maneira mais detalhada, o sistema é dividido em módulos de processamento, conforme demonstra a *Figura 16*.

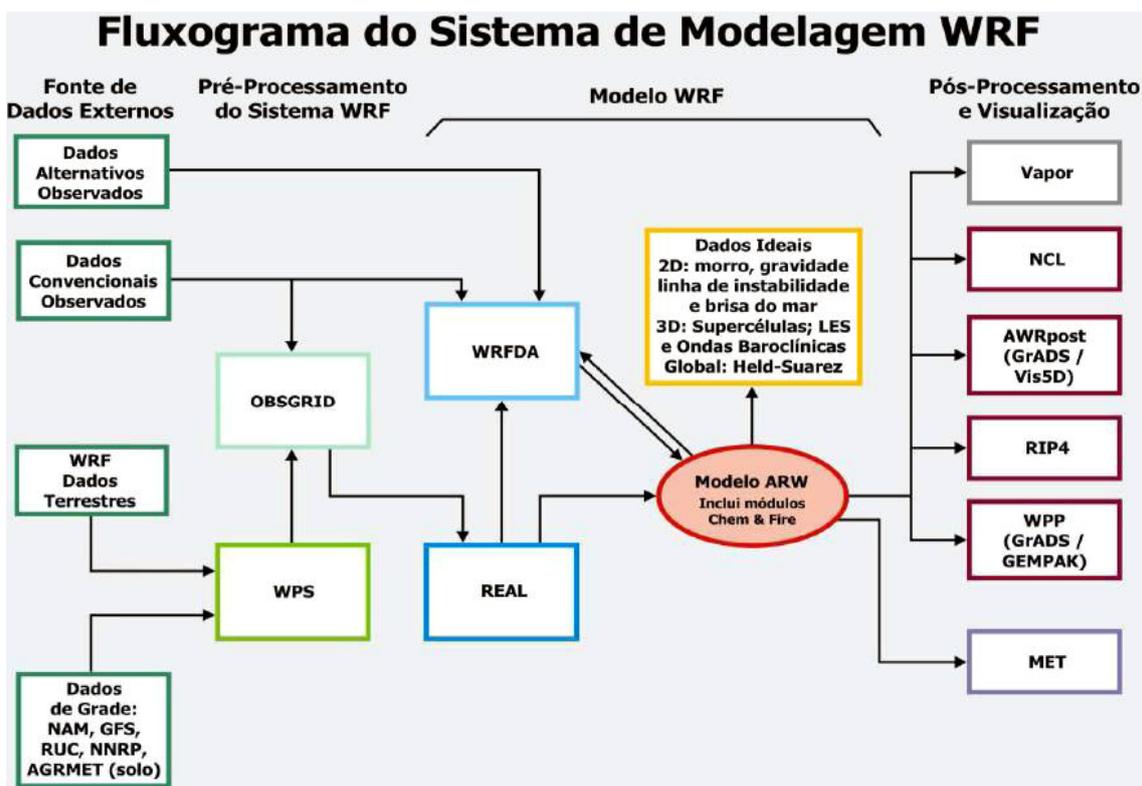


Fig 16 – Fluxograma do sistema *WRF*, Adaptado do *WRF/ChemUser'sGuide* (2012)

A etapa inicial ocorre através do processamento de dados auxiliares que fornecem ao modelo informações como observações meteorológicas, dados de reanálises, dados prognósticos de modelos globais, entre outras informações. Na segunda etapa, o pré-processamento do modelo ocorre através dos módulos *WPS* e *OBSGRID*.

O *WPS* é o sistema de processamento do *WRF* que é primariamente utilizado para simulações reais e suas funções compreendem: definição do domínio de modelagem, interpolação de dados terrestres (topografia, uso do solo e tipo de solo) para o domínio de simulação, *degribbing* interpolação dos dados meteorológicos de outro modelo para o domínio de simulação. Suas principais características abrangem:

- Dados meteorológicos *GRIB* ½ de vários centros do mundo;
- 24 categorias *USGS* e 20 categorias *MODIS*;
- Interface usuário para inserção de outros dados estatísticos e dados meteorológicos.

O *WRF-DA* é um programa opcional, o qual pode ser utilizado para inserir observações nas análises de interpolação criadas pelo *WPS*. Pode também ser utilizado para atualizar as condições iniciais do modelo *WRF*, quando este é executado em modo cíclico. Suas principais características são:

- É baseado numa técnica de assimilação de dados num incremento variacional, e possui capacidades tanto 3D-Var e 4D-Var;
- Inclui a capacidade de assimilação híbrida de dados (variacional + conjunto);
- Método gradiente conjugado é utilizado para minimizar a função de custo na análise espacial variável de controle;
- Análises de incremento são interpoladas para *staggered Arakawa C-grid* e é adicionada ao background para obter análise final na grade do modelo *WRF*;
- Dados de observação convencional podem ser fornecidos tanto em *ASCII* ou no formato “*PREPBFUR*” via utilitário “*OBSPROC*”;
- Dados múltiplos de observação de satélites podem ser fornecidos no formato *BUFR*;
- Dados de radar múltiplos (reflectividade e velocidade radial) podem ser fornecidos em formato *ASCII*;
- Componente horizontal do erro de background, é representado via filtro recursivo (escala regional) ou espectro de potência (escala global). A componente vertical é aplicada através de autovetores e seus correspondentes autovalores de projeções em médias climatológicas;
- Erros de *background* horizontal e vertical são não-separáveis. Cada auto vetor tem sua própria escala de comprimento determinada em climatologia horizontal;
- Um programa utilitário para atualizar o arquivo das condições de fronteira após o *WRF-DA*.

*Post-processing & Visualization tools* é o módulo responsável pela geração gráfica dos resultados, tendo sua visualização suportada pelos programas *Grid Analysis and Display System (GrADS)*, *Visualization and Analysis Platform for Ocean, Atmosphere, and Solar Researchers (VAPOR)*, *Model Evaluation Tools (MET)*, além de

outros. Conforme observou SOARES DA SILVA (2012), o código do *WRF* é aberto e o mesmo foi desenvolvido para ser flexível e eficiente em ambientes de computação paralela.

Neste sentido, o *WRF* oferece uma diversidade de parametrizações físicas, além de sistemas avançados de assimilação de dados que estão sendo desenvolvidos e testados em conjunto com o modelo. Além disso, pode ser usado em aplicações de diferentes escalas espaciais, desde alguns metros até milhares de quilômetros, incluindo ainda previsões numéricas do tempo operacionais e voltadas para a pesquisa, pesquisas de parametrizações físicas e assimilação de dados, modelos dirigidos de qualidade do ar, acoplamento oceano-atmosfera e simulações idealizadas.

### 5.3 MODELO DE DISPERSÃO

Após serem emitidos e alcançarem uma posição afastada de uma determinada fonte (*far-field*) os poluentes passam a comportar-se de forma passiva em termos do seu transporte e dispersão atmosféricos, de acordo com os parâmetros meteorológicos locais (LISBOA, 2007). O prognóstico realístico do processo de dispersão tem grande importância para delimitar faixas de valores médios diários de poluição. Além disso, fatores de natureza meteorológica podem influir de modo a provocar fortes variações nos valores de concentração de poluentes, tais como:

- Movimentos verticais
- Movimentos horizontais
- Turbulência atmosférica

Esses fatores de dispersão são responsáveis, a partir do instante da emissão, pelo transporte do poluente e sua trajetória na atmosfera.

A modelagem da dispersão atmosférica constitui-se numa técnica de simulação dos fenômenos que ocorrem na natureza, permitindo estimar a concentração dos poluentes num conjunto de pontos, baseados num conjunto de variáveis que as influenciam. A modelagem da dispersão atmosférica é útil não só na identificação de fontes emissoras, bem como na gestão de efluentes gasosos e de qualidade do ar, notabilizando-se como uma ferramenta importante para as entidades reguladoras e

constituindo-se atualmente numa das técnicas de avaliação da qualidade do ar indicadas pela legislação ambiental.

A metodologia desenvolvida num estudo de dispersão se baseia na análise das emissões de poluentes, bem como na modelagem do transporte e dispersão dos poluentes atmosféricos emitidos por uma determinada atividade, seja ela industrial e/ou outras.

Dependendo da escala em que se pretende avaliar os impactos ambientais, podem ser utilizados modelos que abrangem as escalas:

- *Local*: recorre-se normalmente a modelos gaussianos, sendo que a sua aplicação permitirá prever a variação das concentrações ao nível do solo, associadas ao funcionamento do projeto;
- *Regional*: com a modelagem da dispersão, pretende-se avaliar os padrões de transporte, dispersão e transformação dos poluentes fotoquímicos, pois estes dão origem a um tipo de poluição cujo impacto regional assume um significado particular. Os modelos de mesoescala são utilizados para estes casos.

CURBANI & RADAELI (2006) consideraram que um modelo de dispersão de poluentes consiste basicamente de um algoritmo computacional, o qual possui a capacidade de calcular as concentrações atmosféricas de uma dada substância, tendo como informações iniciais as características da fonte emissora, os dados do terreno e os dados meteorológicos.

EISENBUD (1973) descreveu que o potencial de risco de uma liberação depende das formas pelas quais os efluentes são diluídos e transportados pela atmosfera, além dos mecanismos em que os mesmos são depositados na superfície. Nesta perspectiva, a fim de se prever estes processos atmosféricos, faz-se uso dos modelos numéricos de dispersão atmosférica.

### 5.3.1 CALPUFF

O **California Puff Model (CALPUFF)**, é um modelo não estacionário do tipo *puff* para a simulação da dispersão de poluentes e que pode ser utilizado para uma grande variedade de aplicações nos estudos de modelagem de qualidade do ar. O modelo foi proposto por Scire et al. (1990) e revisado por Scire et al. (2000) e foi adotado recentemente pela *United States Environmental Protection Agency (US-EPA)* como modelo regulador para estudos de impacto ambiental que abrangem distâncias de 50 a 300 km e que incluam topografia e sistemas meteorológicos complexos. Na *Figura 17*, podemos observar exemplos de modelos amplamente adotados e os seus níveis de complexidade.

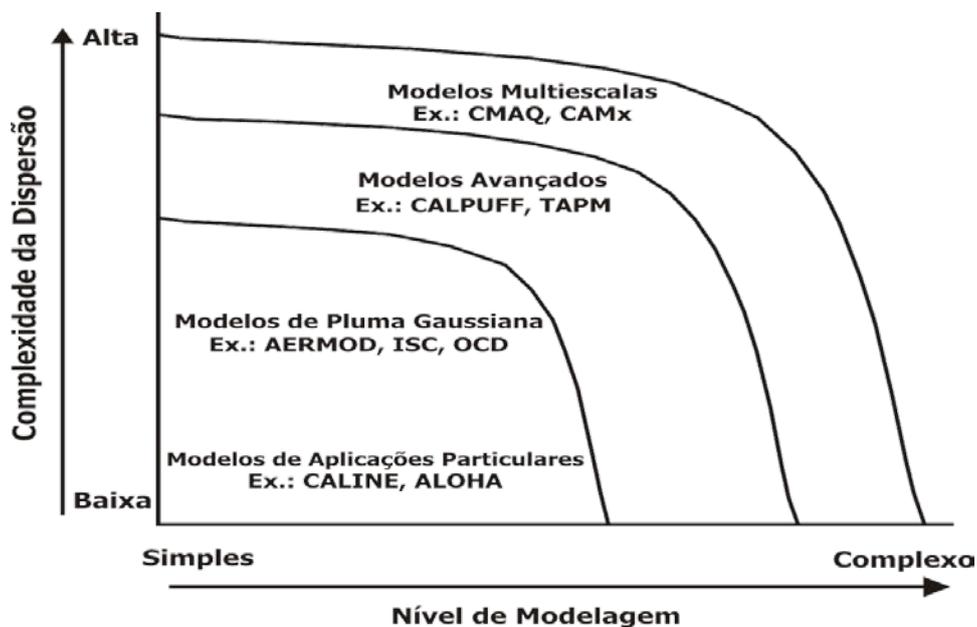


Fig 17 – Tipos de modelos aplicados de acordo com a complexidade da modelagem, Adaptado de NIWA, 2004.

O sistema CALMET/CALPUFF é integrado por três componentes principais: o CALMET (California Meteorological Model), um modelo meteorológico tridimensional, o CALPUFF, o modelo de dispersão em si, e o CALPOST, um pacote de pós-processamento que permite computar as concentrações e fluxos de deposição médios previstos. (SCIRE et al., 2000b).

O CALMET é classificado como um modelo *meteorológico diagnóstico* que incorpora observações meteorológicas e/ou saídas de modelos *meteorológicos de*

*prognósticos*, para produzir através de técnicas de análise objetiva, campos de velocidade, temperatura e outras variáveis necessárias para as simulações com o modelo CALPUFF.

O CALMET necessita que os dados meteorológicos e geofísicos estejam em formatos específicos antes de serem utilizados. O tratamento destes dados é então realizado com o auxílio dos pré-processadores que preparam os dados para a assimilação no processador CALMET. Na *Figura 18* encontra-se um fluxograma do funcionamento dos processadores em relação ao modelo CALMET.

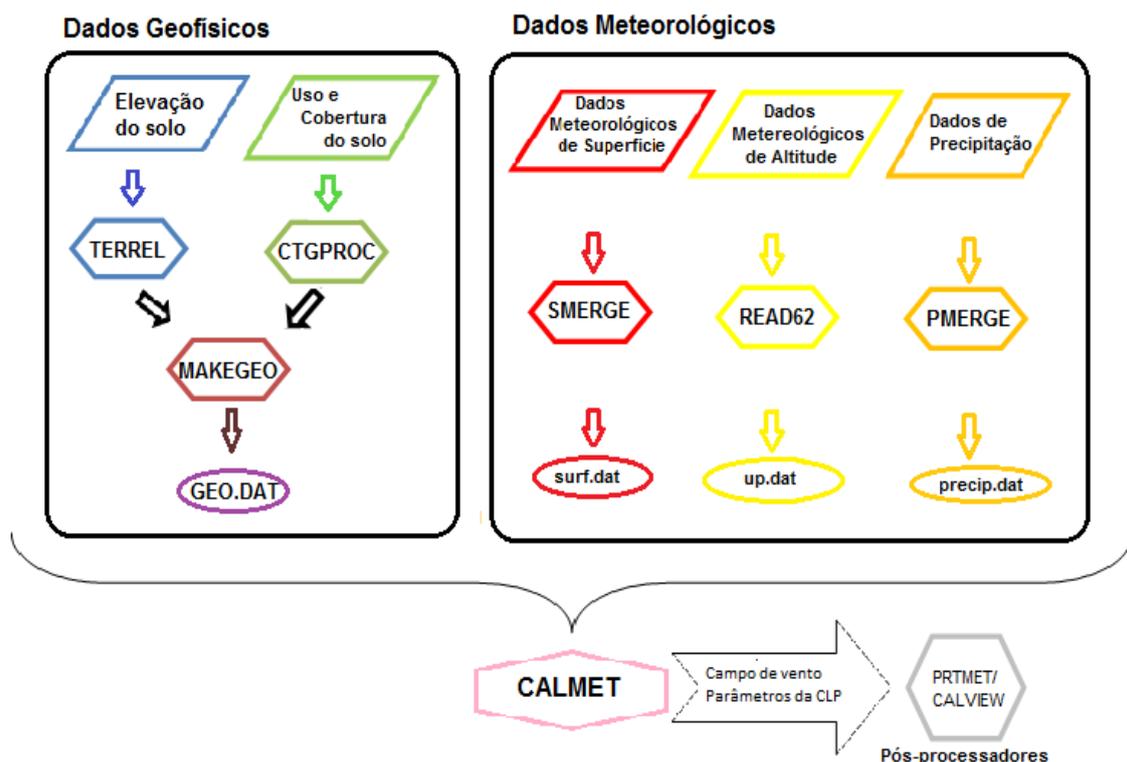


Fig 18 – Fluxograma simplificado dos pré-processadores do Modelo CALMET

Adaptado de SCIRE et al. (2000a).

Os pré-processadores são divididos em dois módulos: geofísicos e meteorológicos. Os geofísicos responsáveis pelos dados de terreno e cobertura do solo, e os meteorológicos responsáveis pelas informações meteorológicas contidas nas estações de superfície e de sondagens.

Existem ainda, associados ao modelo CALMET, diversos outros pacotes de pré e pós-processamento de dados geofísicos e dados meteorológicos; a seguir serão descritos apenas os principais:

*a) Pré-processadores Geofísicos*

• **TERREL**

O TERREL é responsável pela extração e tratamento de dados de elevação de terreno englobando os formatos do Modelo de Elevação Digital USGS (DEM), dados digitais de terreno ARM3, Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) entre outros, com resolução espacial de até 30 metros. Os dados são selecionados a partir das características do domínio escolhidas pelo usuário e organizados em uma grade regular cartesiana ou polar. Os arquivos de resultados gerados após processamento serão lidos pelo pré-processador MAKEGEO.

• **CTGPROC**

Responsável pela extração e processamento dos dados de uso e cobertura do solo, originalmente, no formato Composite Theme Grid (CTG) e Land Cover (LULC) da USGS, com resolução espacial de até 30 metros para os Estados Unidos e 900 metros para o restante do mundo. Quando os arquivos são muito grandes (~38 MB por quadrante), há a necessidade da compressão deste arquivo, que pode ser feita através do pré-processador CTGCOMP, onde transformará o arquivo no tamanho aproximado de 0,5MB, para então poder ser lido pelo CTGPROC. O programa organiza os dados necessários em uma grade regular baseado nas informações definidas no TERREL. Os arquivos gerados serão utilizados pelo MAKEGEO.

• **MAKEGEO**

Pré-processador responsável por calcular as categorias de uso do solo e os parâmetros superficiais para cada célula da grade, utilizando os arquivos gerados pelo TERREL e CTGPROC. O resultado final será o arquivo GEO.DAT, que contém todos os dados geofísicos necessários e no formato correto para ser utilizado pelo CALMET, tais como rugosidade, parâmetro de fluxo de calor no solo, índice de área foliar e fluxo de calor antropogênico. Os arquivos de dados são o de controle do usuário (INP), o DAT gerado pelo Terrel e o DAT gerado pelo CTGPROC.

## *b) Pré-processadores Meteorológicos*

### • ***SMERGE***

Este pré-processador é o responsável pelo processamento das observações meteorológicas de superfície. O programa extrai os dados de data, hora, velocidade e direção do vento, temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho, pressão, altura do teto de nuvens, cobertura de nuvens e umidade relativa, que são escritos em um novo formato, compatível com o CALMET, armazenados em um arquivo chamado SURF.DAT. São permitidas até 150 estações meteorológicas, com um arquivo de dados de superfície por estação.

### • ***PMERGE (Opcional)***

Este pré-processador é o responsável pelo processamento dos dados horários de precipitação, que serão posteriormente usados no CALPUFF para computar a remoção úmida do poluente, caso essa opção tenha sido escolhida pelo usuário no arquivo de controle do CALPUFF. Portanto, os dados de precipitação não são obrigatórios. Antes de usar o PMERGE, os dados de precipitação podem ser pré-processados pelo PEXTRACT, responsável por extrair os dados do formato NCDC TD-3240 nos períodos de interesse.

### • ***READ62***

Programa responsável pela extração e processamento de dados de altitude (ar superior) medidos através de *radio sondagens*. Os dados de altitude processados pelo READ62 são armazenados em um arquivo chamado UP.DAT. Este arquivo contém dados de pressão atmosférica, altura, temperatura, direção e velocidade do vento.

### • ***CALMM5 (Opcional)***

Este pré-processador prepara os dados prognósticos gerados pelo modelo de meso escala MM5, para assimilação pelo CALMET.

## *c) Pós-processador*

## ***PRTMET***

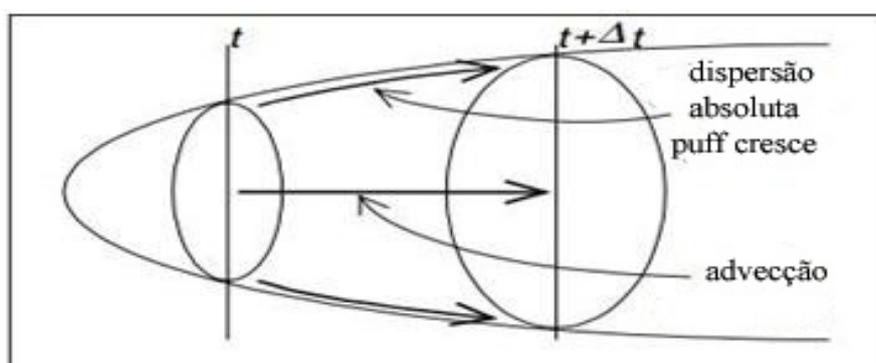
Programa responsável pela preparação dos dados contidos no arquivo CALMET.DAT para visualização no módulo Gráfico do CALMET, o CALView, ou através de outros aplicativos gráficos como SURFER. O PRTMET permite que o usuário escolha os parâmetros desejados, em diversos níveis. (CORREA, 2008)

O processador CALMET é responsável pela assimilação de todas as informações geradas pelos pré-processadores. Após sofrer o processo de interpolação e a ação das parametrizações, os dados são organizados em um arquivo chamado CALMET.DAT. Este arquivo é binário e contém, em uma grade regular, os parâmetros que serão usados pelo CALPUFF para calcular as concentrações.

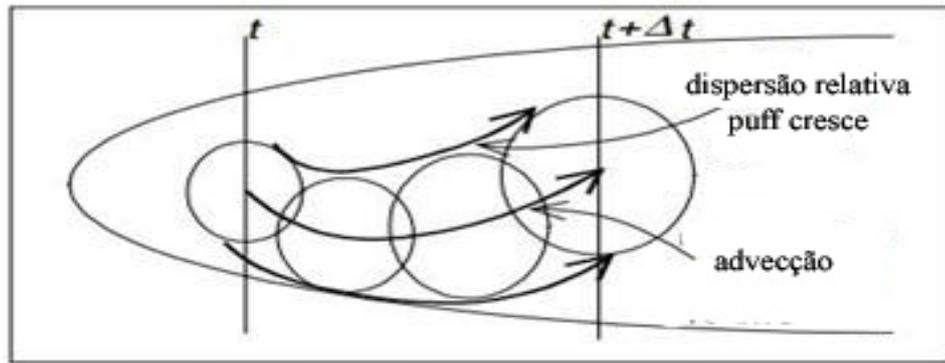
O software **CALPUFF** é inteiramente público, incluindo seus manuais e códigos fontes. Cada um desses programas possui uma interface gráfica própria que auxilia na preparação dos arquivos de controle, escritos em linguagem FORTRAN, para a execução do programa (MELO, 2011).

O modelo puff foi projetado para simular a liberação para a atmosfera, sendo utilizado para prever os efeitos de um acidente, permitindo assim um planejamento de emergência eficaz.

Há dois tipos diferentes de modelos de Puff. O primeiro, conhecido como modelos de segmento de pluma (*plume segment models*), que descrevem um segmento de um conjunto de pluma média usando o Puff. O segundo, conhecido como modelos de aglomeração de dispersão (*cluster dispersion models*), que interpreta um Puff como sendo um aglomerado instantâneo de poluentes, (Hanna,1989), vide *Figura 19*.



a) Modelo de segmento de plumas, usando puffs como um segmento de um conjunto de plumas médias



b) Modelo de dispersão agrupada, usando puffs agrupados (nuvens) de poluentes

Fig 19 – Dispersão absoluta (a) e dispersão relativa (b), Hanna,1989

Cada Puff tem uma determinada massa que é distribuída inicialmente de maneira uniforme. O Puff é transportado de acordo com a trajetória de seu centro de massa, que é determinada pelo vetor velocidade do vento local, enquanto se expande de maneira gaussiana, segundo os coeficientes de dispersão. Estes coeficientes são dependentes do tempo, sendo os responsáveis pelo crescimento de cada puff, vide *Figura 20*.

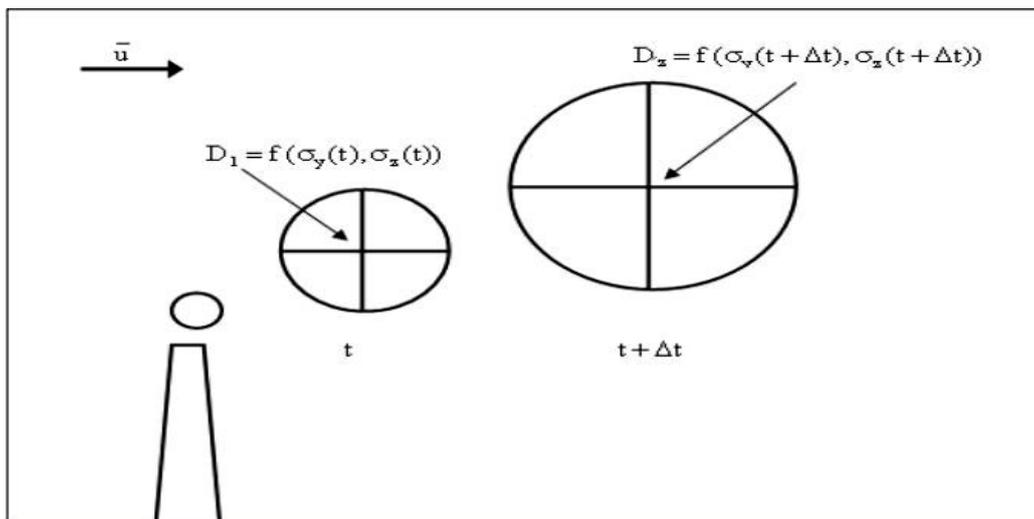


Fig 20 – Concentração do material poluente no interior de cada puff, Moraes, 2004

O diâmetro  $D_1$  é em função dos parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  no instante “ $t$ ”, no instante posterior “ $t + \Delta t$ ”, o Puff se expande até o diâmetro  $D_2$ , no qual também é função dos parâmetros  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  no instante “ $t + \Delta t$ ”. À medida que o puff é transportado na atmosfera, a concentração do material poluente diminui no seu interior.

A equação básica para determinar a contribuição de um puff em um receptor é dada por:

$$C = \frac{Q_p}{2\pi\sigma_x\sigma_y} g_v \exp\left[\frac{-d_a^2}{(2\sigma_x^2)}\right] \cdot \exp\left[\frac{-d_c^2}{2\sigma_y^2}\right] \quad (1)$$

Onde,  $C$  – é a concentração ao nível da superfície no receptor,  $G_v$  – é o termo vertical da equação gaussiana,  $Q_p$  – é a massa do poluente no Puff,  $\sigma_x, \sigma_y$  – são os parâmetros de dispersão alinhada e perpendicular, respectivamente, em relação ao vento e  $d_a$  e  $d_c$  – são as distâncias do centro do Puff ao receptor, nas direções X e Y em relação ao vento.

O total de concentração em um receptor é a soma das médias das contribuições de todos os Puffs próximos, (Scire et al., 2000a), para todo intervalo de amostragem dentro de um passo de tempo:

$$C(x, y, x, t) = \sum_{puff=1}^{total \ de \ puffs} C_{puff}(x, y, x, t) \quad (2)$$

Modelos Puff geralmente avaliam a contribuição de um puff para a concentração em um receptor pelo método *snapshot*, que seria uma aproximação do tipo “foto” (instantâneo). Nessa aproximação cada pacote é “congelado” em intervalos de tempo determinados (intervalos de amostragem). A concentração do puff naquele tempo é calculada (ou amostrada). O puff é então movido, evoluindo em tamanho e intensidade até o próximo intervalo de amostragem.

Se o puff não se sobrepõe suficientemente, as concentrações de receptores localizados nos espaços entre os puffs, no momento da "foto", são subestimados, enquanto que nos centros do puff são superestimados. Ludwig et al. (1977 apud Melo, 2011), mostraram que se a distância entre os puffs exceder um máximo de  $2\sigma_y$ , podem

ser obtidos resultados imprecisos. Para obter melhores resultados a separação do puff deve ser reduzida para não mais do que um  $\sigma_y$ .

Alguns fatores influenciam os coeficientes de dispersão, a saber (Xiaoying, 2007):

- A influência da **velocidade do vento**, aumenta  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  em condições estáveis e instáveis, enquanto  $\sigma_z$  diminui em condições instáveis e neutras.
- A influência da **temperatura** sobre os coeficientes de dispersão mostra-se apenas em condições estáveis e quando a temperatura estiver acima do ponto de congelamento. Acima de 6 °C, as pequenas variações de temperatura, afetam fortemente  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$ , enquanto  $\sigma_z$  aumenta suavemente com a temperatura.
- A influência da **umidade relativa**, faz com que os coeficientes de dispersão  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  diminuam em todas as condições, enquanto que  $\sigma_x$  aumenta suavemente em condições estáveis e neutras. A umidade relativa tem uma relação direta com a temperatura, como uma temperatura mais elevada, geralmente, corresponde a uma umidade mais baixa, a influência sobre a dispersão se assemelha ao da temperatura. A influência significativa observa-se apenas em  $\sigma_y$ , em condições estáveis, nos demais coeficientes a influência é tão pequena que pode ser ignorada.
- A influência da **pressão**, de um modo geral, diminui  $\sigma_x$  e  $\sigma_z$ , enquanto  $\sigma_y$  aumenta linearmente com a pressão, desde que a mudança de pressão não cause uma alteração na estabilidade atmosférica. A pressão afeta mais fortemente  $\sigma_y$  do que os demais coeficientes, no entanto, a mudança do vento pode afetar a relação entre os coeficientes de dispersão e de pressão de ar, pois a alteração da velocidade do vento vai levar a uma alteração na estabilidade.
- A influência da **irradiação solar** parece afetar o  $\sigma_y$  muito mais do que  $\sigma_x$  e  $\sigma_z$ , enquanto que a influência do fluxo de calor no solo é muito mais evidente em condições estáveis do que em condições neutras e instável.

- A influência do *fluxo de calor do solo* é similar à irradiação solar, mas em direções opostas,  $\sigma_x$  ou  $\sigma_z$  diminuem linearmente, enquanto  $\sigma_y$  aumenta com o aumento do fluxo de calor do solo. A influência do fluxo de calor do solo nos coeficientes de dispersão, depende da diferença entre a irradiação solar e o fluxo de calor do solo.
- A influência do *gradiente de temperatura* aumenta  $\sigma_x$  enquanto  $\sigma_y$  diminui com o aumento do gradiente de temperatura. No entanto, em condições instáveis,  $\sigma_z$  diminui com o aumento do gradiente de temperatura.

Existem cinco tipos de modelos de dispersão, (Torben, 2003), a saber:

- **Modelo caixa (Box)**– este é o modelo mais simples de todos, ele assume como se fosse uma bacia aérea (*airshed*), ou seja, um determinado volume de ar atmosférico numa geografia. Apesar de útil, este modelo é muito limitado em sua capacidade de prever com precisão a dispersão dos poluentes no ar,
- **Modelo Lagrangiano** – este modelo calcula a dispersão do poluente, ou seja, das partículas, computando-se as estatísticas das trajetórias de um grande número das parcelas da pluma.
- **Modelo Euleriano** – este modelo é semelhante ao lagrangiano, uma vez que também controla o movimento de um grande número de parcelas da pluma que se movem a partir de sua localização inicial. A grande diferença do lagrangiano é que neste utiliza-se uma grade tridimensional.
- **Modelo gás denso** – este modelo, como o nome mesmo diz, simula a dispersão de plumas de poluição que são mais pesadas que o ar.
- **Modelo Gaussiano** – este é o modelo mais utilizado, assume que a dispersão do poluente tem uma distribuição gaussiana, o que significa, que tem uma distribuição de probabilidade. Este modelo é utilizado pra prever a dispersão do contínuo, ou seja, plumas de poluição do ar flutuante proveniente do nível do solo ou de fontes elevadas. E também do não-contínuo, chamado de modelo de sopro ou *Puff*.

O modelo gaussiano é uma solução analítica do modelo euleriano, conservação da massa, com coeficientes constantes. A relação entre a taxa de emissão e a concentração em um determinado ponto no espaço é obtida analiticamente e não requer a utilização de grandes recursos computacionais. Em um sistema de referência generalizado, a equação do modelo gaussiano é dado por, (NIWA,2004):

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_zU} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \quad (3)$$

Onde, “ $Q$ ” – é a taxa de emissão do poluente, “ $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ” – são os parâmetros de difusão lateral e vertical, respectivamente, e “ $U$ ” – é a velocidade média do vento. Este modelo estima concentrações de poluentes em qualquer ponto do espaço com base em vários fatores, *velocidade e direção do vento, estabilidade atmosférica, altura da mistura*, ou seja, o  $H_{\text{efetivo}}$ , e *temperatura*, conforme ilustrado na Figura 21.

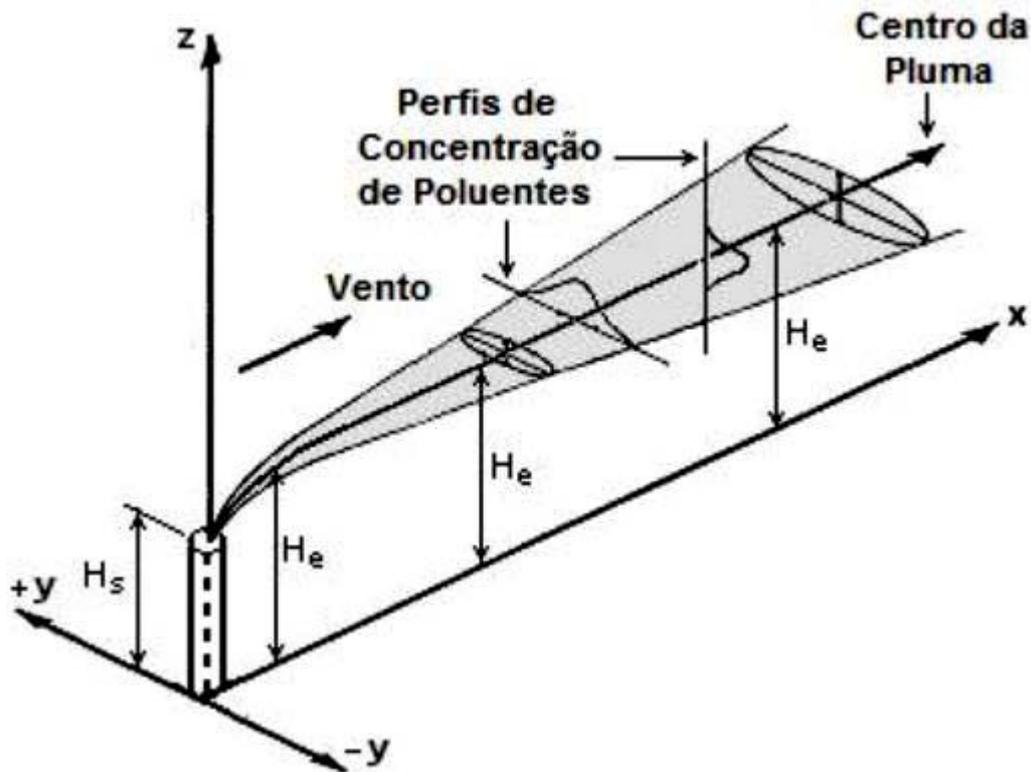


Fig 21 – Concentração para uma fonte pontual ao longo do eixo X,  $H_{\text{efetivo}}$ . NIWA, 2004

A equação geral para calcular a concentração de equilíbrio de um contaminante, resultante de uma fonte pontual, é dada por:

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

Onde,  $C(x, y, z)$  – é a concentração da substância em um ponto de difusão ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ ),  $X$  – é a distância na direção do vento, medido em metros,  $Y$  – distância lateral, medido em metros e  $Z$  – distância vertical acima do solo, também medido em metros, e  $H$  – é a altura efetiva, medida em metros; “ $\sigma_y$  e  $\sigma_z$ ” – dependem da distância, a favor do vento, e da classe de estabilidade atmosférica. Estes coeficientes, medidos em metros, podem ser obtidos utilizando a tabela de estabilidade do Pasquill (1961), vide Tabela 4.

Tabela 4 – Definição das categorias de estabilidade atmosférica de Pasquill.

Velocidade do vento 10 m	Dia Radiação Solar			Noite Nublado	
	Forte	Moderado	Fraco	$\geq 4/8$ Nuvens Baixas	$\leq 3/8$ Nuvens
(m/s)					
<2	A	A-B	B	E	F
2-3	A-B	B	C	D	E
3-5	B	B-C	C	D	D
>6	C	D	D	D	D

Os tipos A, B e C são associados com instabilidade forte, moderada e leve. O tipo D corresponde a neutro, para condições nubladas durante o dia ou noite. Os tipos E e F são associados com inversões leves e moderadas. Oliveira Júnior (2008) mostrou, segundo o critério de Pasquill-Gifford, que as classes predominantes na região da CNAAA são D, E e F (no período noturno e diurno).

Após a liberação para a atmosfera, os radionuclídeos sofrem advecção (transporte a favor do vento) e difusão turbulenta. Então esse material radioativo será

removido da atmosfera através de deposição úmida e seca sobre o solo e por decaimento radioativo, (Torben, 2003), vide Figura 22.

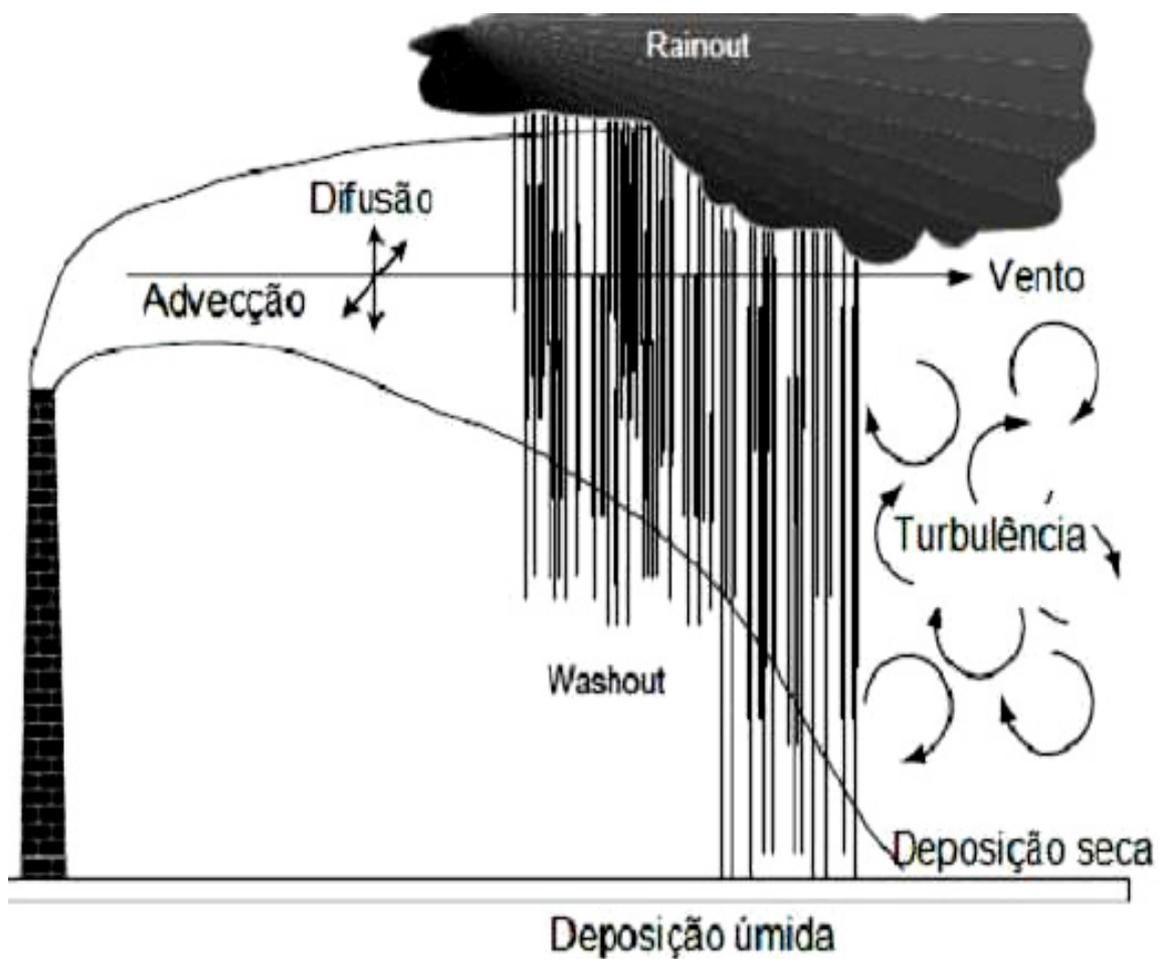


Fig 22 – Formas do material radioativo ser removido da atmosfera, Torben, 2003

## 6 RESULTADOS

### 6.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A escolha da configuração do modelo WRF bem como os domínios, resolução espacial e aninhamentos de grade, foram feitas objetivando obter dados meteorológicos necessários para o *INPUT* do modelo CALMET.

Quatro domínios foram utilizados para a realização das simulações. O primeiro é o mais abrangente e de menor resolução espacial e os outros três aninhados, com resoluções espaciais horizontais decaindo na proporção de 3:1 (Tabela 5), para que a interação bidirecional (“two-way”) entre os domínios seja realizada adequadamente. As grades foram aninhadas de forma que o domínio de número 3 (resolução de 3 km) abrangesse a região de estudo, Angra dos Reis, vide *Figura 23*.

O domínio maior está centrado na latitude 22,0° S e longitude 42,6° W. Todos os domínios foram configurados com 51 níveis na vertical. Nesses domínios foram utilizados os dados de topografia e de elevação da USGS – *United States Geological Survey*, com diferentes resoluções espaciais, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Características dos domínios utilizados nas simulações com o WRF

<b>Domínios / Grades</b>	<b>Pontos em X e Y</b>	<b>Resolução Horizontal (km)</b>	<b>Dimensão da grade (°) (Latitude e Longitude)</b>	<b>Topografia USGS (km)</b>
<b>1</b>	25 x 25	27	25.77°S a 20.18°S 47.48°W a 41.41°W	19
<b>2</b>	31 x 31	9	24.17°S a 21.83°S 45.72°W a 43.17°W	4
<b>3</b>	40 x 40	3	23.48°S a 22.45°S 45.05°W a 43.93°W	1
<b>4</b>	61 x 61	1	23.24°S a 22.71°S 44.79°W a 44.22°W	1

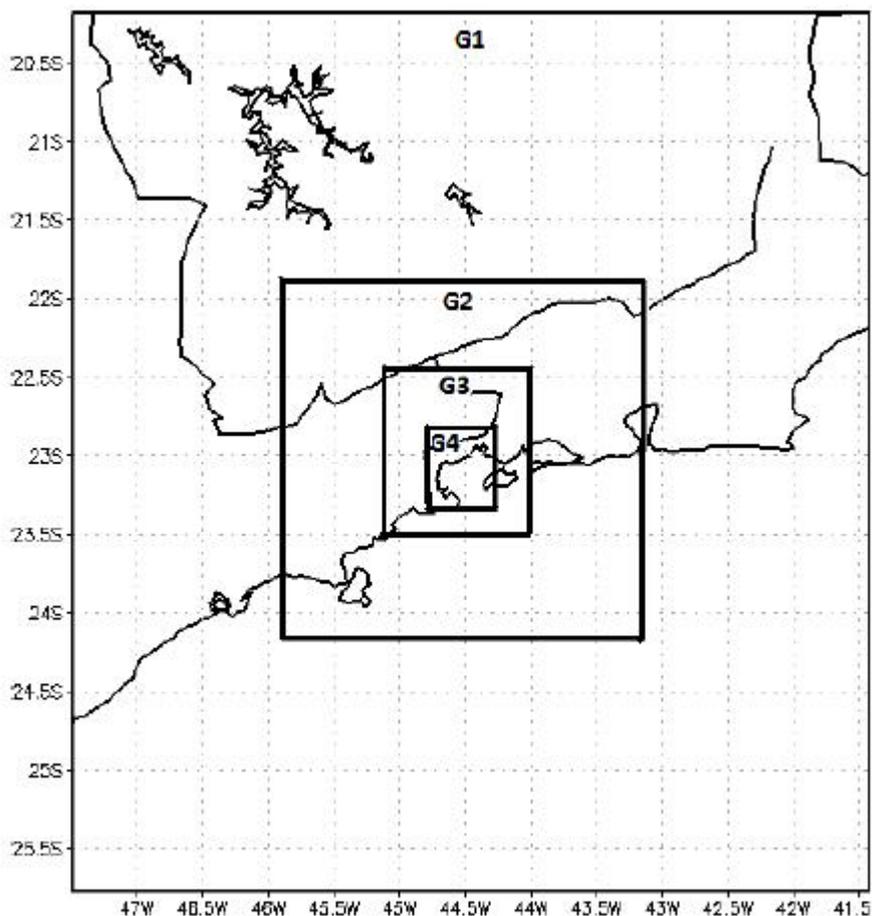


Fig 23 – Domínios utilizados nas simulações com o modelo WRF

As condições iniciais e de contorno assimiladas pelo WRF são oriundas do *GFS-Global Forecasting System Model*, do *National Centers for Environment Prediction - NCEP*, cuja resolução espacial é de  $0.5^\circ$  (~55 km) e uma resolução temporal de 3 horas. O GFS é um modelo numérico de escala global, físico-matemático, que embute cálculos estatísticos em suas simulações. O modelo GFS é inicializado com uma base de dados composta por observações de superfície e altitude recolhidas globalmente.

Este processo de aquisição dos dados é feito pelo *GTS - Global Telecommunications System of WMO*, do Brasil (link disponível em <http://www.wmo.ch/web/www/DPS/Annual-Tech-Progress/1999/Brazil.html>).

A base topográfica do GFS possui 30s de resolução espacial nas direções horizontais, ou seja, aproximadamente 1 km, e é composta pelos dados provenientes da USGS - United States Geological Survey, que é originada do Modelo de Elevação

Digital (Digital Elevation Model - DEM). A base de 30s da USGS é a mesma utilizada na sistema original do WRF. Além disso, a base de cobertura do solo do GFS é caracterizada, segundo os dados de Dorman & Sellers (1989).

Para compor o domínio do GFS, tanto na horizontal quanto na vertical, é utilizado um modelo para a interpolação dos dados, juntamente com estimativas obtidas de satélite. Mais detalhes sobre esse modelo podem ser encontrados em KALNAY et al. (1996). Os dados do GFS podem ser adquiridos gratuitamente a partir do endereço eletrônico <http://nomads.ncdc.noaa.gov/>.

Utilizou-se para a simulação com o WRF os dados para o mês de janeiro e o ano de 2009. O mês de janeiro foi escolhido, devido aos fatores apontados no Capítulo 3, seção 3.5 e o ano foi o dado mais recente, obtido junto à Eletronuclear para as torres (quatro torres) de Angra, visto que se fará o acoplamento com o CALMET.

## 6.2 ACOPLAMENTO WRF/CALMET

A grade utilizada pelo CALMET tem o domínio de 80 km, partindo da CNAAA, e número de células de 229 x 229. Na região da CNAAA, com raio de influência de 5 km, usaram-se os dados de campo de vento das quatro torres meteorológicas, conforme mostra a *Figura 24*.

Para a utilização dos dados das torres pelo CALMET, estes tiveram que ser tratados a fim de que pudessem estar no formato aceito pelo modelo, *SAMSOM*. Para isto foi elaborada uma planilha em Excel pelo Departamento de Meteorologia da UFRJ,– NCQAr (*Núcleo Computacional de Estudos da Qualidade do Ar*), com as seguintes informações:

- Temperatura do Ar (°C)
- Umidade Relativa (%)
- Pressão Atmosférica (mbar)
- Velocidade do vento (m/s)
- Direção do vento ( em graus)
- Cobertura de nuvens (décimos)
- Precipitação (mm/dia)

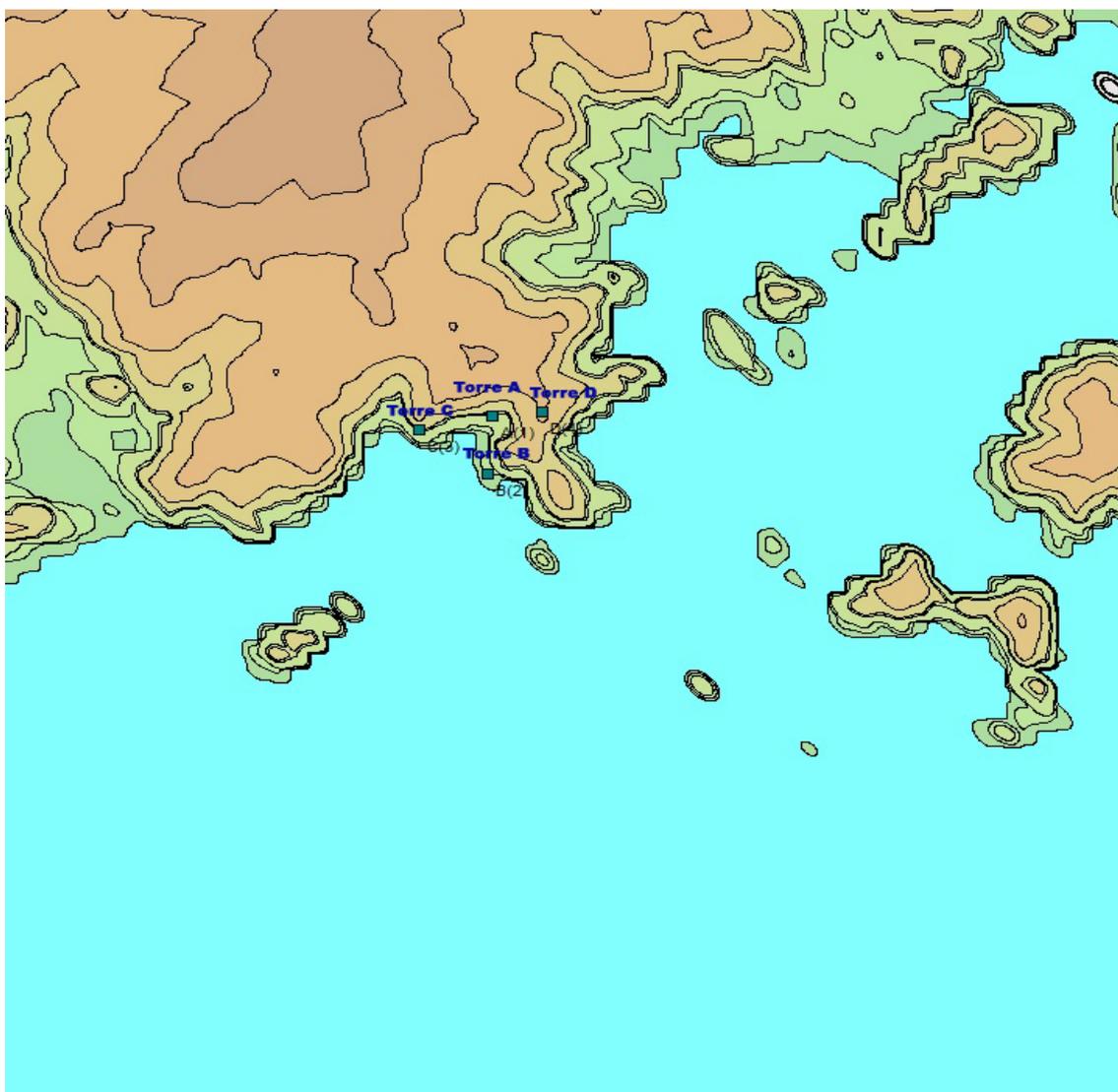


Fig 24 – Localização das Torres Meteorológicas da CNAAA

O dado referente à *Cobertura de Nuvens* foi extraído da estação meteorológica de Paraty do *INMET - Instituto Nacional de Meteorologia*, conforme *Figura 25*. Este fato ocorreu, devido à falta desta informação na torre principal da Central Nuclear (Torre A), o que levou a utilização desta estação.

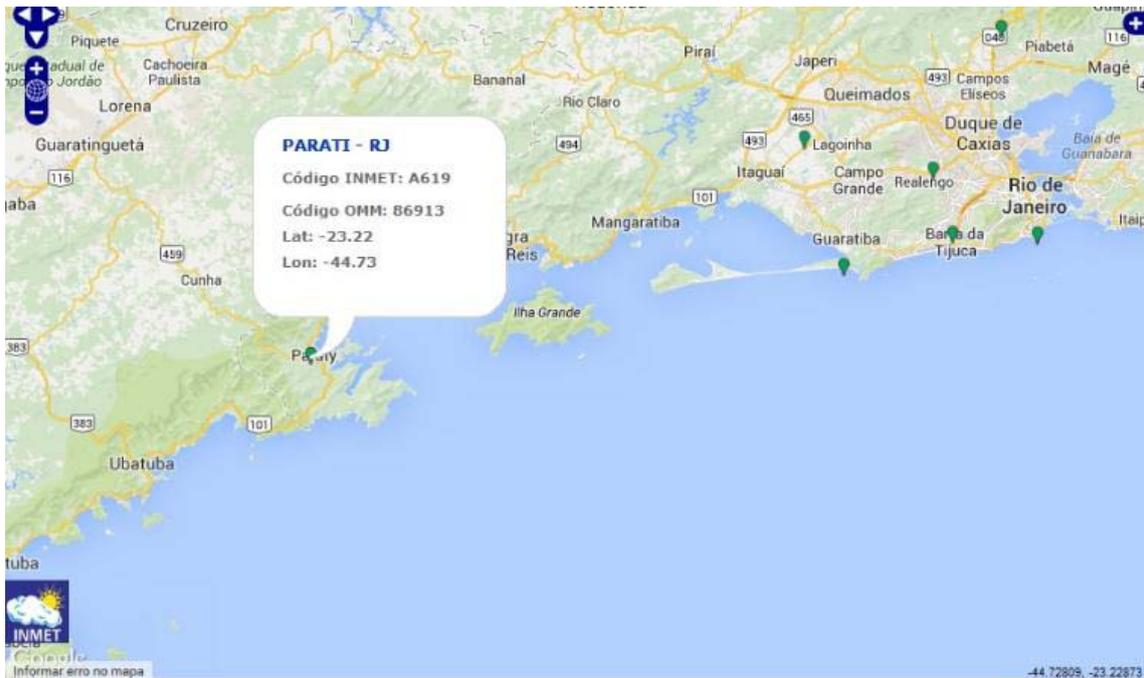
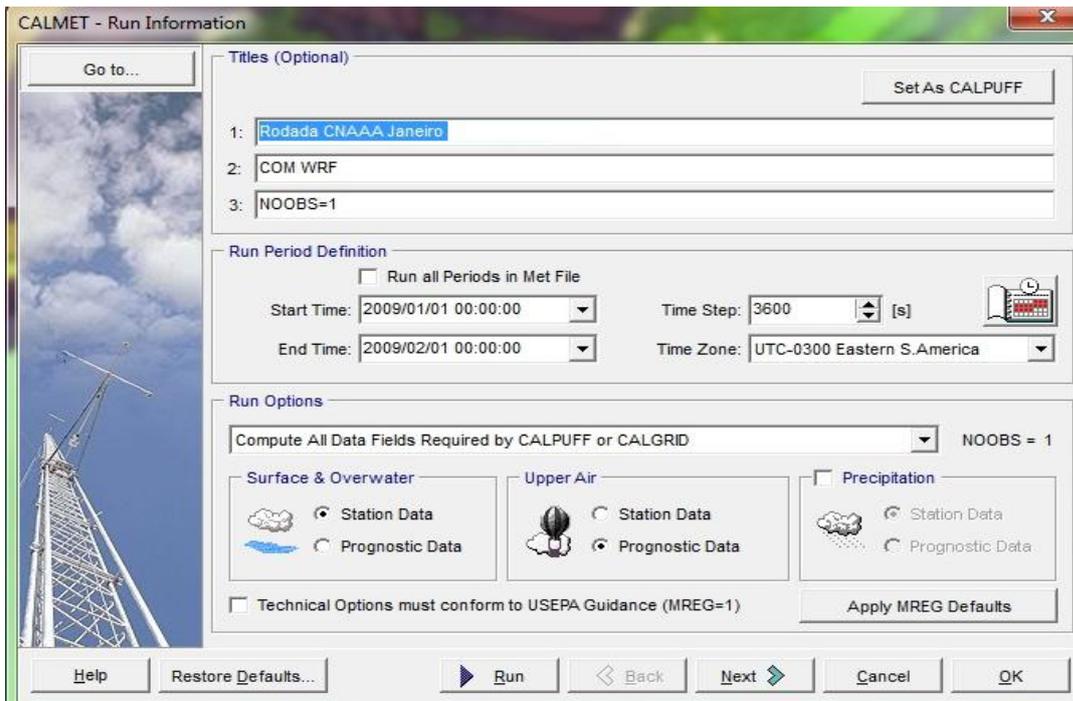


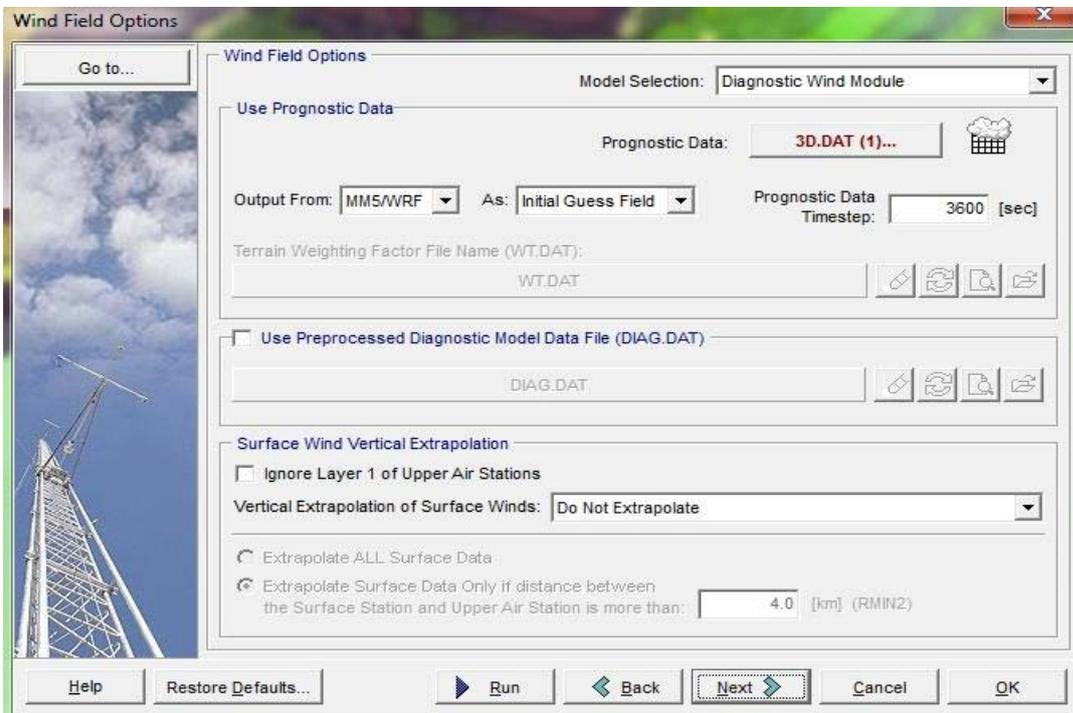
Fig 25 – Localização da Estação de Paraty, fonte: Google earth

Na *figura 26* são mostradas as informações de entrada para o acoplamento dos dois modelos atmosféricos, onde na *Figura 26-a* temos a definição de todo o período de rodada, para o mês de janeiro, sendo o campo de vento obtido em cada hora, ou seja, em cada 3600s.

Na *Figura 26-b* temos a entrada dos dados de prognóstico, através do arquivo *CNAAA.m3d*, onde o modelo inicia-se a rodada com os dados de prognóstico do WRF e tendo a “*calibração*”, na região da CNAAA, com os dados observáveis, das quatro torres.



a)



b)

Fig 26 – Dados de entrada do modelo CALMET

A fim de se analisar, *através da rosa dos ventos*, a intensidade e direção dos ventos da região para todo o mês de janeiro, optou-se em dividir a escala temporal em quatro períodos: **Madrugada**: 00:00 a 05:00, **Manhã**: 06:00 a 11:00, **Tarde**: 12:00 a 17:00, **Noite**: 18:00 a 23:00 e para todo o período, ou seja de 00:00 a 23:00.

No **Apêndice A a E**, encontram-se os gráficos com a distribuição de intensidade do campo de vento de cada torre por período.

Na **Figura 27-a**, observa-se predominância do vento *N*, o que mostra que a dispersão atmosférica na região deverá migrar para a Baía da Ilha Grande, indicando que os ecossistemas marítimos e recursos pesqueiros serão os mais atingidos a partir de uma emissão acidental de radionuclídeos. Na Tabela 6 observa-se a intensidade dos ventos:

Tabela 6 – Intensidade dos ventos referente à Figura 27-a

Torre A	Torre B	Torre C	Torre D
(0,5-2,1m/s) = 87,6%	(0,5-2,1m/s) = 71,9%	(0,5-2,1 m/s) = 84,3%	(0,5-2,1 m/s) = 77,3%
(2,1-3,6m/s) = 5,4%	(2,1-3,6m/s) = 15,1%	(2,1-3,6 m/s) = 10,3%	(2,1-3,6 m/s) = 18,9%
(<< 0,5m/s - calmaria) = 7,0%	(<< 0,5m/s - calmaria) = 7,0%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 1,6%	<< 0,5 m/s - calmaria) = 2,2%
	(3,6-5,7m/s) = 5,4%	(3,6-5,7 m/s) = 2,2%	(3,6-5,7 m/s) = 1,1%
	(5,7-8,8m/s) = 0,5%	(5,7-8,8 m/s) = 1,6%	(5,7-8,8 m/s) = 0,5%

Na **Figura 27-b**, há uma predominância para os ventos *SO/N*, indicando que a dispersão atmosférica, a partir de uma emissão acidental de radionuclídeos, atingiria a Baía da Ilha Grande e toda a área ao longo da BR-101, no sentido centro de Angra dos Reis, passando por diversos núcleos urbanos com densidade populacional importante, entre eles Vila do Frade e Bracuí. Na Tabela 7 observa-se a intensidade dos ventos:

Tabela 7 – Intensidade dos ventos referente à Figura 27-b

Torre A	Torre B	Torre C	Torre D
(0,5-2,1m/s) = 79,6%	(0,5-2,1m/s) = 65,9%	(0,5-2,1 m/s) = 82,8%	(0,5-2,1 m/s) = 70,5%
(2,1-3,6m/s) = 2,2%	(2,1-3,6m/s) = 23,8%	(2,1-3,6 m/s) = 14,5%	(2,1-3,6 m/s) = 15,6%
(<< 0,5m/s - calmaria) = 18,3%	(<< 0,5m/s - calmaria) = 5,9%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 0,5%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 3,8%
	(3,6-5,7m/s) = 3,2%	(3,6-5,7 m/s) = 2,2%	(3,6-5,7 m/s) = 2,2%
	(5,7-8,8m/s) = 0,5%		
	(8,8-11,1 m/s) = 0,5%		

Na *Figura 27-c*, a predominância de ventos dos setores *SO/S* indica que a dispersão atmosférica, a partir de uma emissão acidental de radionuclídeos, seguirá para a direção nordeste, no sentido do centro de Angra dos Reis, passando por núcleos urbanos com densidade populacional importante, entre eles Vila do Frade e Bracuí. Ao norte direcionam-se os ventos vindos do sul, o que cria um problema, considerando-se a barreira orográfica existente e que poderá concentrar os poluentes no entorno da estrada, próximo à central nuclear. Na Tabela 8 observa-se a intensidade dos ventos:

Tabela 8 – Intensidade dos ventos referente à Figura 27-c

Torre A	Torre B	Torre C	Torre D
(0,5-2,1m/s) = 91,9%	(0,5-2,1m/s) = 45,9%	(0,5-2,1 m/s) = 71,5%	(0,5-2,1 m/s) = 69,9%
(2,1-3,6m/s) = 3,8%	(2,1-3,6m/s) = 39,5%	(2,1-3,6 m/s) = 25,8%	(2,1-3,6 m/s) = 24,7%
(<< 0,5m/s - calmaria) = 4,3%	(<< 0,5m/s - calmaria) = 1,6%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 0%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 2,7%
	(3,6-5,7m/s) = 9,7%	(3,6-5,7 m/s) = 2,2%	(3,6-5,7 m/s) = 2,7%
	(5,7-8,8m/s) = 2,7%	(5,7-8,8m/s) = 0,5%	
	(8,8-11,1 m/s) = 0,5%		

Na *Figura 27-d*, a predominância do vento *N/NE* aponta que a dispersão atmosférica, a partir de uma emissão acidental de radionuclídeos, migrará para a Baía da Ilha Grande (direção sul) e em direção à Mambucaba e Parati (sentido sudoeste). Na Tabela 9 observa-se a intensidade dos ventos:

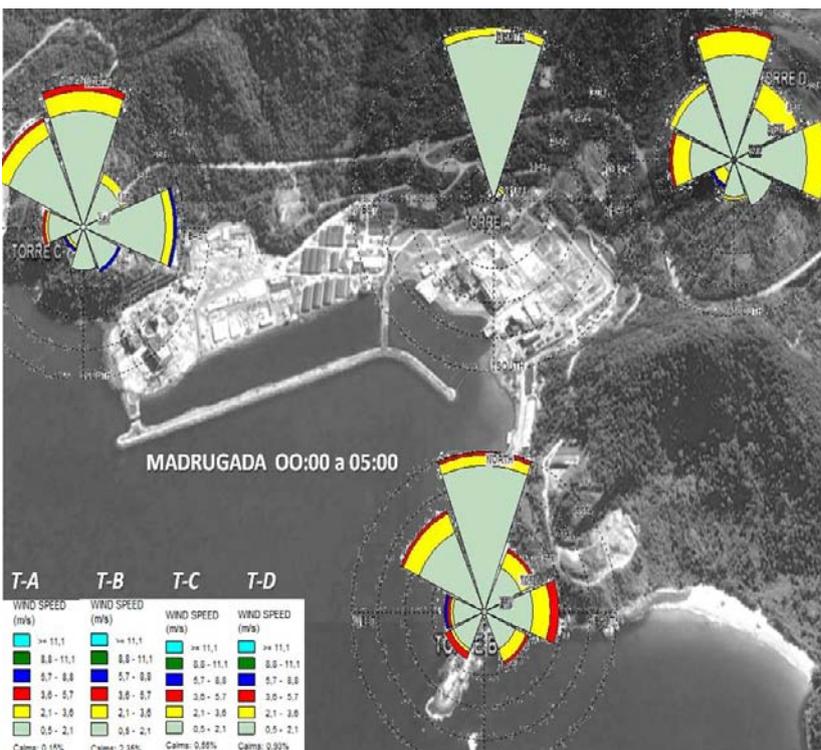
Tabela 9 – Intensidade dos ventos referente à Figura 27-d

<b>Torre A</b>	<b>Torre B</b>	<b>Torre C</b>	<b>Torre D</b>
(0,5-2,1m/s) = 83,9%	(0,5-2,1m/s) = 53,2%	(0,5-2,1 m/s) = 60,8%	(0,5-2,1 m/s) = 60,2%
(2,1-3,6m/s) = 9,1%	(2,1-3,6m/s) = 25,3%	(2,1-3,6 m/s) = 29,0%	(2,1-3,6 m/s) = 30,6%
(<< 0,5m/s - calmaria) = 5,9%	(<< 0,5m/s - calmaria) = 2,7%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 0,5%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 1,6%
(3,6-5,7m/s) = 1,1%	(3,6-5,7m/s) = 15,1%	(3,6-5,7 m/s) = 5,9%	(3,6-5,7 m/s) = 6,5%
	(5,7-8,8m/s) = 2,7%	(5,7-8,8m/s) = 3,2%	(5,7-8,8m/s) = 0,5%
	(8,8-11,1 m/s) = 1,1%	(>= 11,1 m/s) = 0,5%	(>= 11,1 m/s) = 0,5%

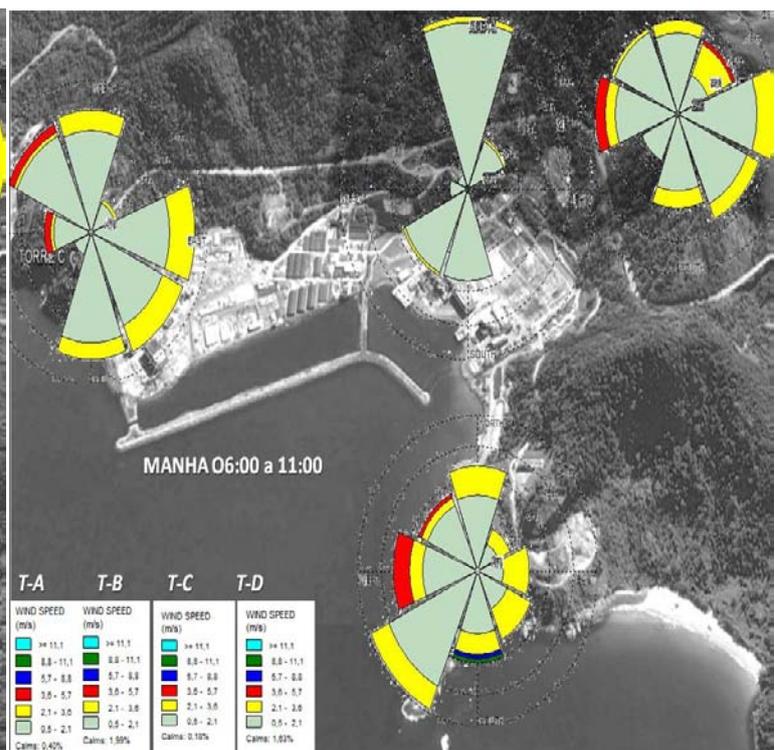
Na *Figura 28*, observa-se que para todo o período a predominância é *N/SO*. Na *Tabela 10* observa-se a intensidade dos ventos:

Tabela 10 – Intensidade dos ventos referente à Figura 28

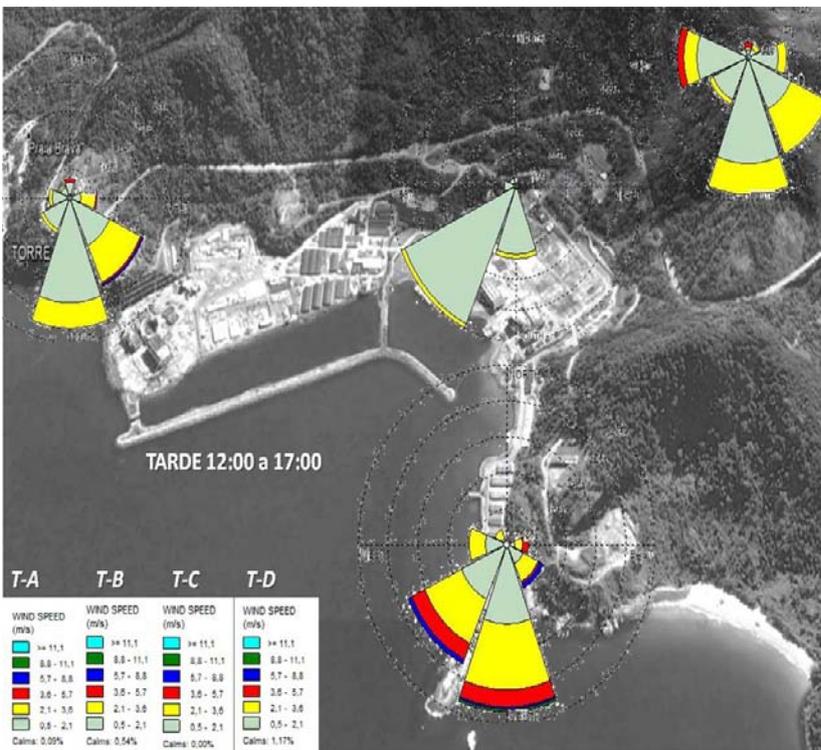
<b>Torre A</b>	<b>Torre B</b>	<b>Torre C</b>	<b>Torre D</b>
(0,5-2,1m/s) = 85,7%	(0,5-2,1m/s) = 59,2%	(0,5-2,1 m/s) = 74,8%	(0,5-2,1 m/s) = 71,5%
(2,1-3,6m/s) = 5,1%	(2,1-3,6m/s) = 25,9%	(2,1-3,6 m/s) = 19,9%	(2,1-3,6 m/s) = 22,5%
(<< 0,5m/s - calmaria) = 8,9%	(<< 0,5m/s - calmaria) = 4,3%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 0,7%	(<< 0,5 m/s - calmaria) = 2,6%
(3,6-5,7m/s) = 0,3%	(3,6-5,7m/s) = 8,4%	(3,6-5,7 m/s) = 3,1%	(3,6-5,7 m/s) = 3,1%
	(5,7-8,8m/s) = 1,6%	(5,7-8,8m/s) = 1,3%	(5,7-8,8m/s) = 0,3%
	(8,8-11,1 m/s) = 0,5%	(>= 11,1 m/s) = 0,1%	(>= 11,1 m/s) = 0,1%



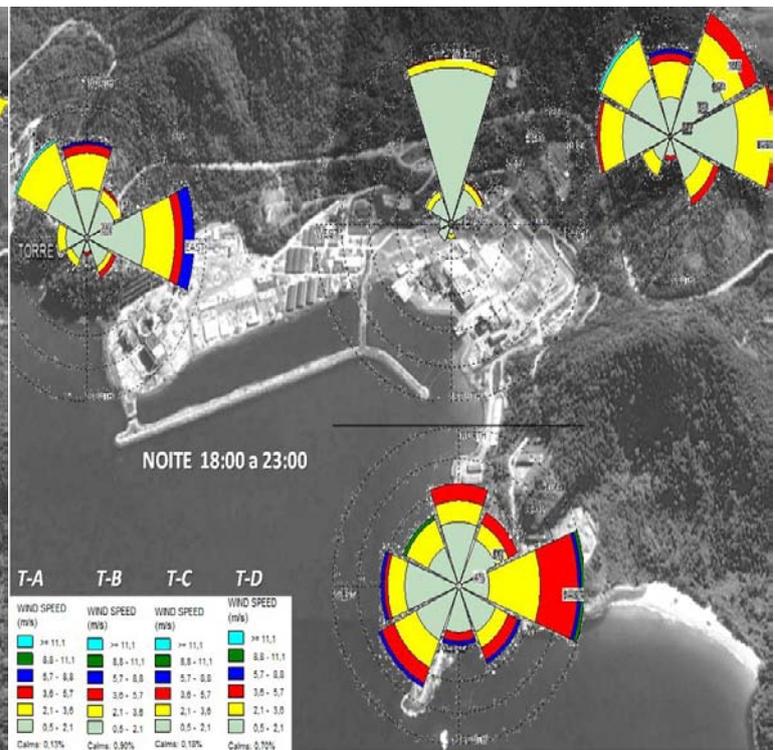
a)



b)



c)



d)

Fig 27 – Intensidade e direção do Campo de Vento para cada período

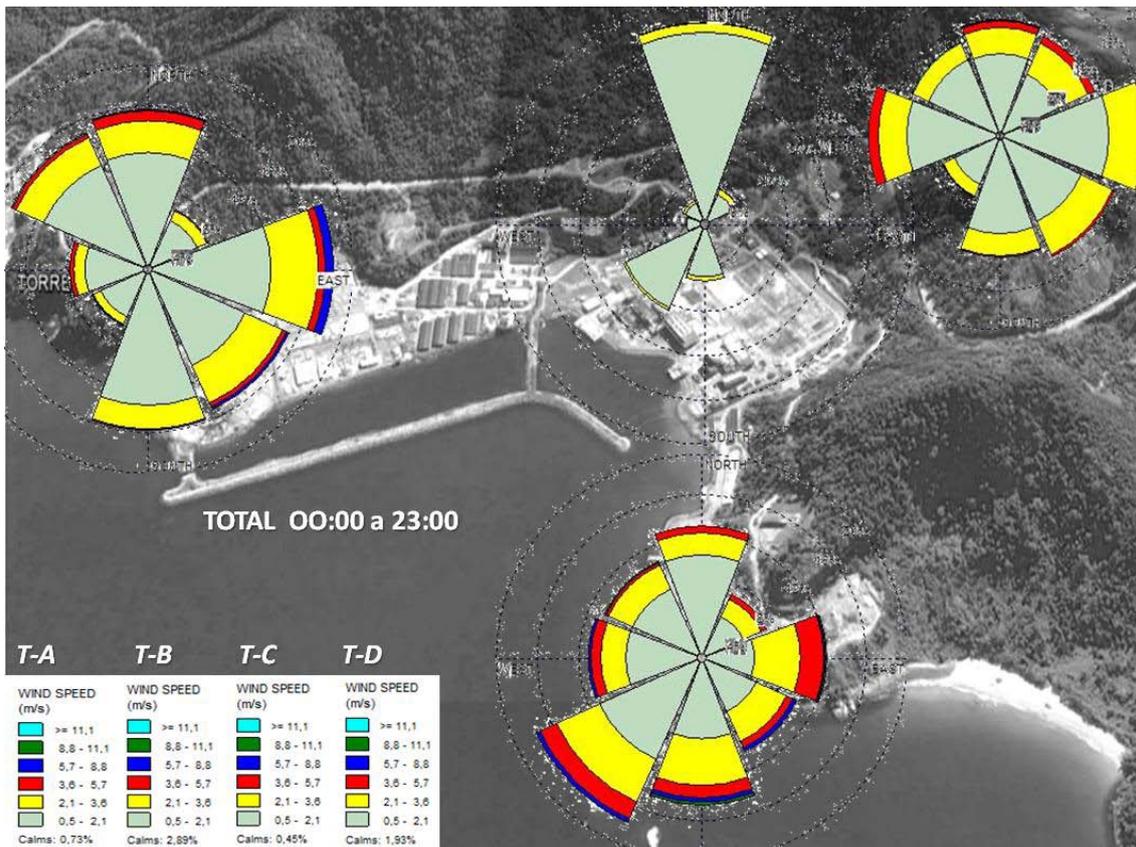


Fig 28 – Intensidade e direção do Campo de Vento para todo o período

Para mais detalhes sobre a influência da direção do campo de vento numa eventual rota de fuga em uma situação de acidente, ver Silva (2013).

A simulação mostrando o campo de vento no acoplamento *WRF/CALMET*, pode ser encontrado em Aguiar (2015) ”*simulação do campo de vento da região de Angra dos Reis para todo o mês de janeiro de 2009*”, ou acessado pelo link abaixo.

<https://www.youtube.com/watch?v=lLgcjxWT4IU>

A partir da modelagem do campo de vento da região, será feito a modelagem do transporte do radionuclídeo, de acordo com os cenários de liberação.

### 6.3 MODELO DE TRANSPORTE – CALPUFF

As simulações no *CALPUFF* foram realizadas assumindo-se uma fonte pontual de emissão referente à chaminé da Usina Angra I, com altura de 133 metros. Os parâmetros de descrição das *Fontes Pontuais* utilizados para modelagem das mesmas foram:

- *Identificação;*
- *Coordenadas UTM (km);*
- *Altura do Solo (m);*
- *Diâmetro (m);*
- *Velocidade (m/s);*
- *Temperatura (K);*
- *Taxa de Emissão (Bq/s).*

Os dados de entrada referente aos parâmetros acima podem ser vistos na *Figura 29*. A taxa de emissão obedecerá os cenários de liberação (*12h, 24h, 48h e 72h*), conforme descrito abaixo:

- **12 horas(liberação de todo o inventário) – analisando 24 horas – 2 dias**  
 $7,44 \times 10^{17} \text{ Bq} / 43200 \text{ s}(3600 \times 12\text{h}) = \text{taxa de emissão} = 1,72 \times 10^{13} \text{ Bq/s};$

onde

“ $7,44 \times 10^{17} \text{ Bq}$ ” é a atividade específica do  $^{131}\text{I}$  para todo o núcleo, “ $43200\text{s}$ ” é o valor da multiplicação de “ $3600 \text{ s}$ ” por “ $12 \text{ horas}$ ”, para que a taxa de emissão seja em  $\text{Bq/s}$ .

- **24horas(liberação de todo o inventário) – analisando 48 horas – 3 dias**  
 $7,44 \times 10^{17} \text{ Bq} / 86400 \text{ s}(3600 \times 24\text{h}) = \text{taxa de emissão} = 8,61 \times 10^{12} \text{ Bq/s};$

- **48horas(liberação de todo o inventário) – analisando 96 horas – 5 dias**  
 $7,44 \times 10^{17} \text{ Bq} / 172800 \text{ s}(3600 \times 48\text{h}) = \text{taxa de emissão} = 4,31 \times 10^{12} \text{ Bq/s};$

- **72horas(liberação de todo o inventário) – analisando 144 horas – 7 dias**  
 $7,44 \times 10^{17} \text{ Bq} / 259200 \text{ s}(3600 \times 72\text{h}) = \text{taxa de emissão} = 2,87 \times 10^{12} \text{ Bq/s};$

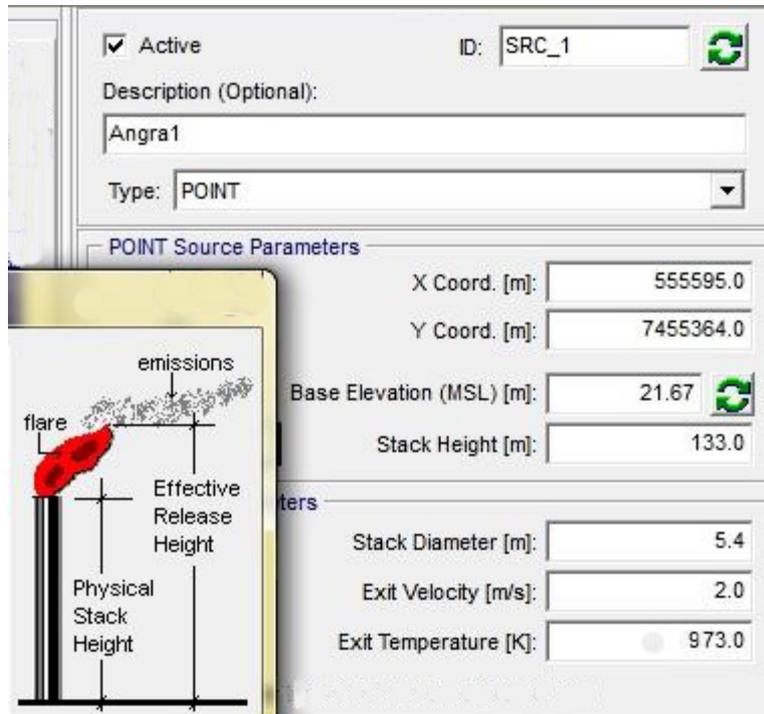


Fig 29 – Dados de entrada para uma fonte pontual

### 6.3.1. 12 horas de liberação

Para este período a simulação foi realizada do dia 01/01/2009 às 06:00 horas ao dia 02/01/2009 às 06:00 horas. Levou-se em conta que todo o material foi liberado em 12 horas e após a liberação a pluma se desloca conforme o campo de vento da região.

Na *Figura 30* observa-se, através da Torre A (*torre principal da CNAAA*), a intensidade e a direção do vento no momento da liberação. Nota-se a predominância *SO/S*, seguida das predominâncias *Norte*, *Oeste* e *Sudeste*, com velocidades entre 0.5 e 2.1 m/s.

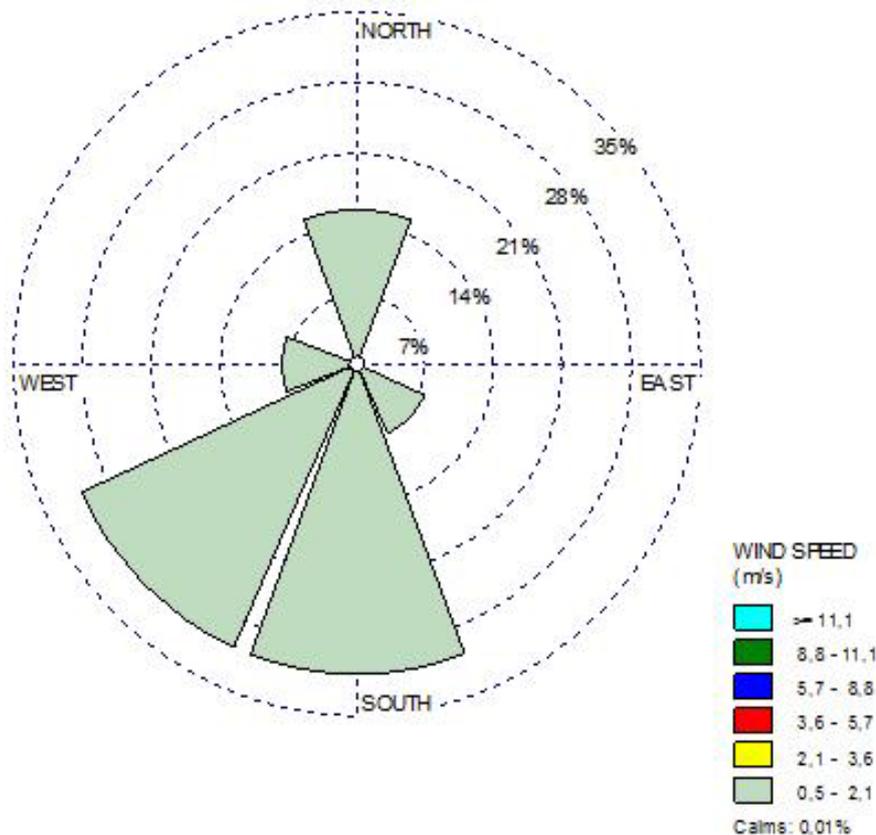


Fig 30 – Predominância SO/S no momento da liberação

Na *Figura 31 - 1 hora*, nota-se que para este período, a pluma se deslocou para a região do Frade, com concentrações que variam entre  $5,60 \times 10^{18}$  a  $9,06 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$  e para a região de Mambucaba, com uma concentração mínima de  $5,60 \times 10^{18} \text{ Bq/m}^3$  ou  $5,60 \text{ EBq/m}^3$ . No ponto da emissão a concentração é de  $5,60 \times 10^{20} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 32- 3 horas*, observa-se que para este período a pluma apresenta valores menores de concentração. Para a região do Frade o valor varia entre  $3,60 \text{ EBq/m}^3$  a  $5,07 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$  e para a região de Mambucaba o valor mínimo é de  $3,60 \text{ EBq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $3,60 \times 10^{20} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 33 – 24 horas*, já se observa uma diminuição considerável em relação ao período de 1 hora, onde na região do Frade os valores estão entre  $9,62 \times 10^{17}$  a  $7,06 \text{ EBq/m}^3$  e na região de Mambucaba, a concentração apresenta valor mínimo de  $9,62 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto de emissão o valor é de  $9,62 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$ .

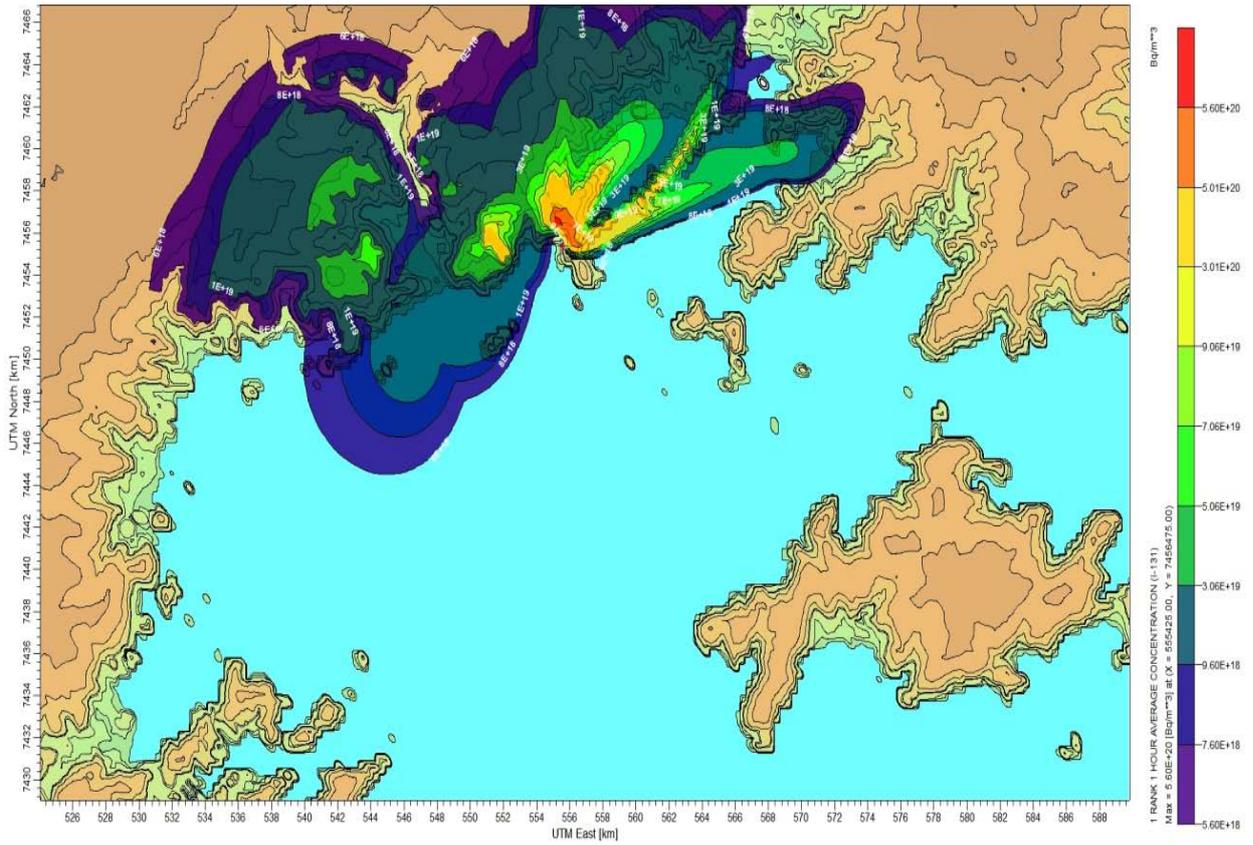


Fig 31 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 1 hora em 12 horas de liberação

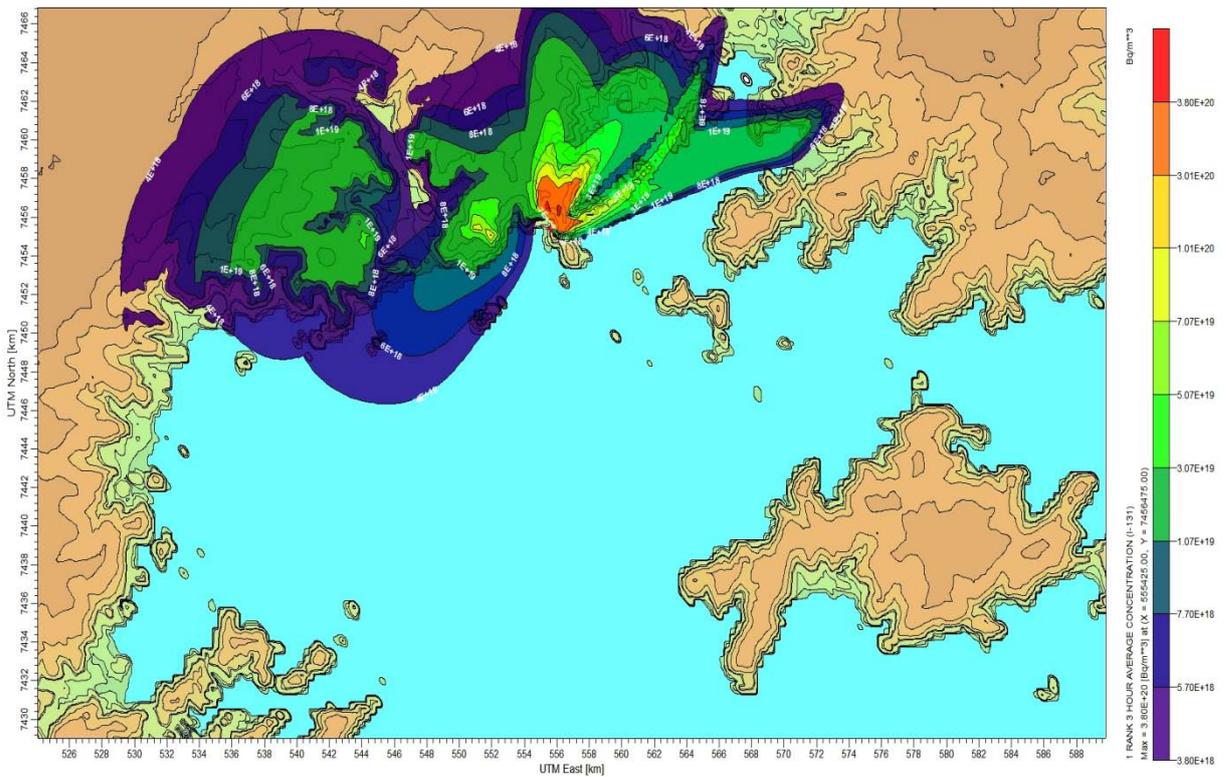


Fig 32 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 3 horas em 12 horas de liberação

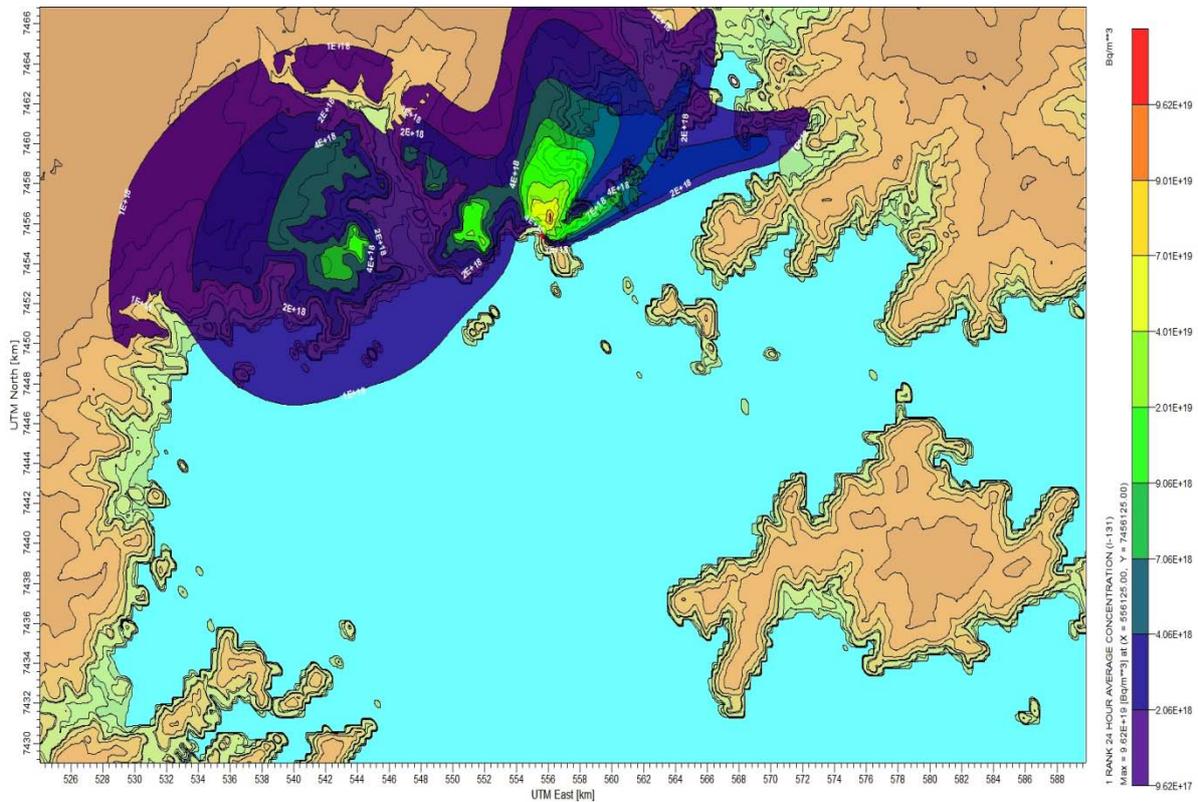


Fig 33 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 24 horas em 12 horas de liberação

A simulação mostrando a dispersão do radionuclídeo para o período de 12 horas de liberação pode ser encontrado em Aguiar (2015) “*simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 12 horas de liberação*”, ou acessado pelo link abaixo.

<https://www.youtube.com/watch?v=s2PvxTVZNOw&feature=youtu.be>

### 6.3.2. 24 horas de liberação

Para este período a simulação foi realizada do dia 01/01/2009 às 06:00 horas ao dia 03/01/2009 às 06:00 horas. Levou-se em conta que todo o material foi liberado em 24 horas, tendo dois momentos de liberação de 12 horas cada uma e após a liberação a pluma se desloca conforme o campo de vento da região.

Na *Figura 30* observa-se, através da Torre A (*torre principal da CNAAA*), a intensidade e a direção do vento no momento da primeira liberação e a segunda

liberação na *Figura 34*. Nota-se a predominância *SO/S*, seguida da predominância *N/NE*, para a segunda liberação, com velocidades entre 0.5 e 2.1 m/s.

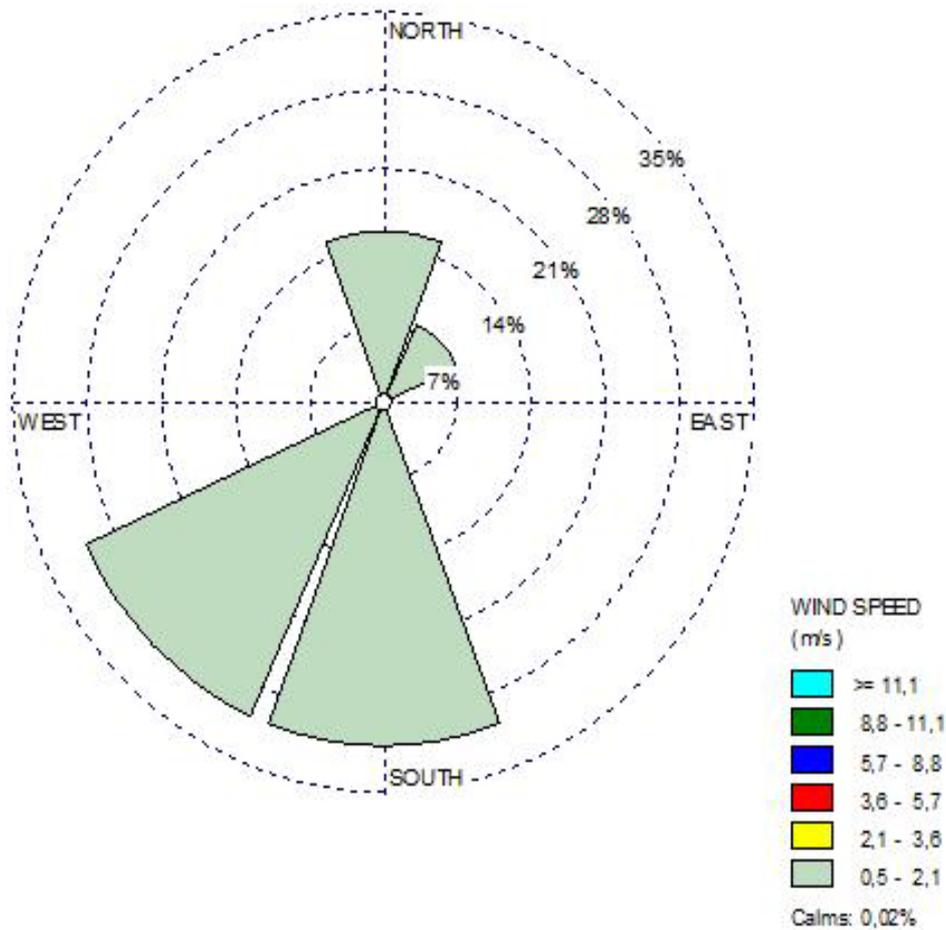


Fig 34 – Predominância *SO/S* e *N/NE* para a segunda liberação

Na *Figura 35 - 1 hora*, nota-se uma extensão maior da dispersão da pluma, chegando até a região de Paraty com valores de concentração entre  $1,40$  a  $5,40 \text{ EBq/m}^3$ . Na região do Frade a concentração varia de  $8,40 \text{ EBq/m}^3$  a  $1,04 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$ . Na região de Mambucaba o valor máximo é de  $8,40 \text{ EBq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $1,40 \times 10^{20} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 36 - 3 horas*, observa-se que para este período a pluma apresenta valores menores de concentração na região do Frade entre  $2,05$  a  $7,05 \text{ EBq/m}^3$  e em Mambucaba o valor mínimo é de  $2,05 \text{ EBq/m}^3$ . Para a região de Paraty o valor é de  $2,05 \text{ EBq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $9,51 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 37* – 24 horas, já se observa uma diminuição da concentração nas regiões do Frade, Mambucaba e Paraty, respectivamente, ( $2,41 \times 10^{17}$  a  $9,40 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$ ); ( $4,40 \times 10^{17}$  a  $6,40 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$ ) e  $2,41 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $2,41 \times 10^{19} \text{Bq/m}^3$ .

Na *Figura 38* – 48 horas, já se observa uma diminuição considerável em relação ao período de 1 hora, onde na região do Frade os valores estão entre  $1,21 \times 10^{17}$  a  $5,20 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$ , na região de Mambucaba a concentração apresenta valor mínimo de  $3,20 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$  e em Paraty o valor é de  $1,21 \times 10^{17} \text{Bq/m}^3$ . No ponto de emissão o valor é de  $1,21 \times 10^{19} \text{Bq/m}^3$ .

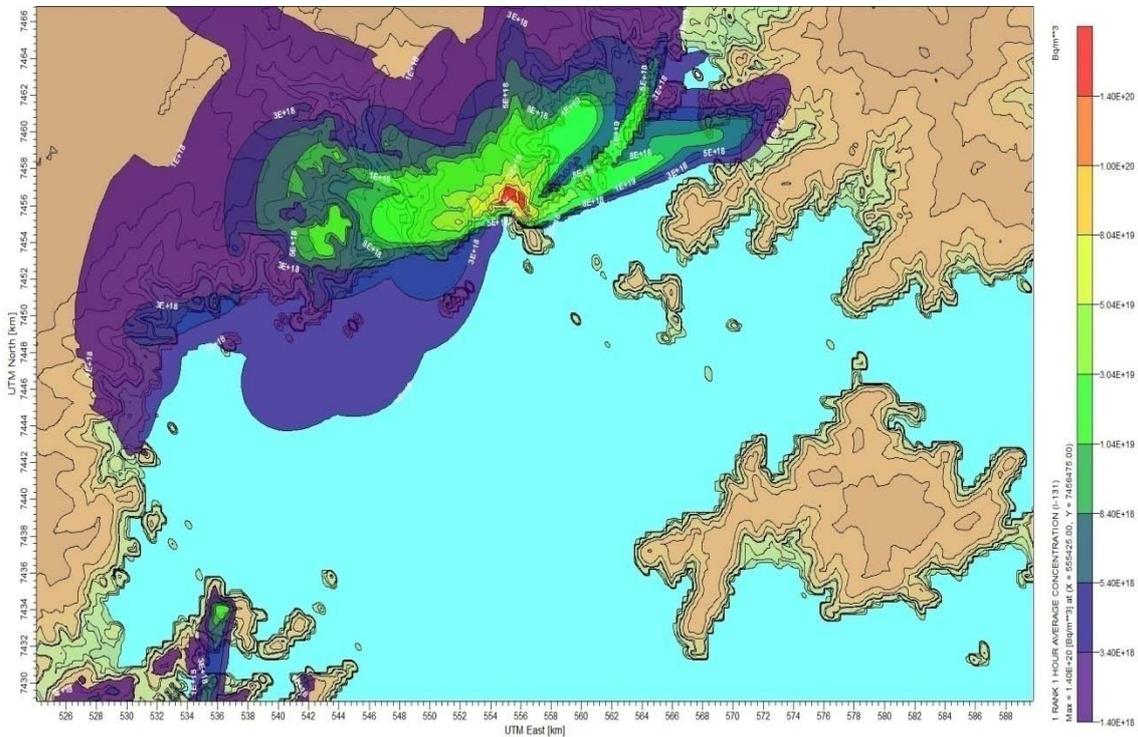


Fig 35 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 1 hora em 24 horas de liberação

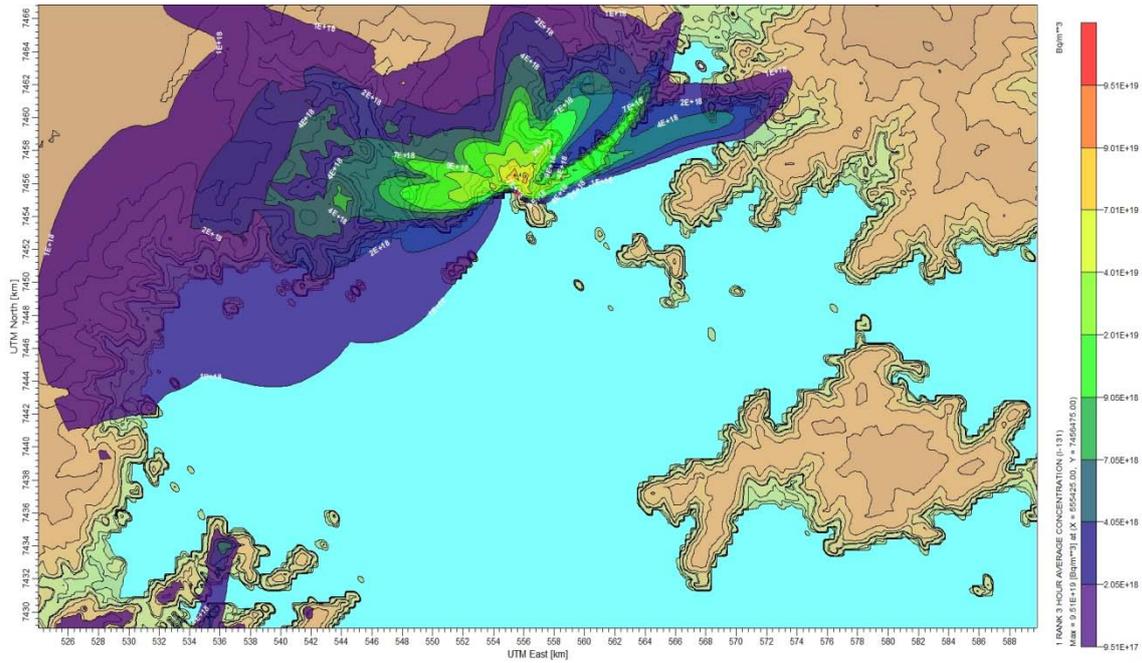


Fig 36 – Concentração do <sup>131</sup>I para o período de 3 horas em 24 horas de liberação

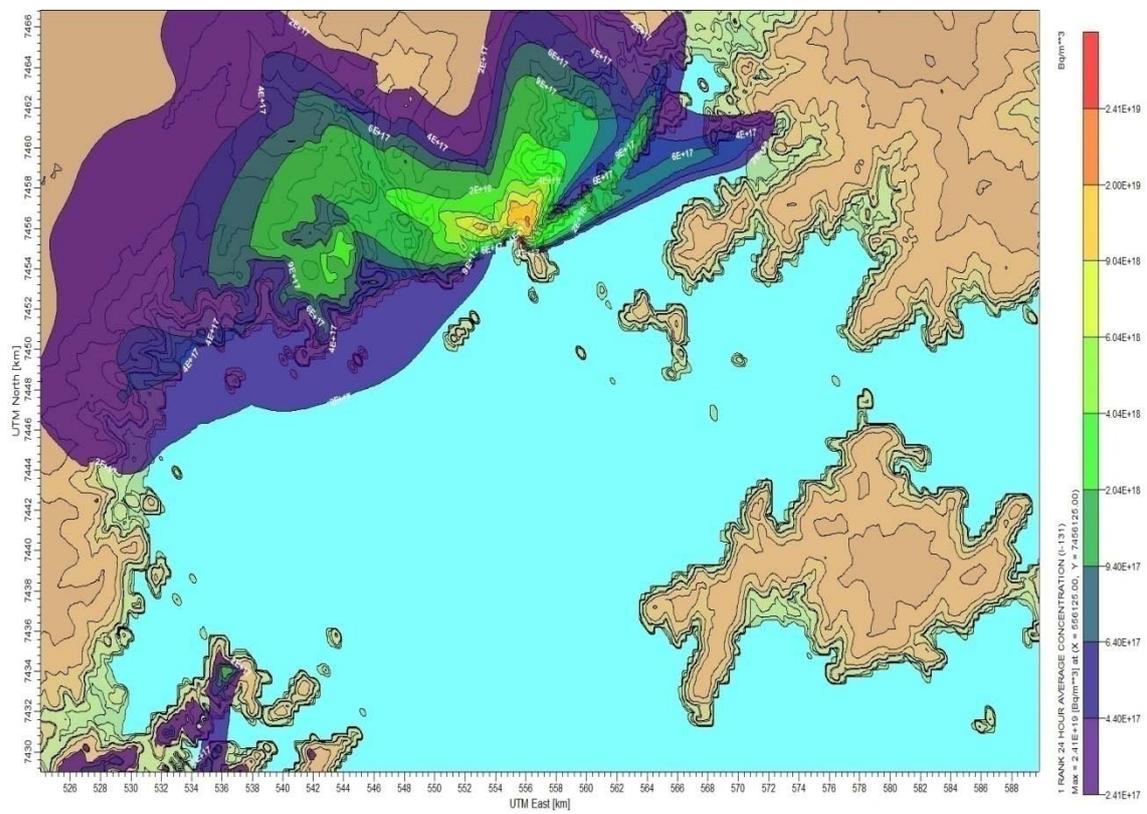


Fig 37 – Concentração do <sup>131</sup>I para o período de 24 horas em 24 horas de liberação

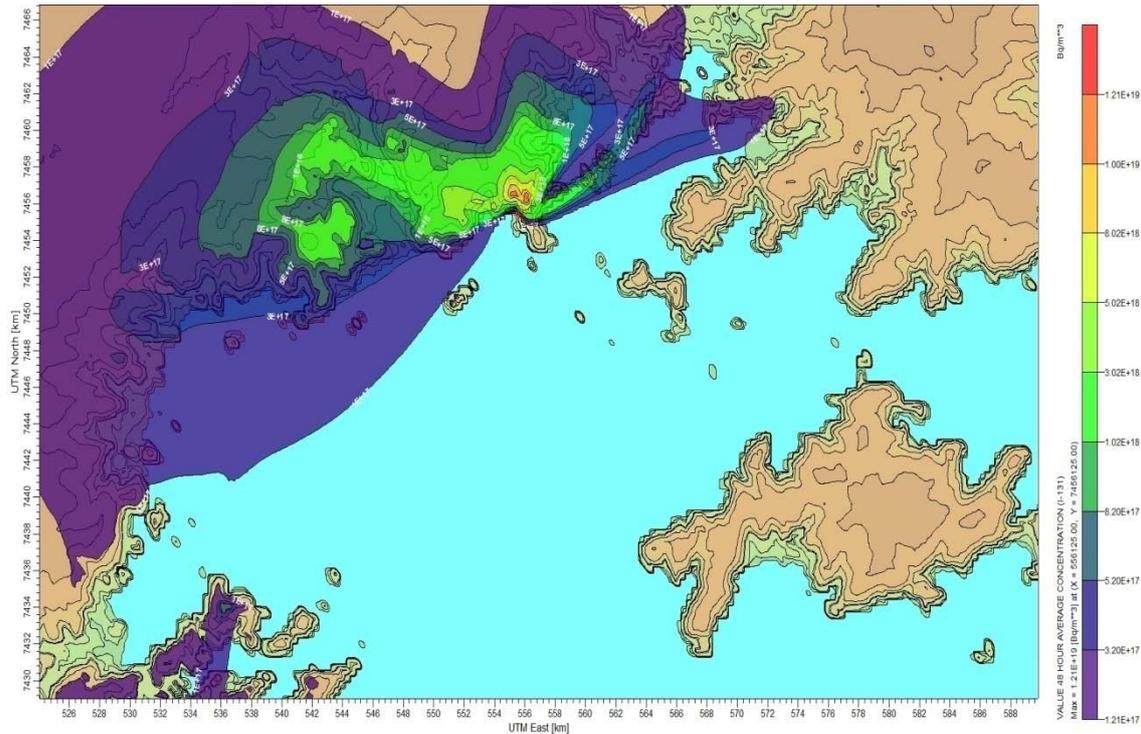


Fig 38 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 48 horas em 24 horas de liberação

A simulação mostrando a dispersão do radionuclídeo para o período de 24 horas de liberação pode ser encontrado em Aguiar (2015) “*simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 24 horas de liberação*”, ou acessado pelo link abaixo.

<https://www.youtube.com/watch?v=ZnFHrpjKNpU>

### 6.3.3. 48 horas de liberação

Para este período a simulação foi realizada do dia 01/01/2009 às 06:00 horas ao dia 05/01/2009 às 06:00 horas. Levou-se em conta que todo o material foi liberado em 48 horas, tendo quatro momentos de liberação de 12 horas cada uma e após a liberação a pluma se desloca conforme o campo de vento da região.

Na *Figura 30* observa-se, através da Torre A (*torre principal da CNAAA*), a intensidade e a direção do vento no momento da primeira liberação e a segunda liberação na *Figura 34*. Na terceira liberação *Figura 39*, nota-se predominância S,

seguida das predominâncias *Norte*, *Oeste* e *Sudoeste*, com velocidades entre 0,5 e 2,1 m/s e para a quarta liberação, *Figura 40*, observa-se predominância *S/SO*, com velocidades entre 2,1 e 3,6 m/s, seguida das predominâncias *N/NO* e *Leste*, com velocidades entre 0,5 e 2,1 m/s.

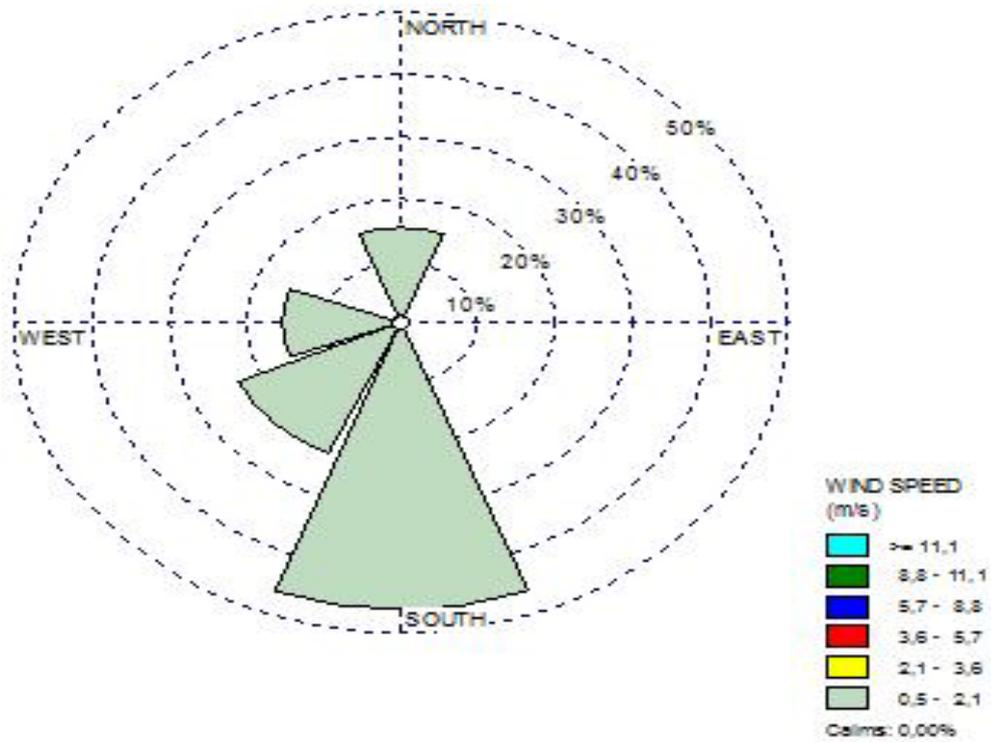


Fig 39 – Predominância S para a terceira liberação

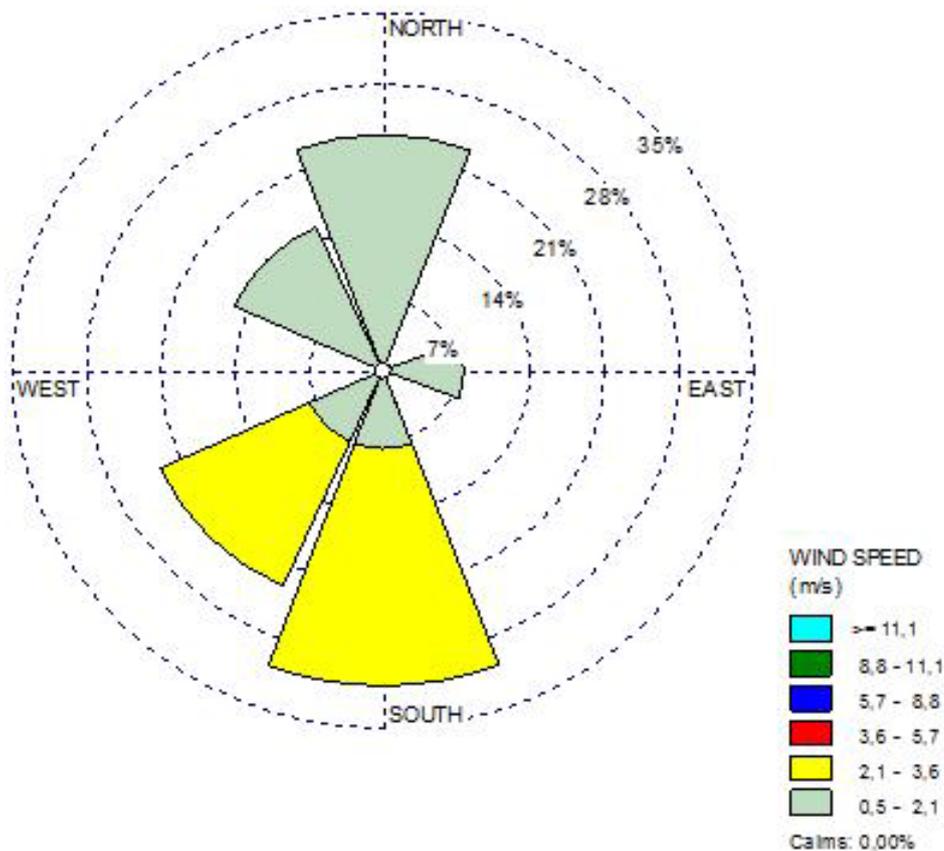


Fig 40 – Predominância S/SO e N/NO para a quarta liberação

Na *Figura 41 - 1 hora*, observa-se neste período o deslocamento da pluma por toda a região, onde na região do Frade a concentração apresenta valores de 3,07 a 5,07 EBq/m<sup>3</sup>, na região de Mambucaba 9,70 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup> a 3,07 EBq/m<sup>3</sup> e na região de Paraty 9,70 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup>. A pluma também se estende ao centro de Angra com valores de 3,07 a 9,07 EBq/m<sup>3</sup>, chegando também à Ilha Grande com valores de 9,70 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup> a 3,07 EBq/m<sup>3</sup>. No ponto da emissão o valor é de 5,74 X 10<sup>19</sup> Bq/m<sup>3</sup>.

Na *Figura 42 - 3 horas*, nota-se que para este período a concentração da pluma para as regiões do Frade, Mambucaba e Paraty, apresentam valores, respectivamente, de 2,04 EBq/m<sup>3</sup>, 6,40 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup> e 4,40 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup>. Para a região do centro de Angra os valores são de 6,40 X 10<sup>17</sup> a 9,40 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup> e para a Ilha Grande os valores são de 2,47 X 10<sup>17</sup> a 6,40 X 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup>. No ponto da emissão o valor é de 2,47 X 10<sup>19</sup> Bq/m<sup>3</sup>.

Na *Figura 43 - 24 horas*, já se observa uma diminuição da concentração nas regiões do Frade, Mambucaba e Paraty, respectivamente, 9,08 x 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup>, 2,08 x 10<sup>17</sup> Bq/m<sup>3</sup> e 7,86 x 10<sup>16</sup> Bq/m<sup>3</sup>. A região do centro de Angra apresenta valor

máximo de  $2,08 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  e na Ilha Grande o valor é de  $9,80 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $7,86 \text{ EBq/m}^3$ .

Na Figura 44 – 96 horas, já se observa uma diminuição considerável em relação ao período de 1 hora, onde na região do Frade o valor máximo é de  $3,07 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ , em Mambucaba o valor é de  $7,70 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$  e em Paraty apresenta valor de  $3,79 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . Para o centro de Angra o valor máximo é de  $1,07 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  e na Ilha Grande  $1,0 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto de emissão o valor é de  $3,79 \text{ EBq/m}^3$ .

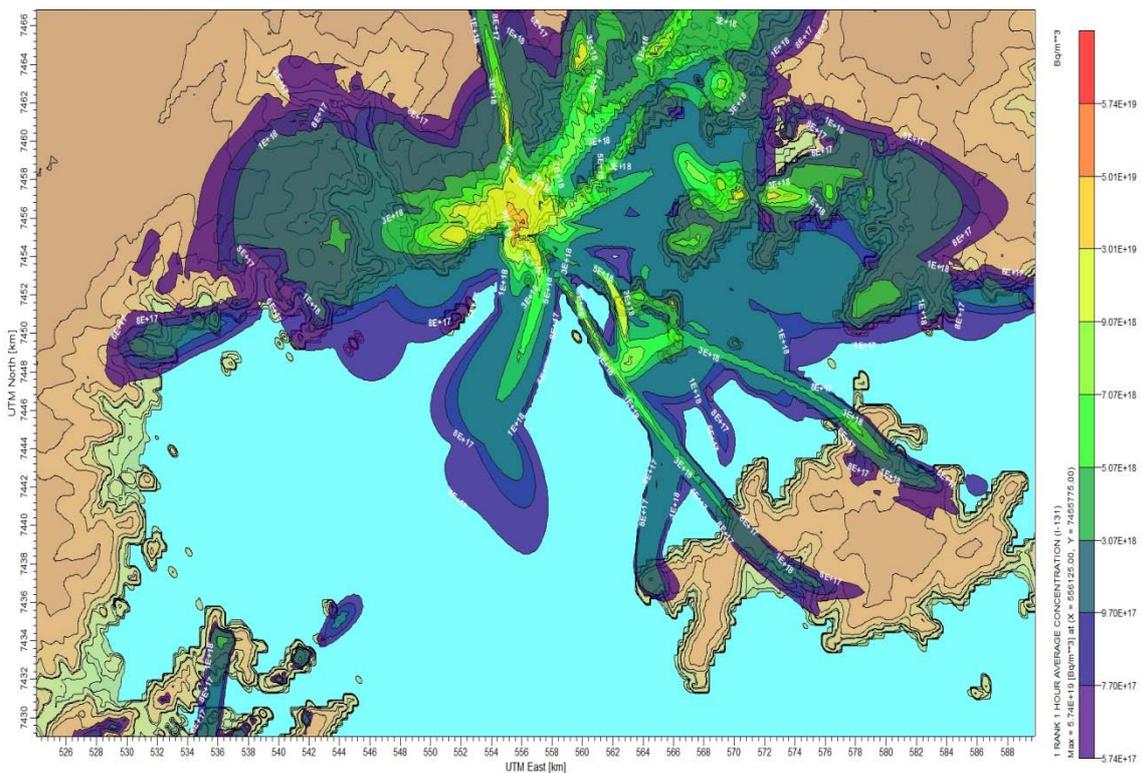


Fig 41 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 1 hora em 48 horas de liberação

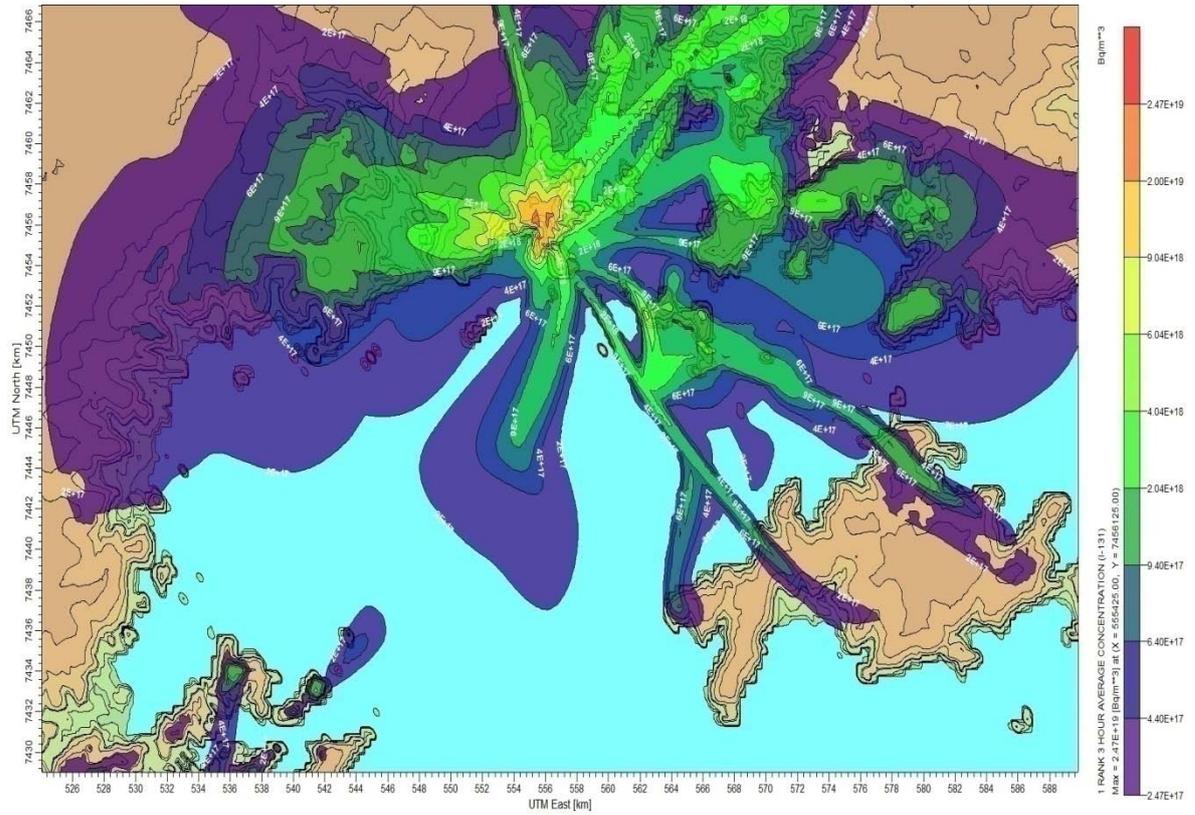


Fig 42 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 3 horas em 48 horas de liberação

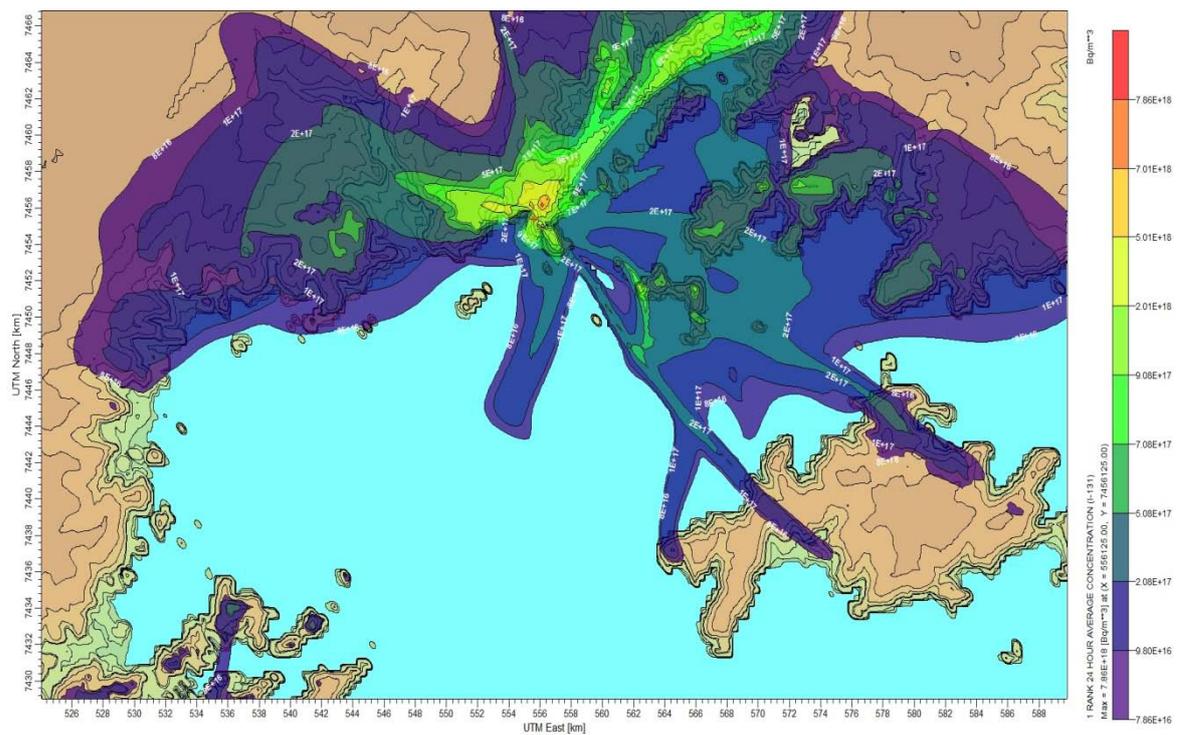


Fig 43 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 24 horas em 48 horas de liberação

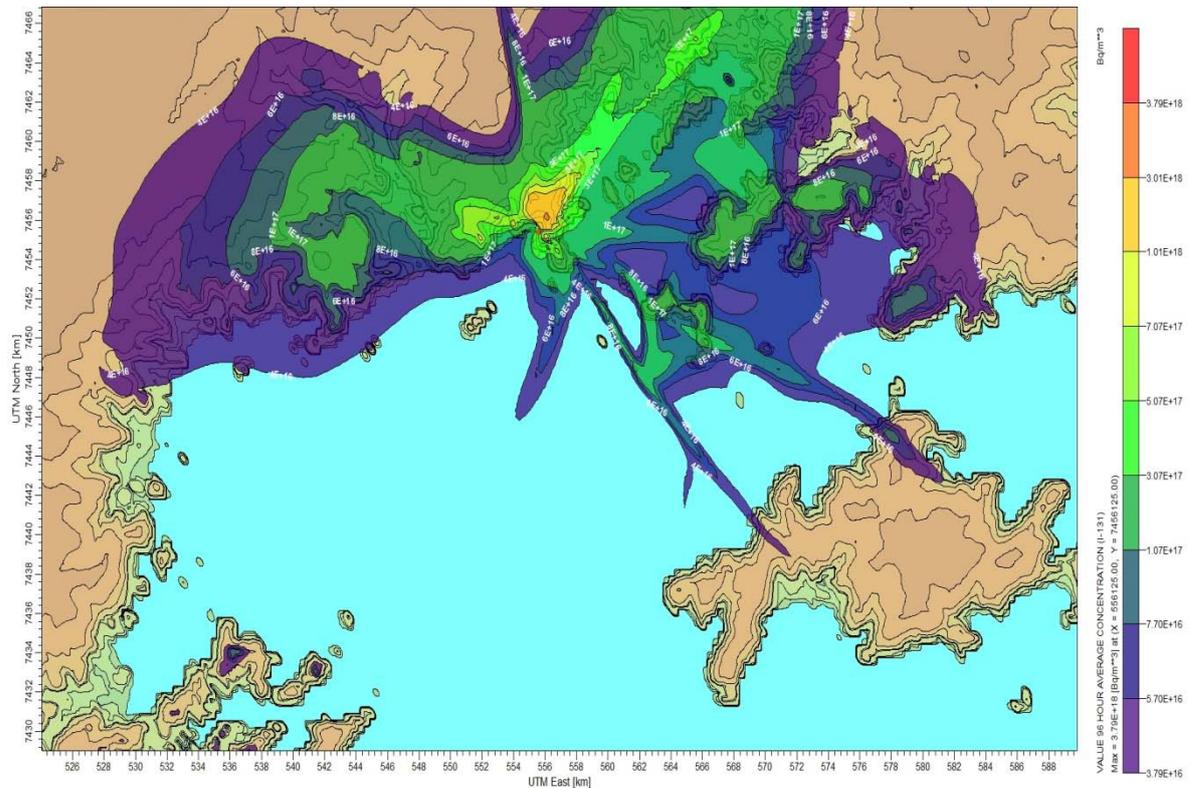


Fig 44 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 96 horas em 48 horas de liberação

A simulação mostrando a dispersão do radionuclídeo para o período de 48 horas de liberação pode ser encontrado em Aguiar (2015) “*simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 48 horas de liberação*”, ou acessado pelo link abaixo.

<https://www.youtube.com/watch?v=GQ3lqxsInM0>

#### 6.3.4. 72 horas de liberação

Para este período a simulação foi realizada do dia 01/01/2009 às 06:00 horas ao dia 07/01/2009 às 06:00 horas. Levou-se em conta que todo o material foi liberado em 72 horas, tendo seis momentos de liberação de 12 horas cada uma e após a liberação a pluma se desloca conforme o campo de vento da região.

Na *Figura 30* observa-se, através da Torre A (*torre principal da CNAAA*), a intensidade e a direção do vento no momento da primeira liberação, a segunda na *Figura 34*, a terceira na *Figura 39* e a quarta liberação na *Figura 40*. Para a quinta



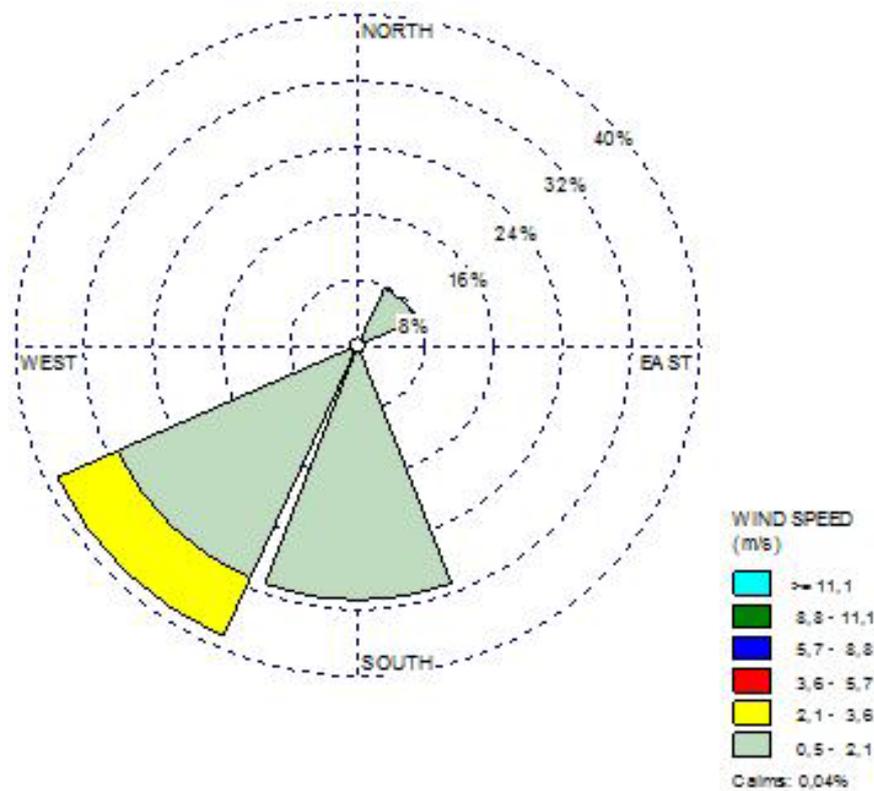


Fig 46 – Predominância SO/S para a sexta liberação

Na *Figura 47 - 1 hora*, observa-se que neste período a pluma se estende por toda a Baía, apresentando concentrações do  $^{131}\text{I}$  para a região do Frade de 2,05 a 4,05  $\text{EBq/m}^3$ , para a região de Mambucaba de  $9,50 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  a 2,05  $\text{EBq/m}^3$  e em Paraty  $4,50 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ . No centro de Angra a concentração chega a valores máximos de 2,05  $\text{EBq/m}^3$  e na Ilha Grande o valor máximo é de 1,0  $\text{EBq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $2,54 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 48 - 3 horas*, para este período nota-se que as maiores concentrações estão na região da CNAAA, onde apresenta valores de 1,01 a 3,01  $\text{EBq/m}^3$ . Para a região do Frade o valor máximo é de  $5,10 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ , para a região de Mambucaba de  $5,10 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  a 1,01  $\text{EBq/m}^3$  e em Paraty  $1,17 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ . No centro de Angra a concentração chega a valores máximos de  $5,10 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  e na Ilha Grande o valor máximo é de  $3,10 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $1,17 \times 10^{19} \text{ Bq/m}^3$ .

Na *Figura 49 - 24 horas*, observa-se uma diminuição dos valores na região da CNAAA, onde apresenta valores máximos de  $3,04 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ . Para a região do Frade

os valores são de  $1,04 \times 10^{17}$  a  $3,04 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$ , para a região de Mambucaba o valor máximo é de  $7,40 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$  e em Paraty  $3,48 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No centro de Angra a concentração chega a valores máximos de  $1,04 \times 10^{17} \text{ Bq/m}^3$  e na Ilha Grande o valor é de  $3,48 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $3,48 \text{ EBq/m}^3$ .

Na Figura 50 – 144 horas, nota-se uma diminuição considerável em relação ao período de 1 hora, onde na região do Frade os valores máximos são de  $5,30 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ , em Mambucaba, cujo valor máximo é de  $3,30 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$  e em Paraty, onde o valor da concentração está abaixo do detectável pelo modelo, ou seja,  $1,32 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No centro de Angra observa-se que a concentração apresenta valores de  $3,30 \times 10^{16}$  a  $5,30 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$  e na Ilha Grande o valor máximo é de  $1,32 \times 10^{16} \text{ Bq/m}^3$ . No ponto da emissão o valor é de  $1,32 \text{ EBq/m}^3$ .

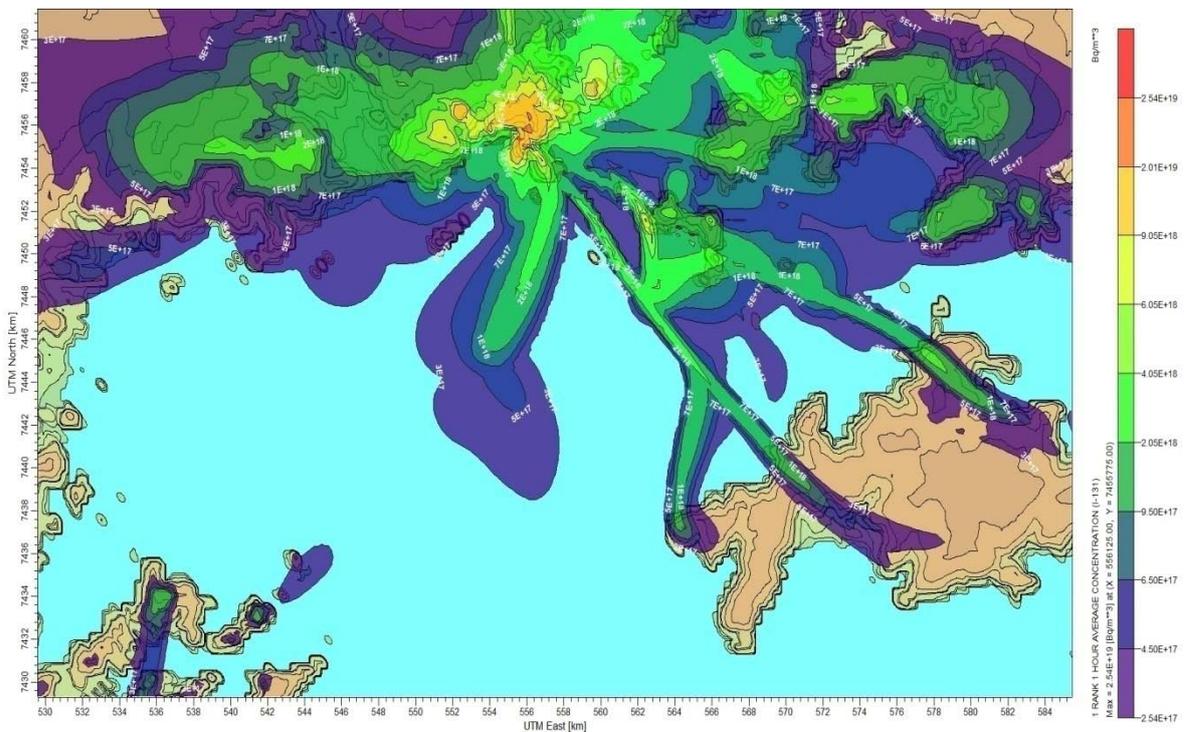


Fig 47 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 1 hora em 72 horas de liberação

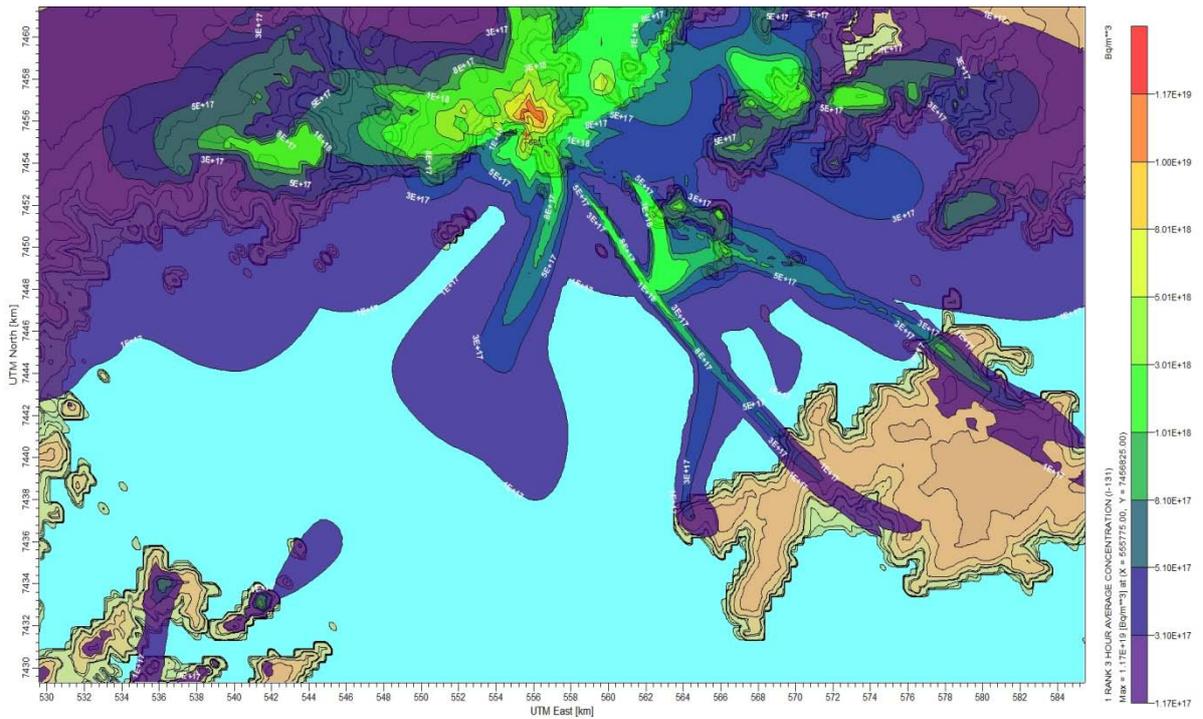


Fig 48 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 3 horas em 72 horas de liberação

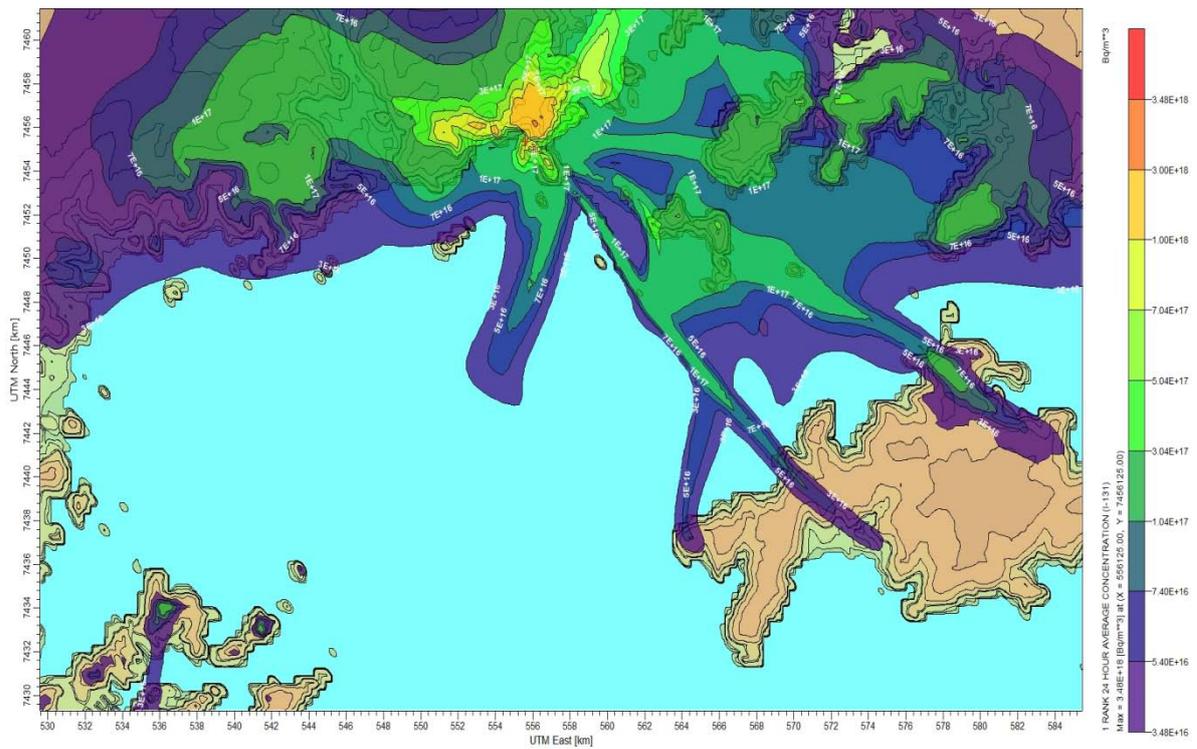


Fig 49 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 24 horas em 72 horas de liberação

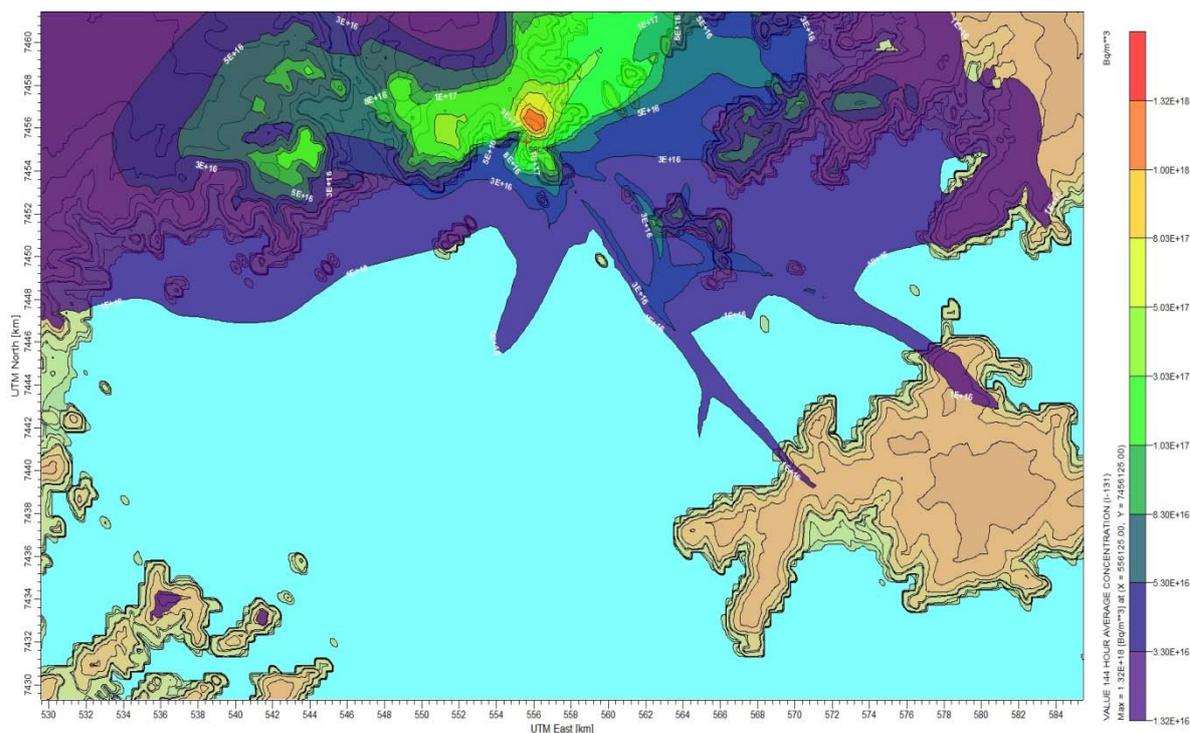


Fig 50 – Concentração do  $^{131}\text{I}$  para o período de 144 horas em 72 horas de liberação

A simulação mostrando a dispersão do radionuclídeo para o período de 72 horas de liberação pode ser encontrado em Aguiar (2015) “*simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 72 horas de liberação*”, ou acessado pelo link abaixo.

<https://www.youtube.com/watch?v=uws8etaIcE8>

Com base nas concentrações de cada cenário de liberação, será feito o mapa de dose, a fim de se analisar o impacto na região. O que veremos a seguir.

## 7 AVALIAÇÃO DO IMPACTO

### 7.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A entrada dos radionuclídeos no corpo pode ocorrer por inúmeras vias. No caso de uma dispersão na atmosfera, a principal forma é por inalação. No entanto, uma fração de qualquer material depositado no sistema respiratório será transferido para a garganta e ingerido, dando a possibilidade para a absorção no trato gastrointestinal.

A entrada por ingestão direta pode ocorrer, para alguns radionuclídeos, por absorção através da pele intacta ou por danos na pele por meio de cortes ou outros ferimentos. Na *Figura 51* é mostrada a cinética do radionuclídeo em cada compartimento do corpo (IAEA, 1999).

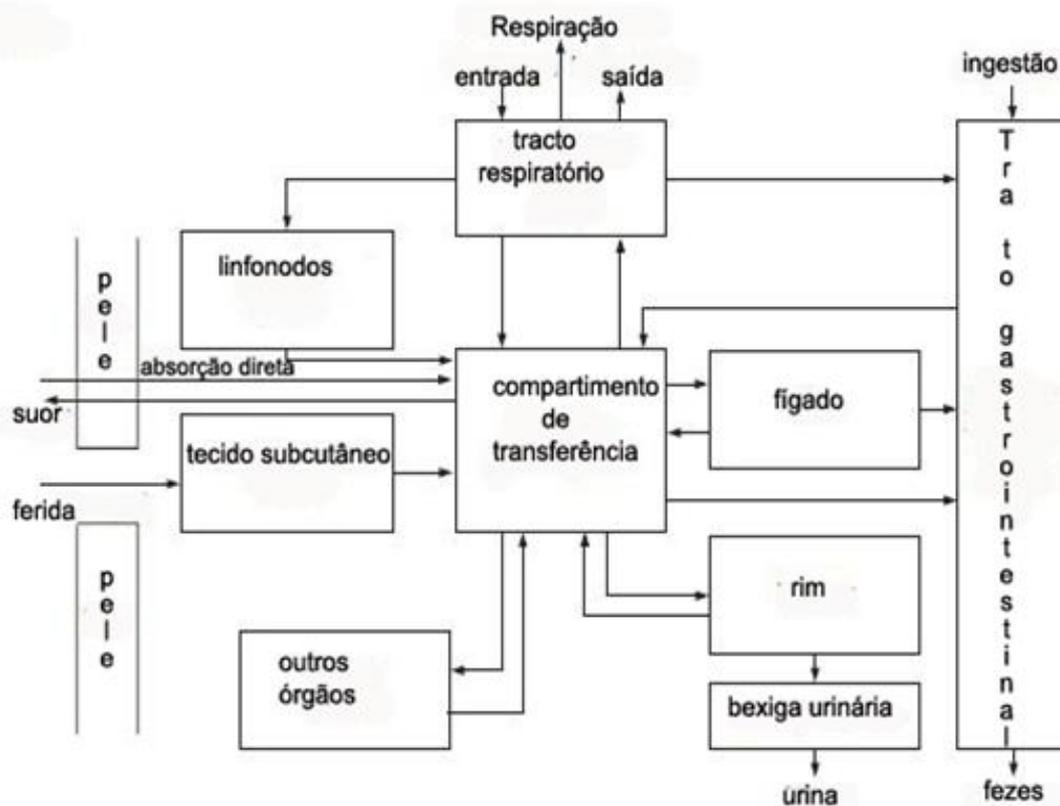


Fig 51 – Rotas de entrada, transferência e excreção

A deposição das partículas inaladas é calculada para cada região do trato respiratório levando-se em conta a inspiração e expiração. Isto é feito em função do tamanho da partícula e os parâmetros de respiração, e assumindo como independente da forma química.

Os parâmetros de deposição padrão para indivíduos expostos são dados com base na média de padrões diários de atividade (IAEA, 2014). O coeficiente de dose de inalação é em função do tamanho da partícula padrão que segundo a BSS – *Basic Safety Standards* é de 5 $\mu$ m, que representa o diâmetro aerodinâmico médio de atividade – *Activity median aerodynamic diameter (AMAD)*.

A absorção para o sangue depende da forma físico-química do radionuclídeo depositado no sistema respiratório, mas é considerado como sendo independente do local de deposição. Na *Figura 52* se observa a biocinética do iodo em um adulto.

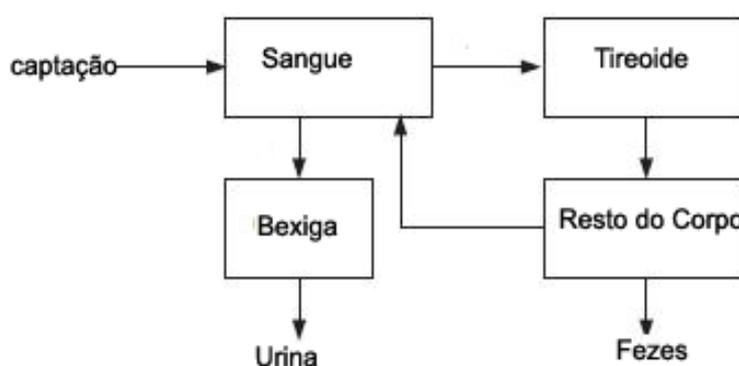


Fig 52 – Biocinética do Iodo em um adulto

## 7.2 CÁLCULO DE DOSE PARA A TIREOIDE

As restrições de dose e os níveis de referência são utilizados para otimização de proteção e segurança. O resultado esperado é que todas as exposições sejam controladas a níveis que são tão baixos quanto razoavelmente exequível, *princípio ALARA*. As restrições de dose são aplicadas à exposição ocupacional e exposição pública.

As restrições de dose para controle em situações de *exposição ocupacional e exposição pública* são semelhantes, porém essas restrições são aplicadas de diferentes maneiras.

Para a exposição ocupacional, a restrição de dose é uma ferramenta a ser estabelecida e usada na otimização da proteção e segurança para a pessoa (*trabalhador*) ou organização responsável por uma instalação ou uma atividade.

Para exposição pública, o governo ou o órgão regulador garante a criação ou a aprovação de restrições de dose, tendo em conta as características do local e do estabelecimento ou atividade, os cenários para exposição e as opiniões das partes interessadas.

Após as exposições terem ocorrido, a restrição de dose pode ser usada como um ponto de referência para avaliar uma melhor adequação de estratégia de proteção e de segurança (*ou seja, um plano de emergência otimizado*) que incluirá outros fatores.

Para este trabalho, as restrições de dose para o público são baseadas na resolução CNEN – 09/69 (CNEN, 1969), as quais serão melhor abordados na seção 7.3. Essas restrições terão como base a dose na *tireoide*, visto que este órgão capta o iodo conforme mostrado na *Figura 52*.

O cálculo de dose na tireoide é baseado no *Guia de Segurança da Agência Internacional, N° -115* (IAEA, 1996) e na *Comissão Internacional de Proteção Radiológica* (ICRP 60, 1991), bem como na *Posição Regulatória CNEN, n° 3.01/011* (CNEN,2011), este referente ao coeficiente de dose para exposição do público. Este cálculo é baseado no tempo que o indivíduo adulto inala o radionuclídeo, conforme mostrado abaixo.

$$D_i = A_i * e_g * F_{fs} * F_{h_s} * F_{p_s} * W_t * U_t \quad (5)$$

onde:

- $D_i$  = dose de inalação para a tireoide, em Sv.
- $A_i$  = atividade inalada em Bq ( em função da atividade do radionuclídeo no ar em  $Bq/m^3$ , multiplicado pela taxa de respiração para um indivíduo adulto, ou seja,  $1.2 m^3/h$ , multiplicado pelo tempo de exposição. Logo  $A_i = Bq/m^3 * 1.2 m^3/h * h$  ).
- $e_g$  = coeficiente de dose cujo valor é de  $1.06 \times 10^{-9} Sv/Bq$  (referente as diferentes categorias de absorção pulmonar – *rápida, moderada ou lenta*,

que no trabalho em vigor foi adotado a categoria lenta que é em função do metabolismo de uma pessoa adulta).

- $F_{fs}$  = fator físico-químico do material, cujo valor é de 0,01.
- $F_{hs}$  = fator (clima com chuva ou seco) cujo valor é 0,1 para chuvoso.
- $F_{ps}$  = fator de proteção de segurança que para lugar aberto é 1.
- $W_t$  = fator de sensibilidade do tecido, cujo valor para tireoide é de 0,05.
- $U_t$  = captação da tireoide que apresenta valor de 30% ou seja 0,3.

Mediante a equação (5) será obtida a dose para as respectivas concentrações, observando as liberações de 100% de  $^{131}\text{I}$  para a atmosfera (*cenário proposto – pior caso*), bem como da liberação de 1% de  $^{131}\text{I}$  para a atmosfera (*cenário proposto no documento de Angra I, (FSAR, 2011)*).

### 7.2.1. liberação de 100% de $^{131}\text{I}$

- As *Figura 53 a 55* representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 12 horas. As doses se baseiam nas médias das concentrações desde seu ponto máximo (ponto de emissão) até o ponto mínimo modelado.

Na *Figura 53* para 1 hora de exposição, observa-se que as doses no entorno da usina variam de  $9,65 \times 10^5$  a  $1,07 \times 10^7$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $1,45 \times 10^5$  a  $5,84 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $1,83 \times 10^5$  a  $9,65 \times 10^5$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,07 \times 10^5$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 12 km.

Na *Figura 54* para 3 horas de exposição, nota-se que as doses nas cercanias da usina variam de  $1,76 \times 10^6$  a  $2,18 \times 10^7$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $3,26 \times 10^5$  a  $6,12 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $4,41 \times 10^5$  a  $1,76 \times 10^6$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $2,18 \times 10^5$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 15 km no sentido oeste da CNAAA.

Na *Figura 55* para 24 horas de exposição, nota-se que as doses nas cercanias da usina agora apresentam valores de  $3,23 \times 10^6$  a  $4,13 \times 10^7$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $9,43 \times 10^5$  a  $1,86 \times 10^6$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $9,43 \times 10^5$  a  $3,23 \times 10^6$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $4,41 \times 10^5$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 15 km no sentido oeste da CNAAA.

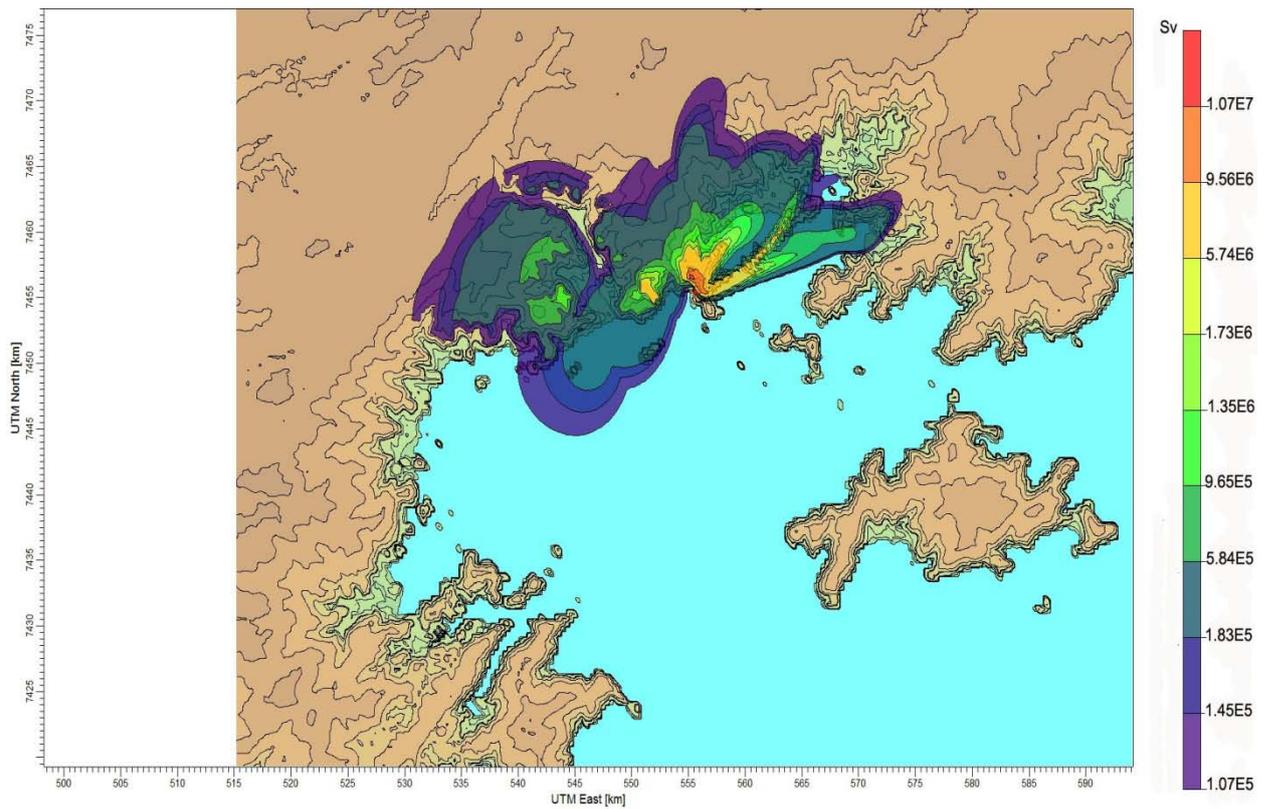


Fig 53 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 12 horas de liberação

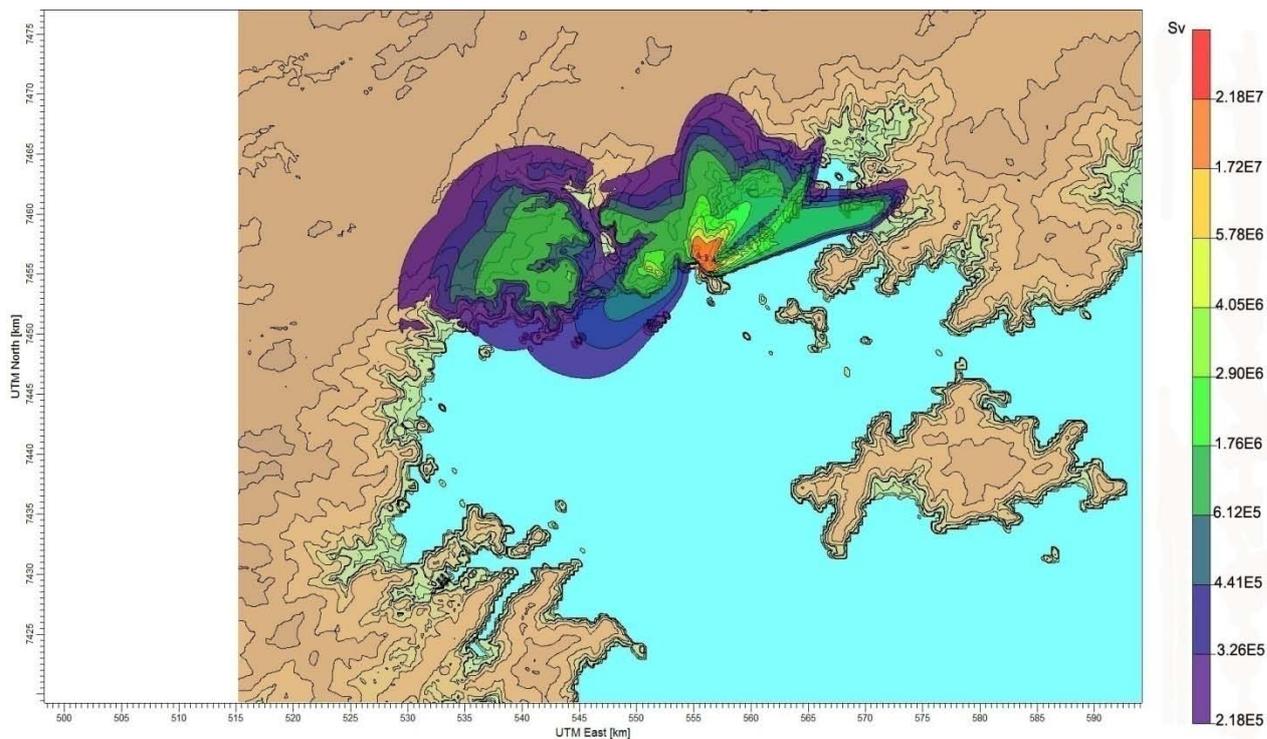


Fig 54 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação

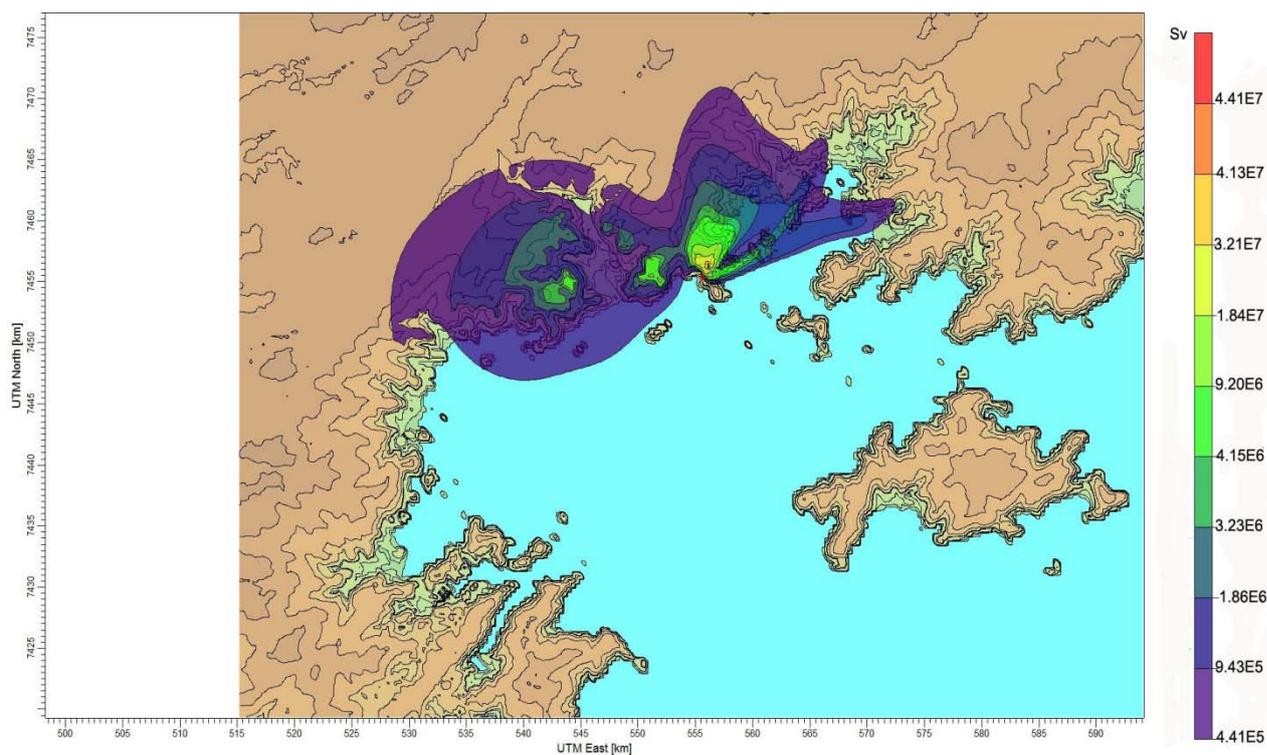


Fig 55 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação

- As Figuras 56 a 59 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 24 horas.

Na Figura 56 para 1 hora de exposição, nota-se que as doses nas cercanias da usina bem como na praia Brava apresentam valores de  $1,98 \times 10^5$  a  $2,67 \times 10^6$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $6,49 \times 10^4$  a  $1,60 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $6,49 \times 10^4$  a  $1,98 \times 10^5$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $2,67 \times 10^4$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 30 km na região de Paraty.

Na Figura 57 para 3 horas de exposição, observa-se que na CNAAA e nas proximidades da praia Brava as doses variam de  $5,18 \times 10^5$  a  $5,16 \times 10^6$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $1,17 \times 10^5$  a  $4,04 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $1,17 \times 10^5$  a  $4,04 \times 10^5$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $5,44 \times 10^4$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 30 km na região de Paraty.

Na Figura 58 para 24 horas de exposição, observa-se que na CNAAA e nas proximidades da praia Brava as doses variam de  $9,34 \times 10^5$  a  $9,16 \times 10^6$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $2,01 \times 10^5$  a  $4,30 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $2,01 \times 10^5$  a  $4,30 \times 10^5$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,10 \times 10^5$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 30 km na região de Paraty.

Na Figura 59 para 48 horas de exposição, observa-se que na CNAAA e nas proximidades da praia Brava as doses variam de  $9,34 \times 10^5$  a  $9,16 \times 10^6$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $2,93 \times 10^5$  a  $9,34 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $2,93 \times 10^5$  a  $7,51 \times 10^5$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,11 \times 10^5$  Sv, apresentando um deslocamento de aproximadamente 30 km na região de Paraty.

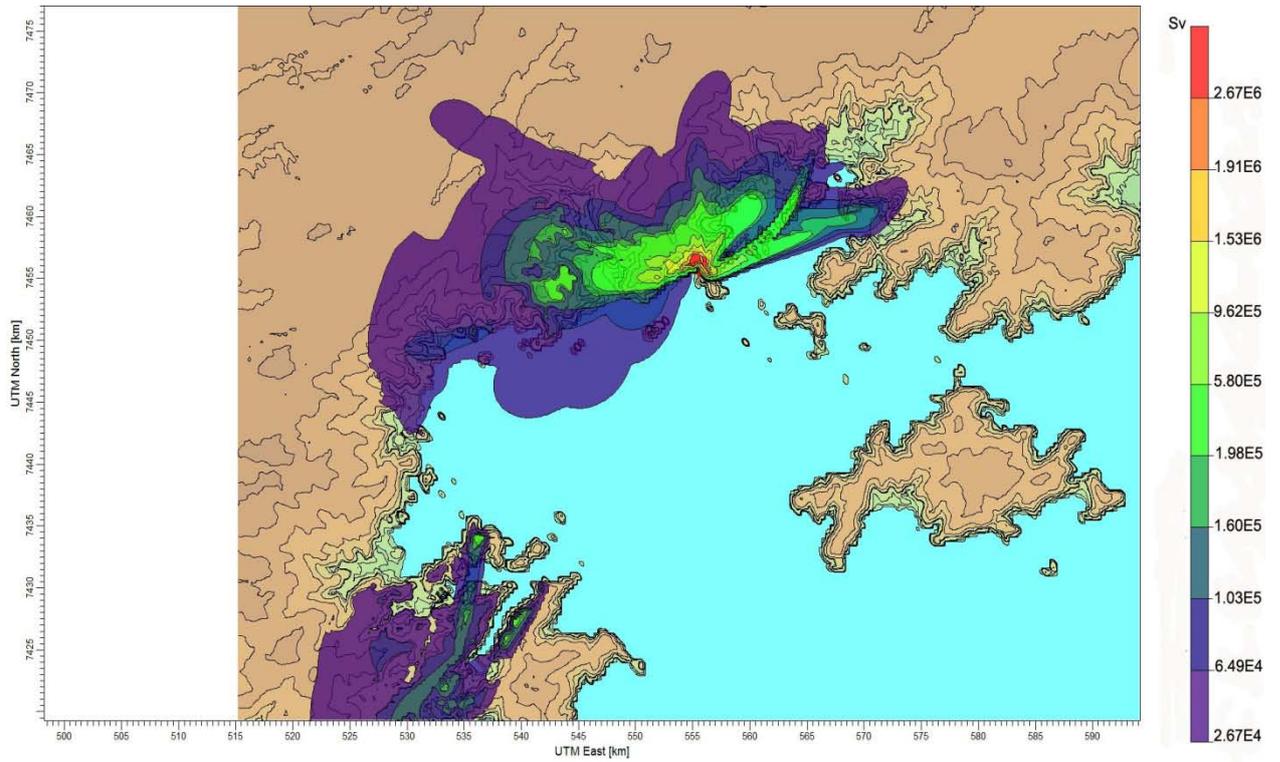


Fig 56 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 24 horas de liberação

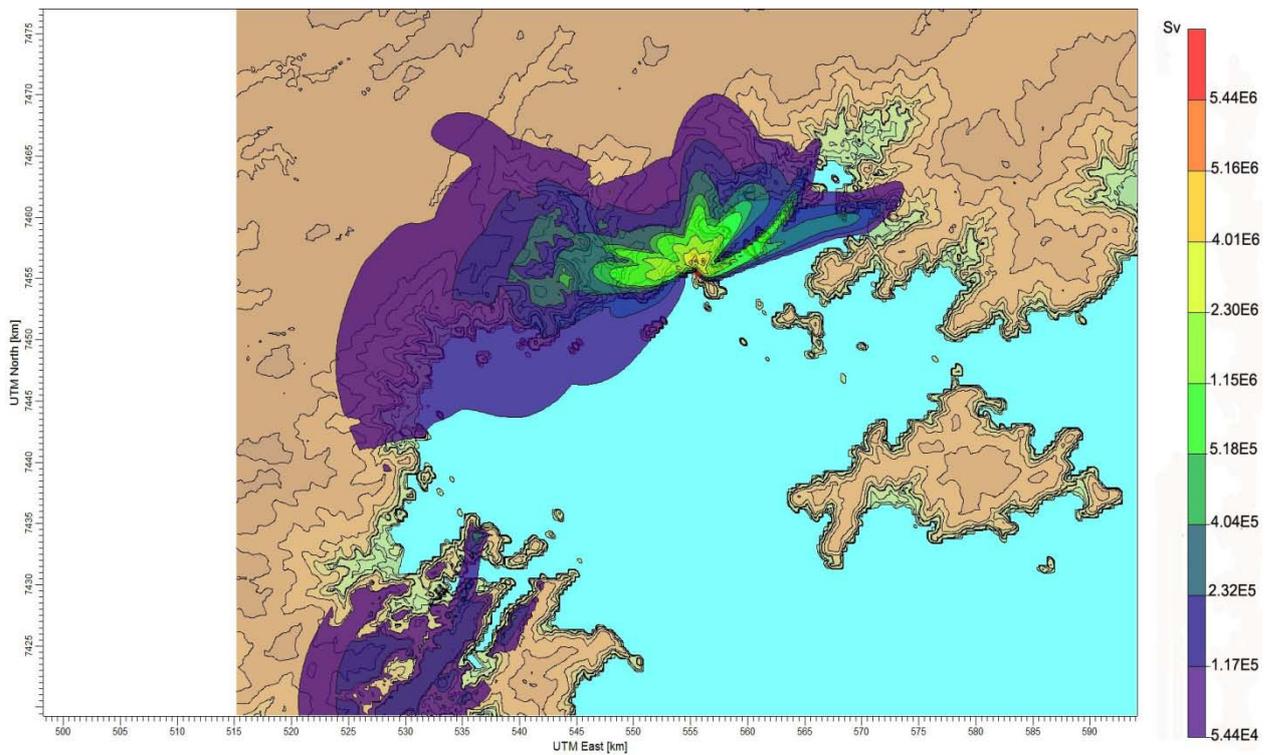


Fig 57 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

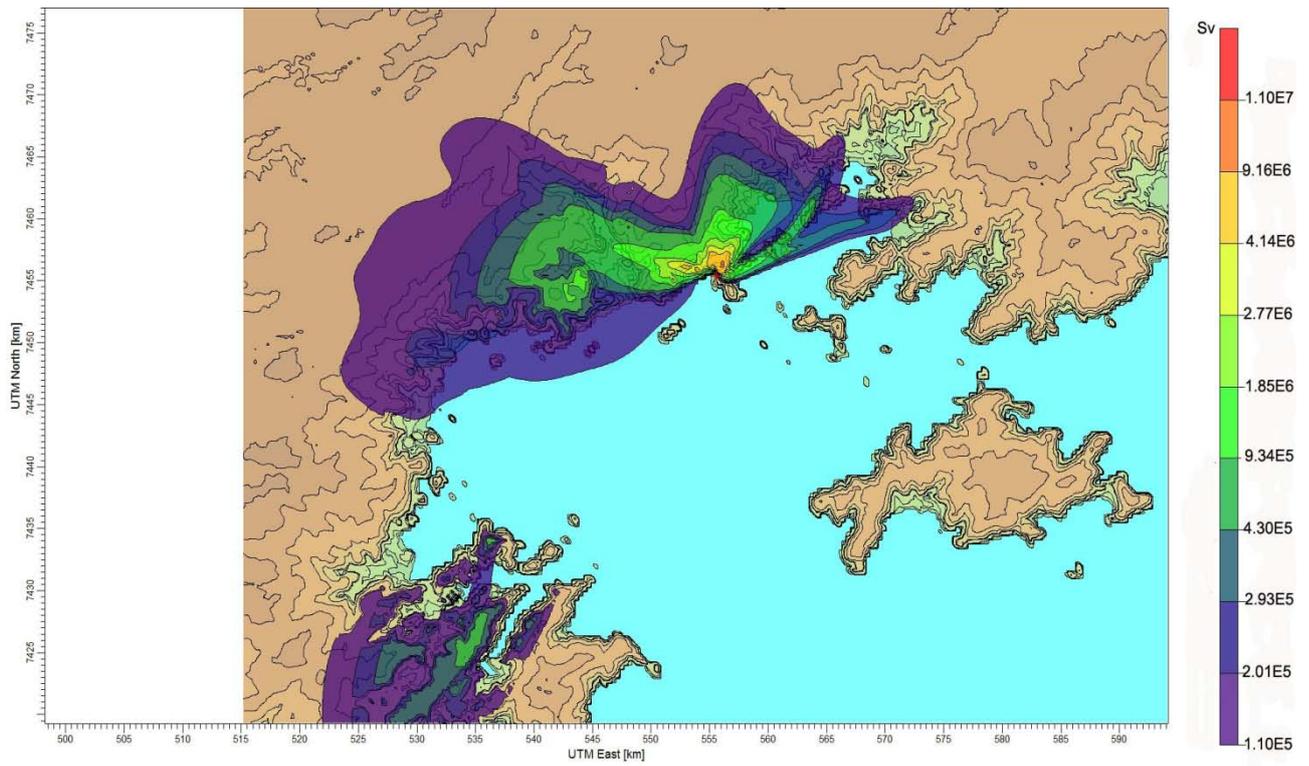


Fig 58 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

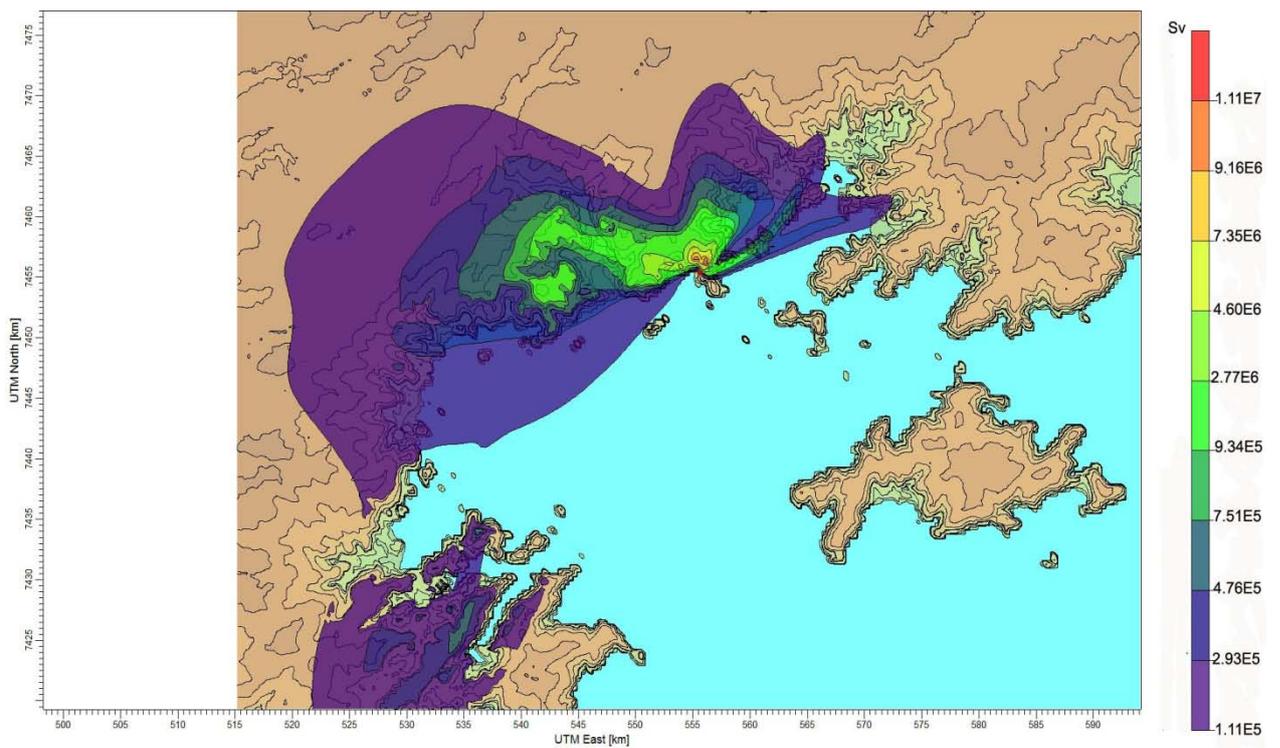


Fig 59 – Dose para tireoide referente a 48 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

- As Figuras 60 a 63 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 48 horas.

Na Figura 60 para 1 hora de exposição, nota-se que na CNAAA e nas proximidades da praia Brava as doses variam de  $1,73 \times 10^5$  a  $9,56 \times 10^5$  Sv. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $1,85 \times 10^4$  a  $5,86 \times 10^4$  Sv. Na região do Frade cuja distância é de 9 km as doses são de  $5,86 \times 10^4$  a  $1,35 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra que está a 20 km da central nuclear (região leste a usina), as doses apresentam valores de  $1,85 \times 10^4$  a  $9,67 \times 10^4$  Sv. Na região da Ilha Grande, cuja distância é de 25 km a partir da central nuclear as doses são de  $1,47 \times 10^4$  a  $5,86 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,10 \times 10^4$  Sv tanto na região de Conceição de Jacareí que está a 25 km de distância da central nuclear (região leste a usina), bem como na região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na Figura 61 para 3 horas de exposição, observa-se doses de  $1,17 \times 10^5$  a  $1,14 \times 10^6$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba cuja distância é de 9 km a partir do ponto de emissão, as doses variam de  $2,52 \times 10^4$  a  $5,38 \times 10^4$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $3,66 \times 10^4$  a  $1,17 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra que está a 20 km da central nuclear (região leste a usina), as doses apresentam valores de  $3,66 \times 10^4$  a  $1,17 \times 10^5$  Sv. Na região da Ilha Grande, cuja distância é de 25 km a partir da central nuclear as doses são de  $2,52 \times 10^4$  a  $5,38 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,41 \times 10^4$  Sv tanto na região de Conceição de Jacareí que está a 25 km de distância da central nuclear (região leste a usina), bem como na região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na Figura 62 para 24 horas de exposição, observa-se doses de  $3,24 \times 10^5$  a  $3,21 \times 10^6$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $4,49 \times 10^4$  a  $2,33 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $9,52 \times 10^4$  a  $3,24 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra que está a 20 km da central nuclear (região leste a usina), as doses apresentam valores de  $4,49 \times 10^4$  a  $2,33 \times 10^5$  Sv. Na região da Ilha Grande, cuja distância é de 25 km a partir da central nuclear a dose é de  $4,49 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $3,60 \times 10^4$  Sv tanto na região de Conceição de Jacareí que está a 25 km de distância da

central nuclear (região leste a usina), bem como na região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na *Figura 63* para 96 horas de exposição, nota-se que as doses para este período são de  $1,96 \times 10^5$  a  $5,51 \times 10^6$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,04 \times 10^5$  a  $1,96 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,96 \times 10^5$  a  $5,62 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra que está a 20 km da central nuclear (região leste a usina), as doses apresentam valores de  $1,04 \times 10^5$  a  $1,96 \times 10^5$  Sv. Na região da Ilha Grande, a dose se encontra no valor mínimo modelado de  $6,94 \times 10^4$  Sv bem como na região de Conceição de Jacareí e na região de Paraty.

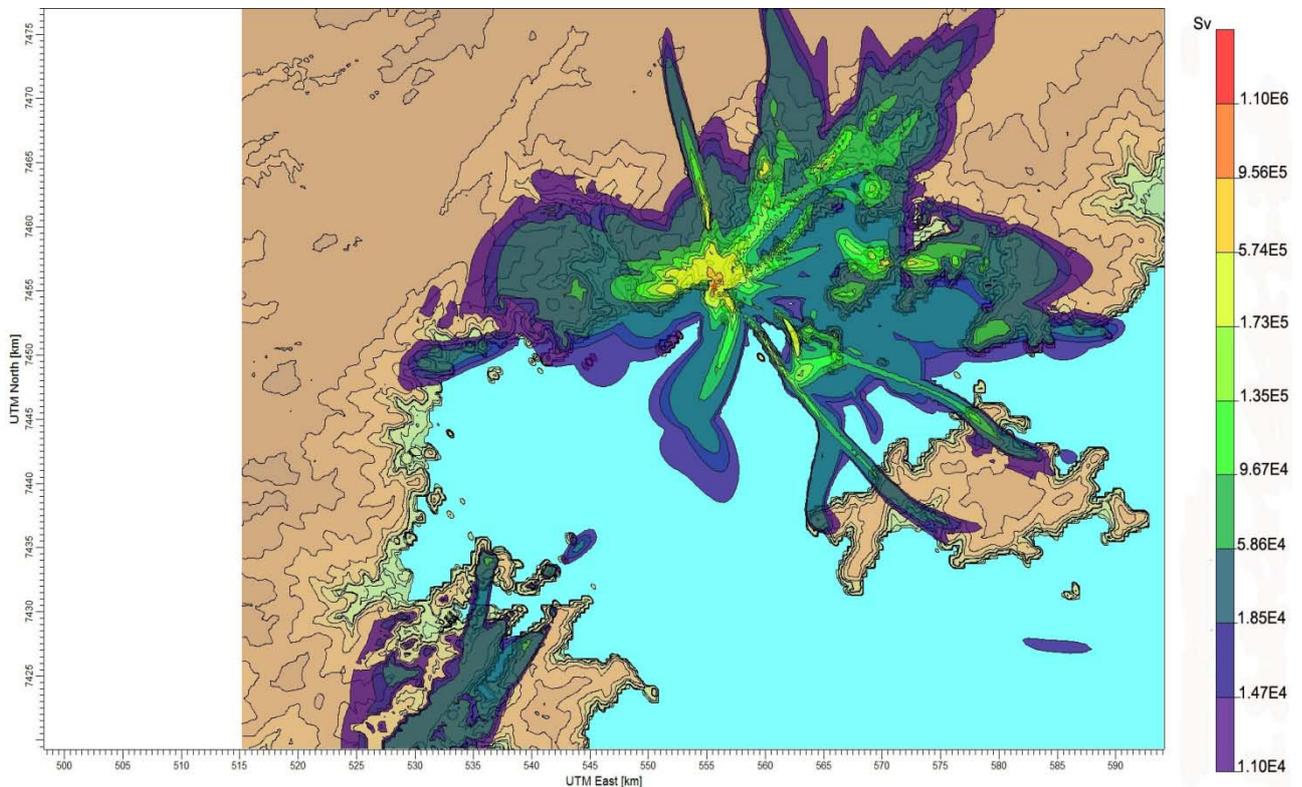


Fig 60 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 48 horas de liberação

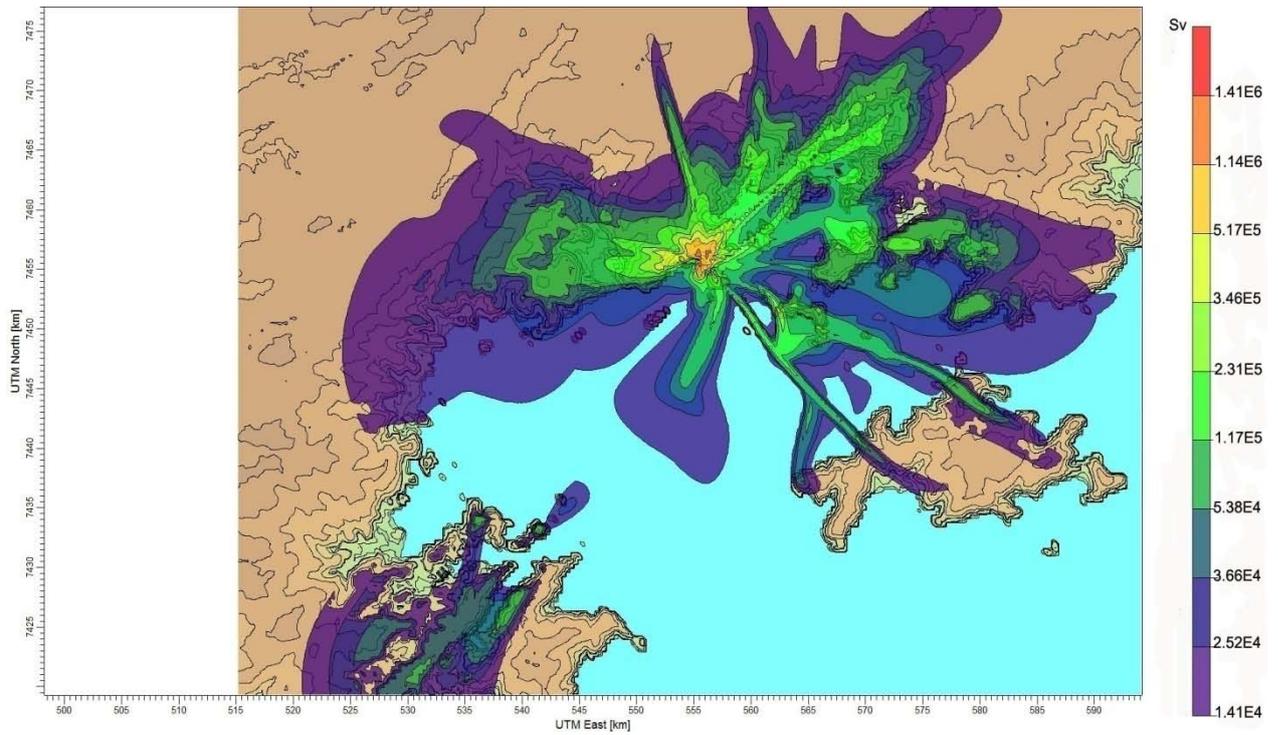


Fig 61 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

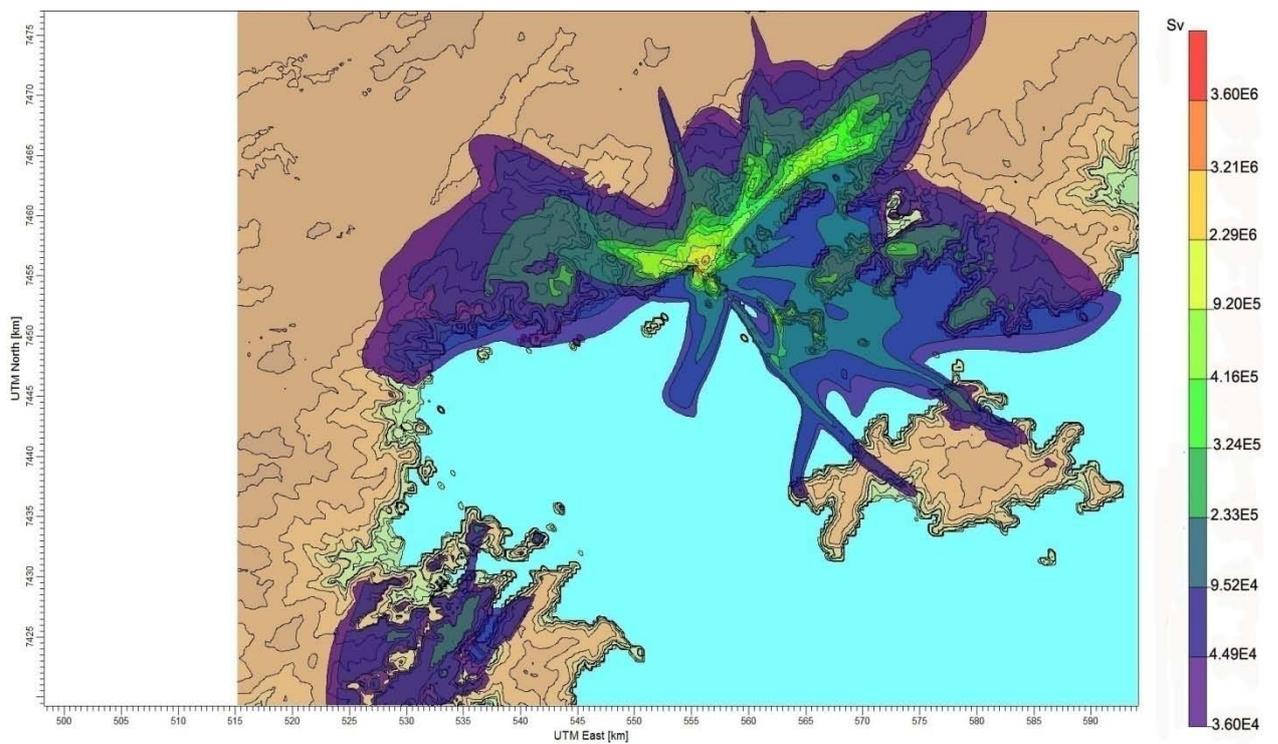


Fig 62 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

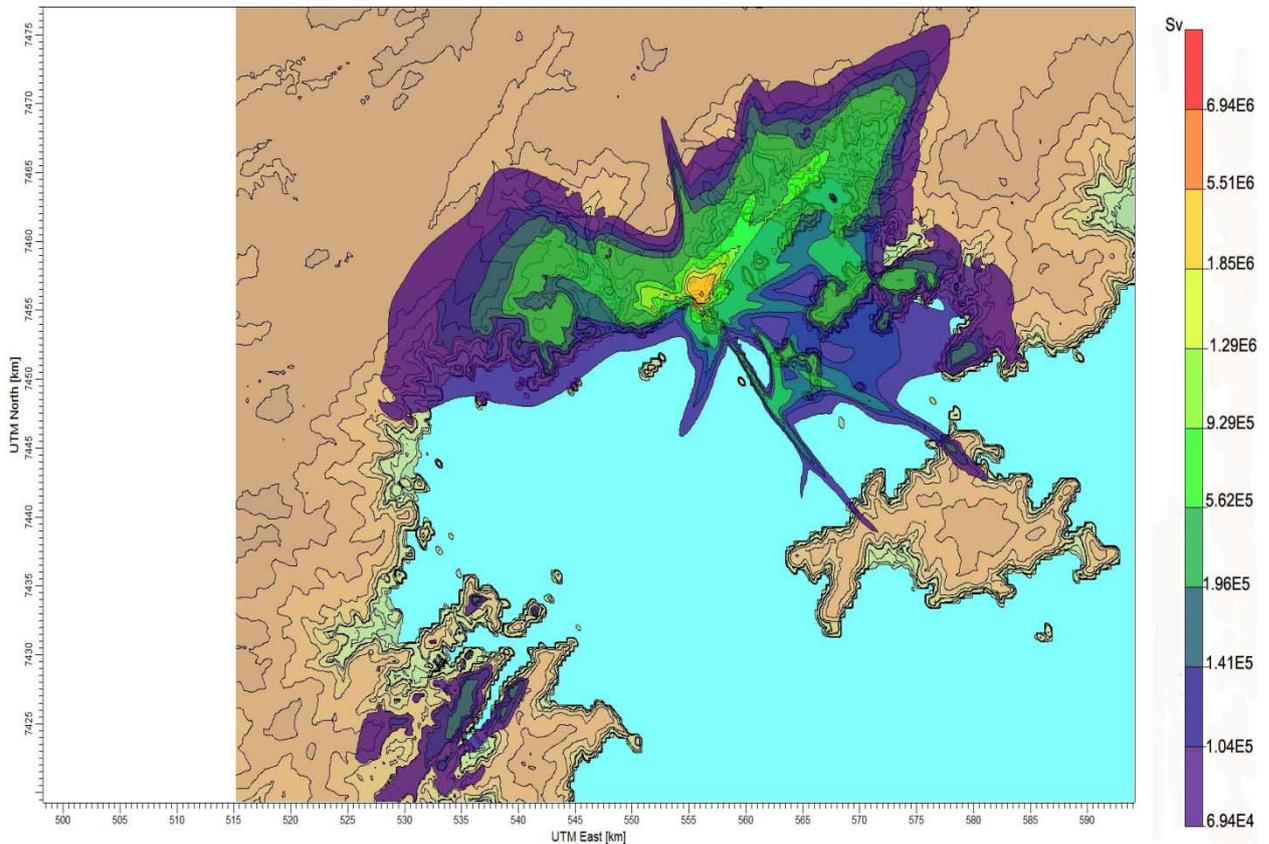


Fig 63 – Dose para tireoide referente a 96 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

- As Figuras 64 a 67 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 72 horas.

Na Figura 64 para 1 hora de exposição, as doses para este período são de  $3,91 \times 10^4$  a  $3,84 \times 10^5$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $8,59 \times 10^3$  a  $1,81 \times 10^4$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,24 \times 10^4$  a  $3,91 \times 10^4$  Sv. Na região do centro de Angra que está a 20 km da central nuclear (região leste à usina), as doses apresentam valores de  $1,24 \times 10^4$  a  $3,91 \times 10^4$  Sv. Na região da Ilha Grande, a dose se encontra entre os valores de  $8,59 \times 10^3$  a  $1,81 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $4,85 \times 10^3$  Sv tanto para região de Conceição de Jacaréi quanto para a região de Paraty.

Na *Figura 65* para 3 horas de exposição, as doses para este período são de  $5,78 \times 10^4$  a  $5,72 \times 10^5$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,77 \times 10^4$  a  $4,64 \times 10^4$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $2,92 \times 10^4$  a  $5,78 \times 10^4$  Sv. Na região do centro de Angra as doses apresentam valores de  $1,77 \times 10^4$  a  $5,78 \times 10^4$  Sv. Na região da Ilha Grande, a dose se encontra entre os valores de  $6,70 \times 10^3$  a  $1,77 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $6,70 \times 10^3$  Sv tanto para região de Conceição de Jacareí quanto para a região de Paraty.

Na *Figura 66* para 24 horas de exposição, as doses para este período são de  $4,76 \times 10^4$  a  $1,37 \times 10^6$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $2,47 \times 10^4$  a  $4,76 \times 10^4$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $4,76 \times 10^4$  a  $1,39 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra as doses apresentam valores de  $2,47 \times 10^4$  a  $4,76 \times 10^4$  Sv. Na região da Ilha Grande, a dose se encontra entre os valores de  $1,59 \times 10^4$  a  $4,76 \times 10^4$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $1,59 \times 10^4$  Sv tanto para região de Conceição de Jacareí quanto para a região de Paraty.

Na *Figura 67* para 144 horas de exposição, as doses para este período são de  $2,83 \times 10^5$  a  $2,75 \times 10^6$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $9,07 \times 10^4$  a  $1,46 \times 10^5$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,46 \times 10^5$  a  $2,83 \times 10^5$  Sv. Na região do centro de Angra as doses apresentam valores de  $3,63 \times 10^4$  a  $9,07 \times 10^4$  Sv. Na região da Ilha Grande, a dose se encontra com o valor mínimo modelado de  $3,63 \times 10^4$  Sv, bem como na região de Conceição de Jacareí e na região de Paraty.

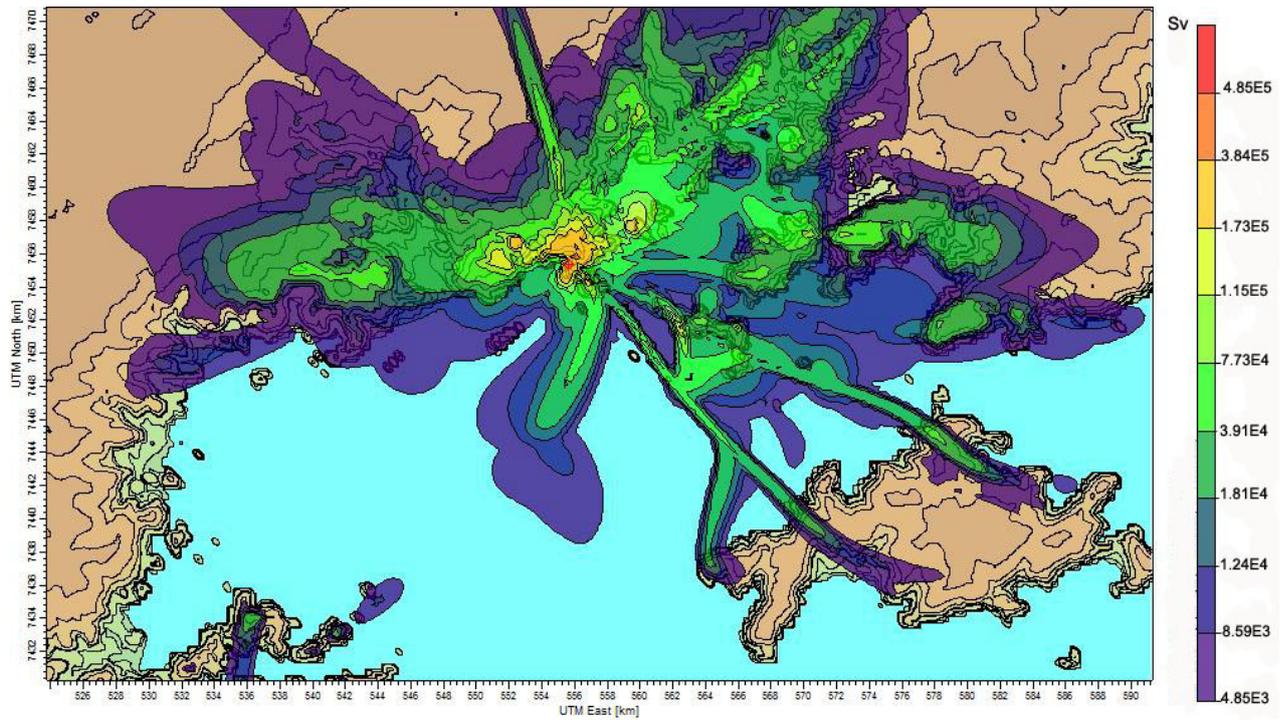


Fig 64 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 72 horas de liberação

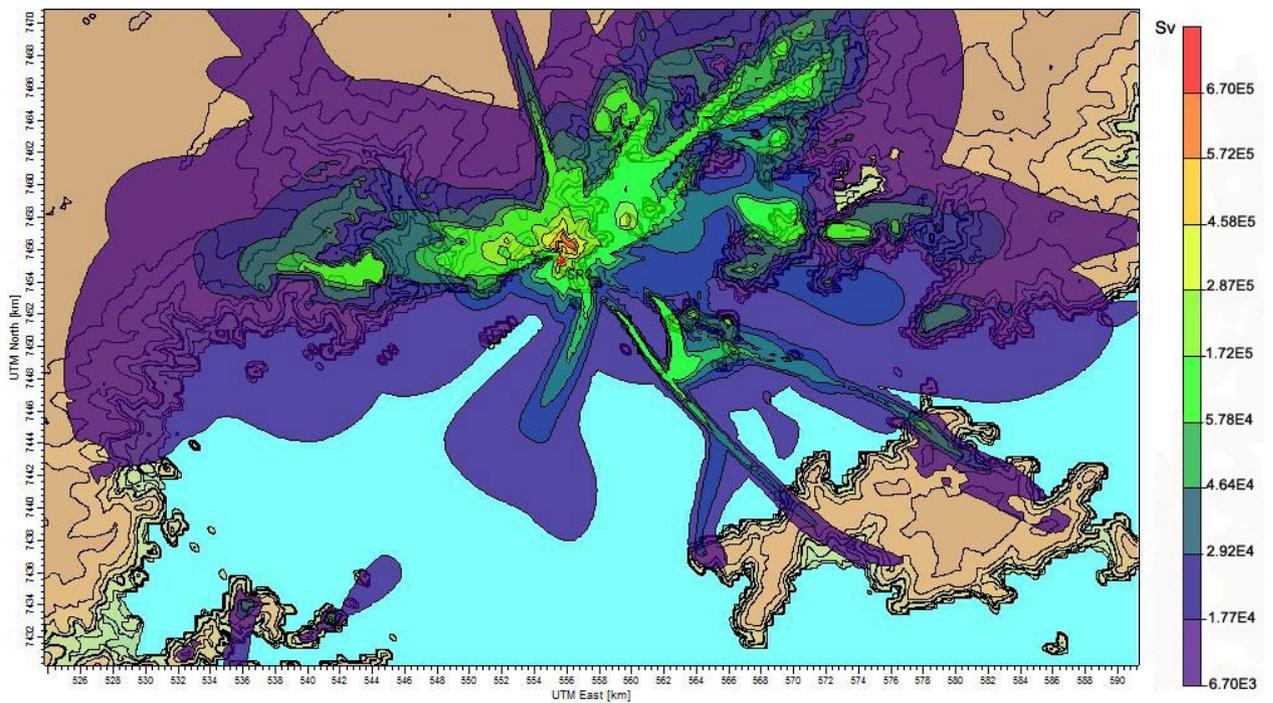


Fig 65 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

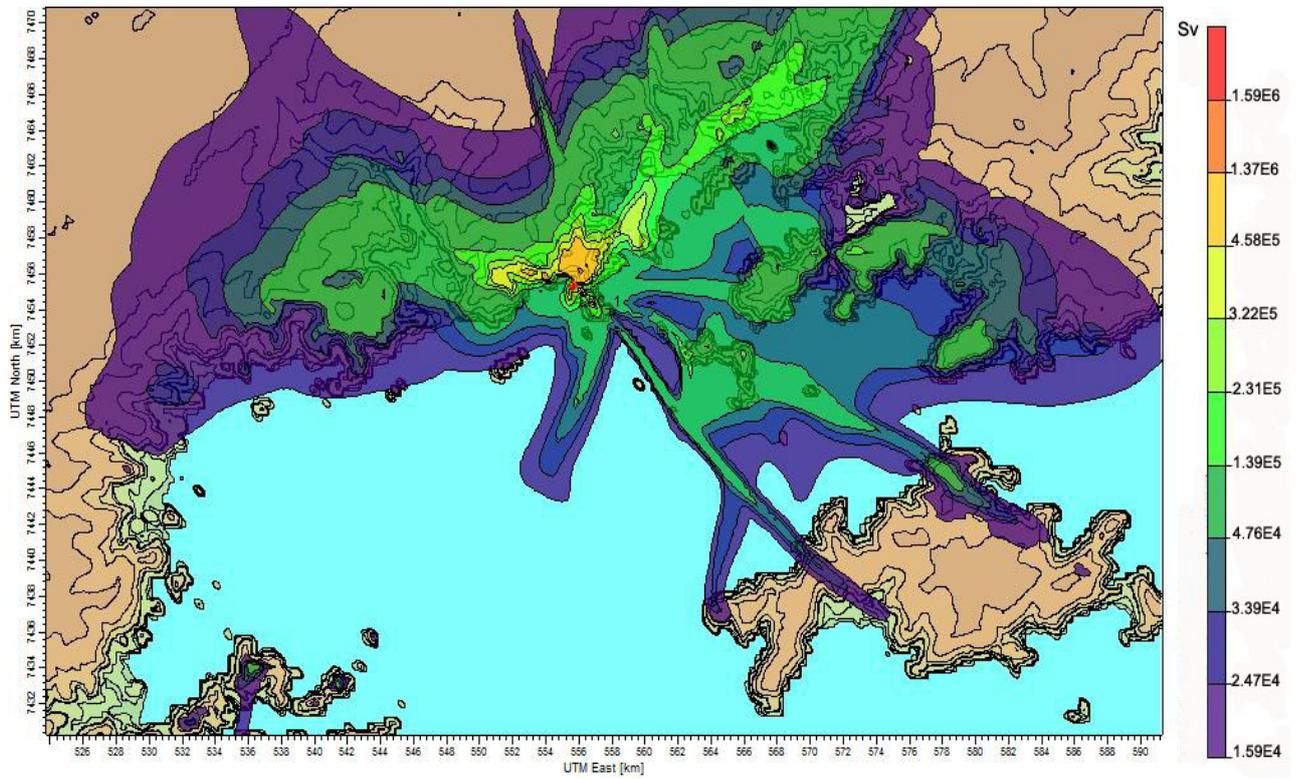


Fig 66 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

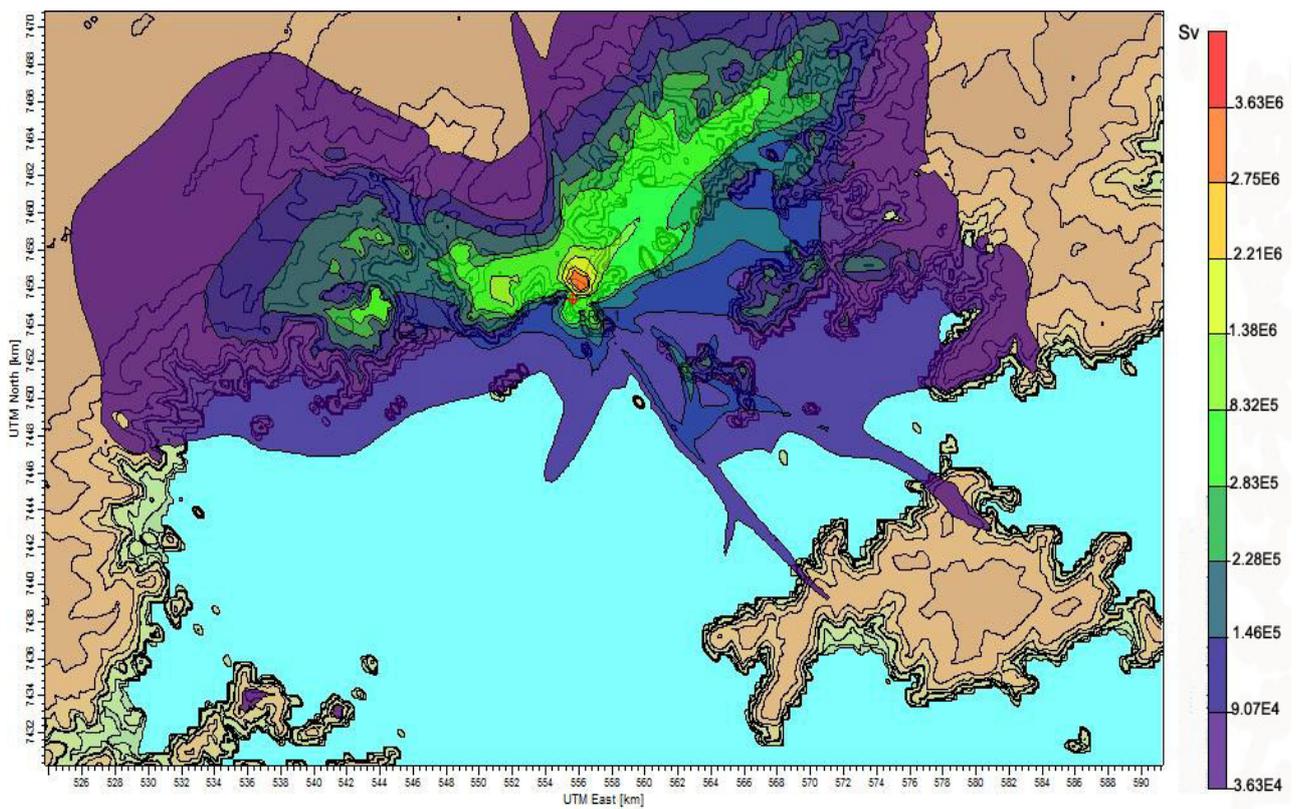


Fig 67 – Dose para tireoide referente a 144 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

### 7.2.2. liberação de 1% de $^{131}\text{I}$

- As *Figuras 68 a 70* representam as doses para tireoide para uma liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 12 horas. As doses se baseiam nas médias das concentrações desde seu ponto máximo (ponto de emissão) até o ponto mínimo modelado. Neste cenário de avaliação, 1% do núcleo corresponde a  $7,44 \times 10^{15}$  Bq.

Na *Figura 68* para 1 hora de exposição, as doses apresentam valores para este período de  $5,84 \times 10^1$  a  $9,56 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,45 \times 10^1$  a  $5,84 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,45 \times 10^1$  a  $9,65 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,07 \times 10^1$  Sv cujo deslocamento é de 15 km.

Na *Figura 69* para 3 horas de exposição, as doses apresentam valores para este período de  $6,12 \times 10^1$  a  $1,72 \times 10^3$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $3,26 \times 10^1$  a  $6,12 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $3,26 \times 10^1$  a  $6,12 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $2,18 \times 10^1$  Sv cujo deslocamento é de 15 km.

Na *Figura 70* para 24 horas de exposição, as doses apresentam valores para este período de  $1,86 \times 10^2$  a  $3,21 \times 10^3$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $4,41 \times 10^1$  a  $3,23 \times 10^2$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $9,43 \times 10^1$  a  $1,86 \times 10^2$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $4,41 \times 10^1$  Sv cujo deslocamento é de 15 km.

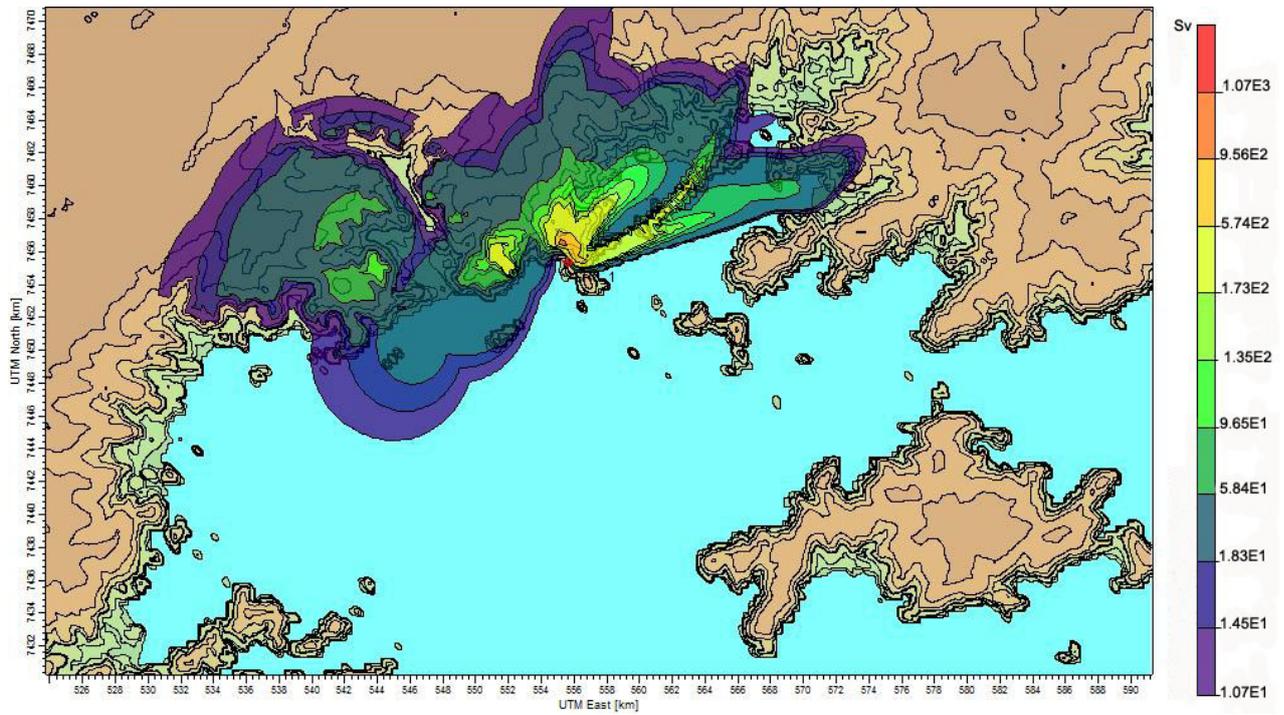


Fig 68 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 12 horas de liberação

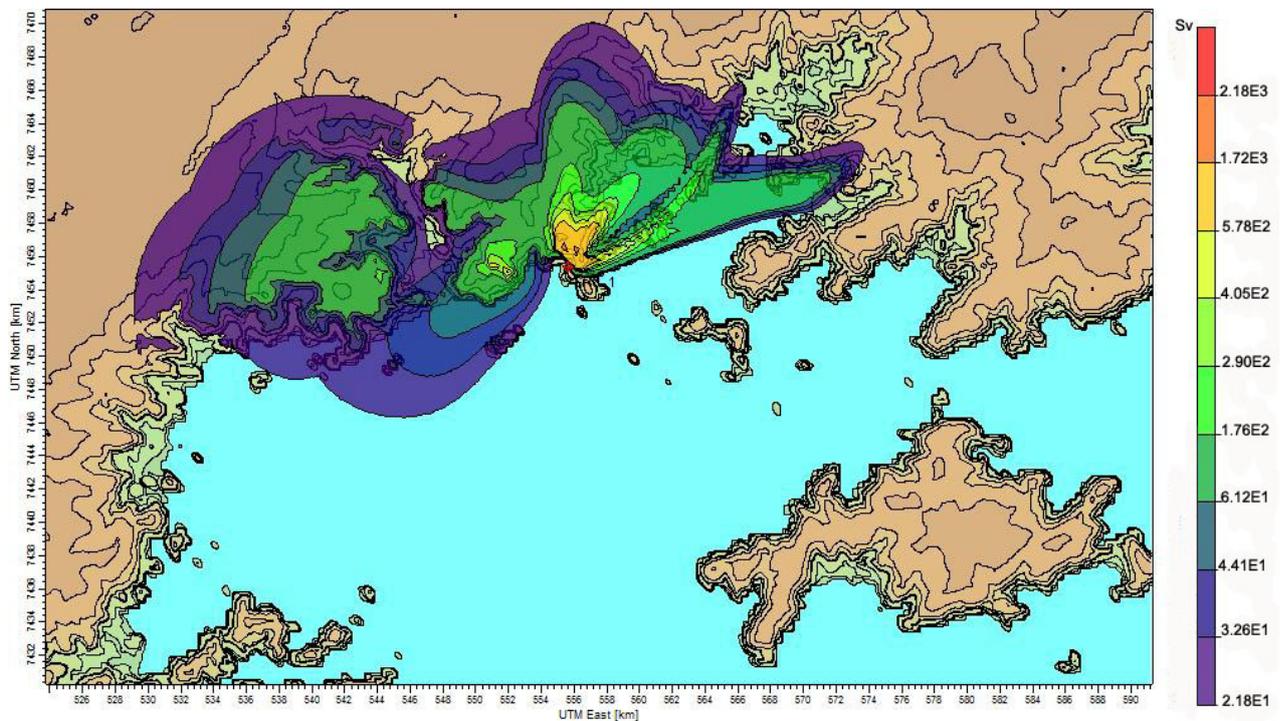


Fig 69 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação

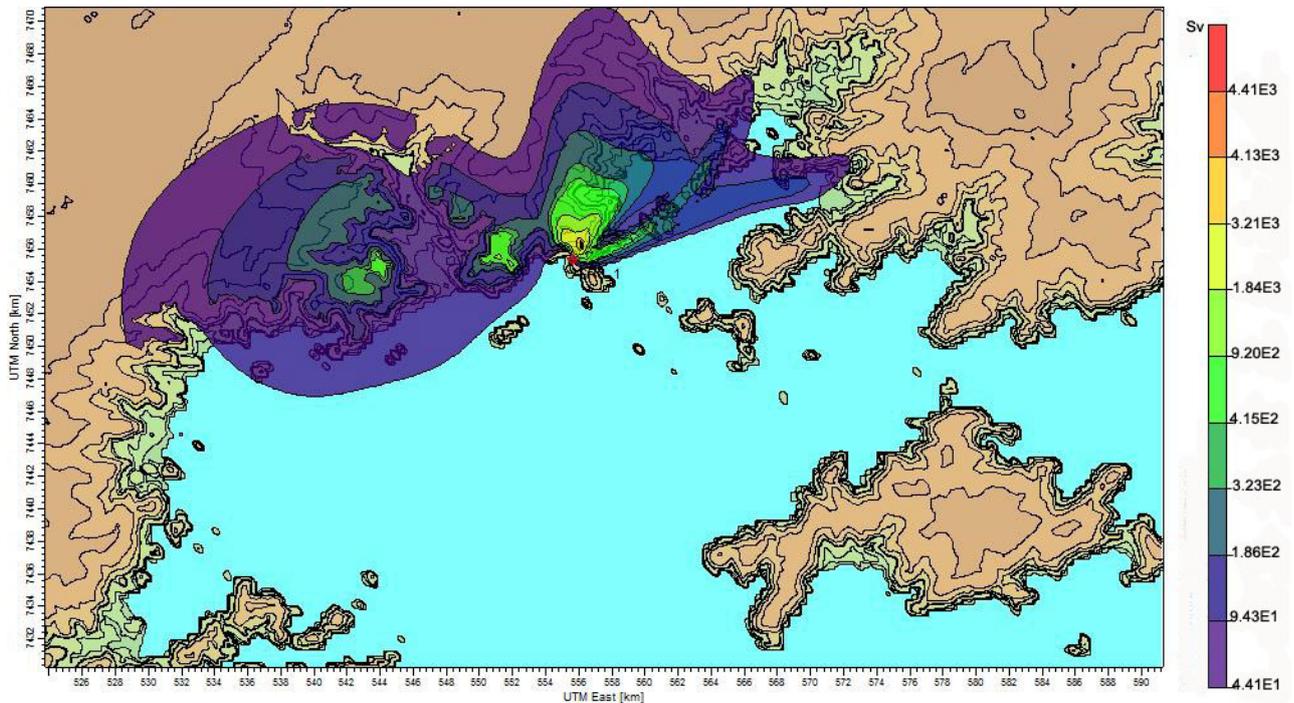


Fig 70 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 12 horas de liberação

- As Figuras 71 a 74 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 24 horas.

Na Figura 71 para 1 hora de exposição, as doses apresentam valores para este período de  $1,98 \times 10^1$  a  $1,91 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $6,49$  a  $1,60 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $6,49$  a  $1,98 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $2,67$  Sv cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na Figura 72 para 3 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $5,18 \times 10^1$  a  $5,16 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,17 \times 10^1$  a  $2,32 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,17 \times 10^1$  a  $4,04 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $5,44$  Sv cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na Figura 73 para 24 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $4,30 \times 10^1$  a  $9,16 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $2,01 \times 10^1$  a  $4,30 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade

as doses são de  $2,01 \times 10^1$  a  $4,30 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,10 \times 10^1$  Sv cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na *Figura 74* para 48 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $9,34 \times 10^1$  a  $9,16 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $2,93 \times 10^1$  a  $9,34 \times 10^1$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $2,93 \times 10^1$  a  $7,51 \times 10^1$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,11 \times 10^1$  Sv cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

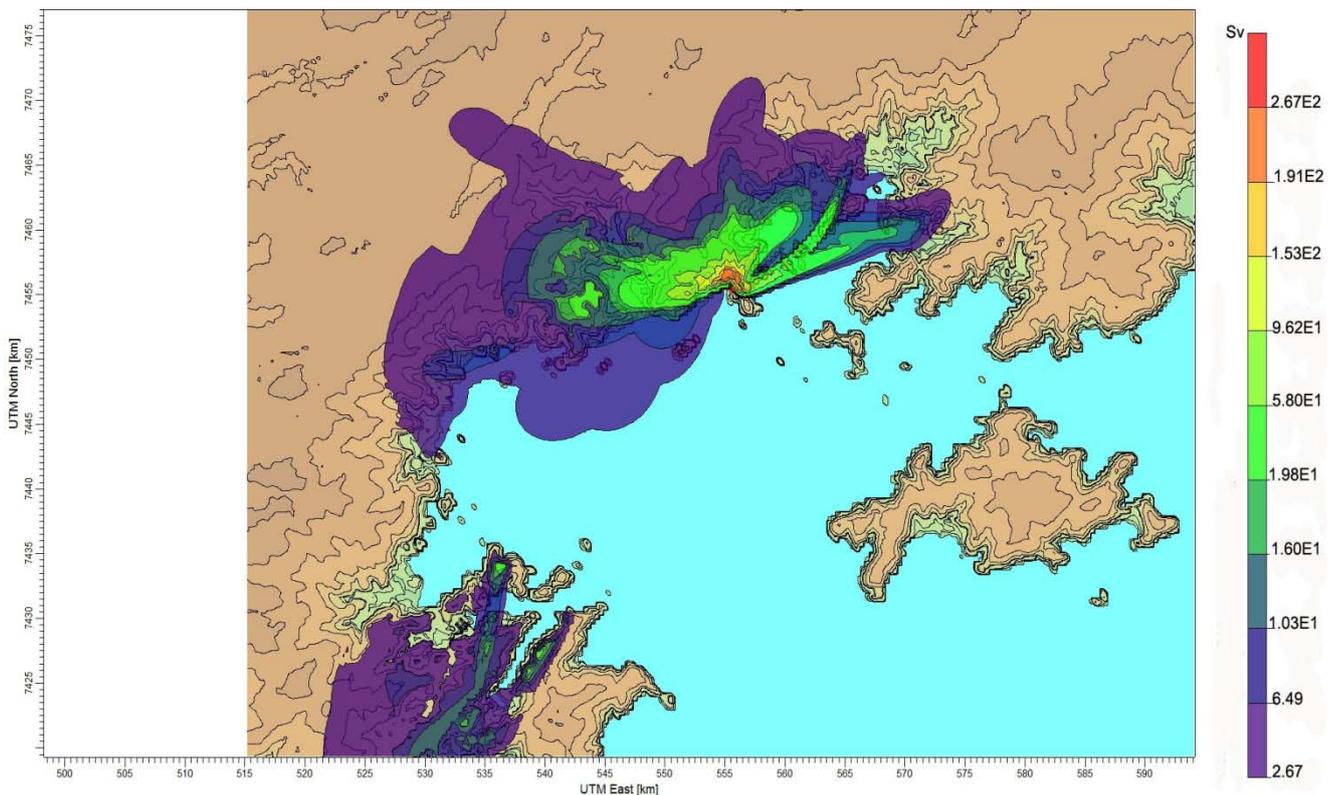


Fig 71 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 24 horas de liberação

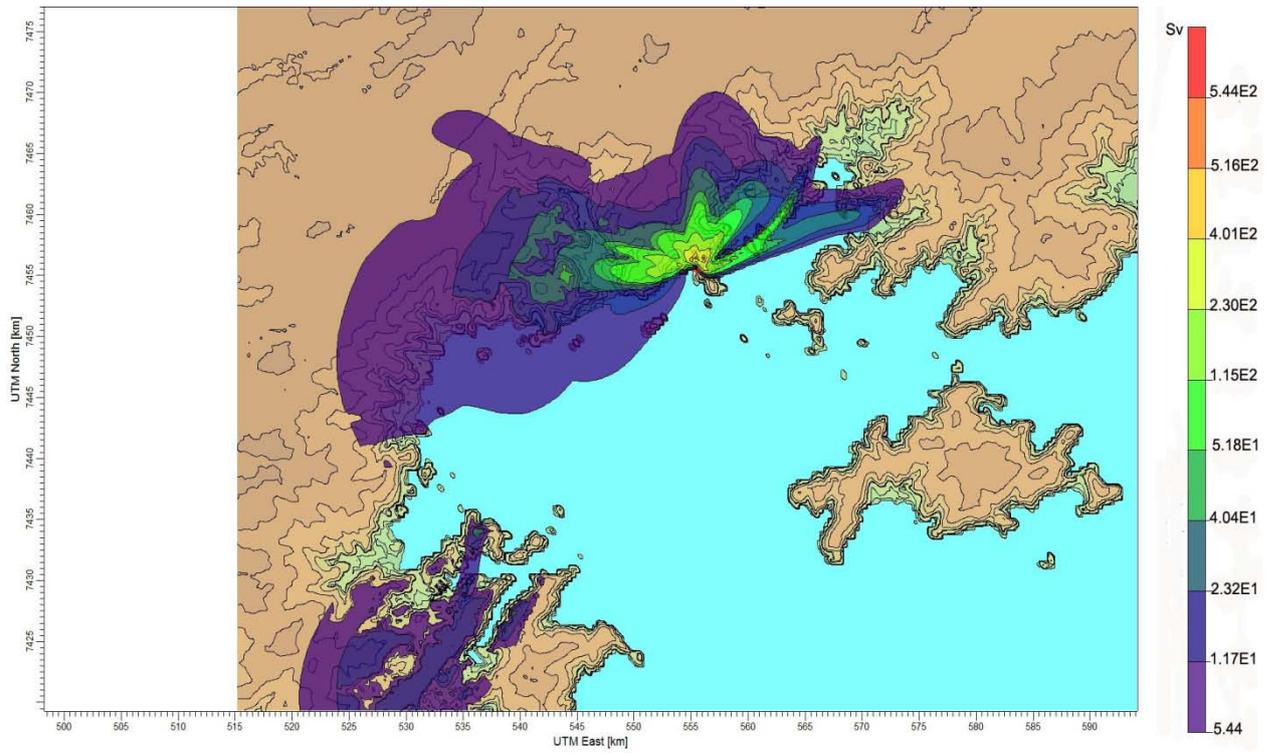


Fig 72 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

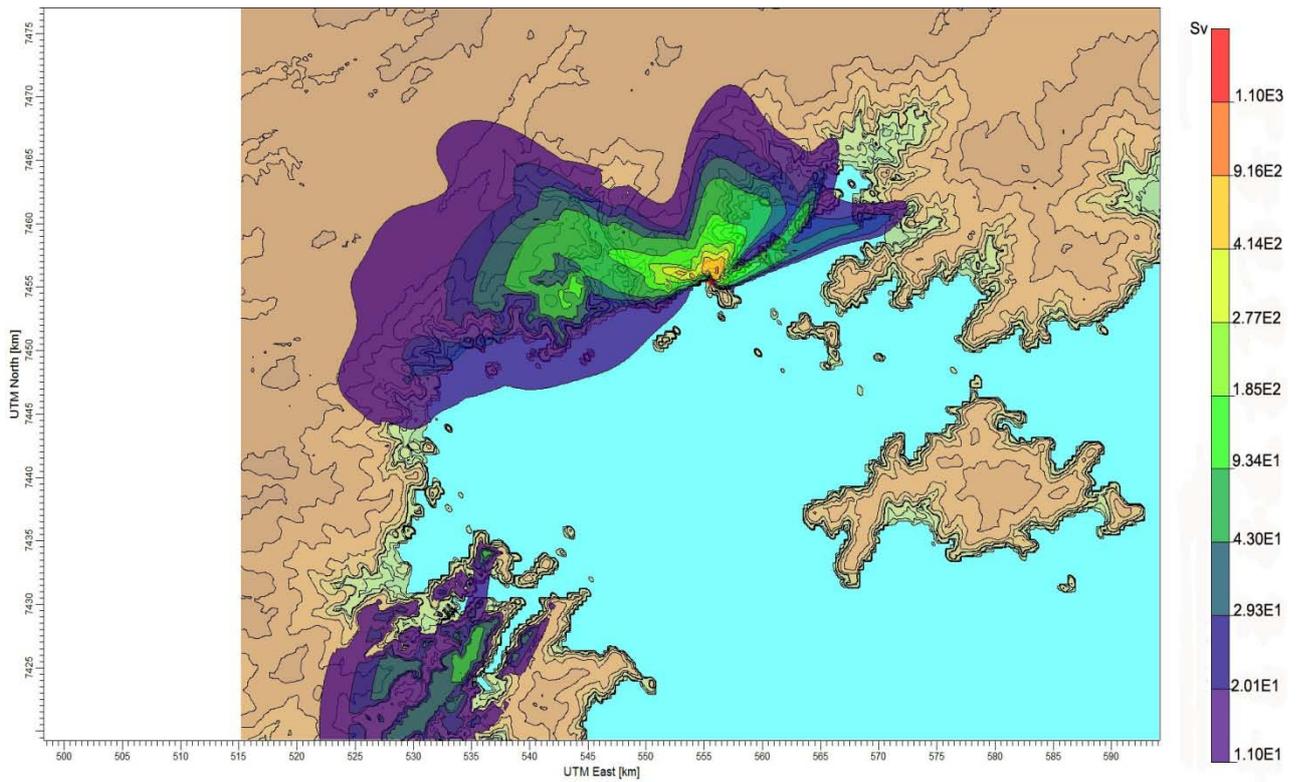


Fig 73 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

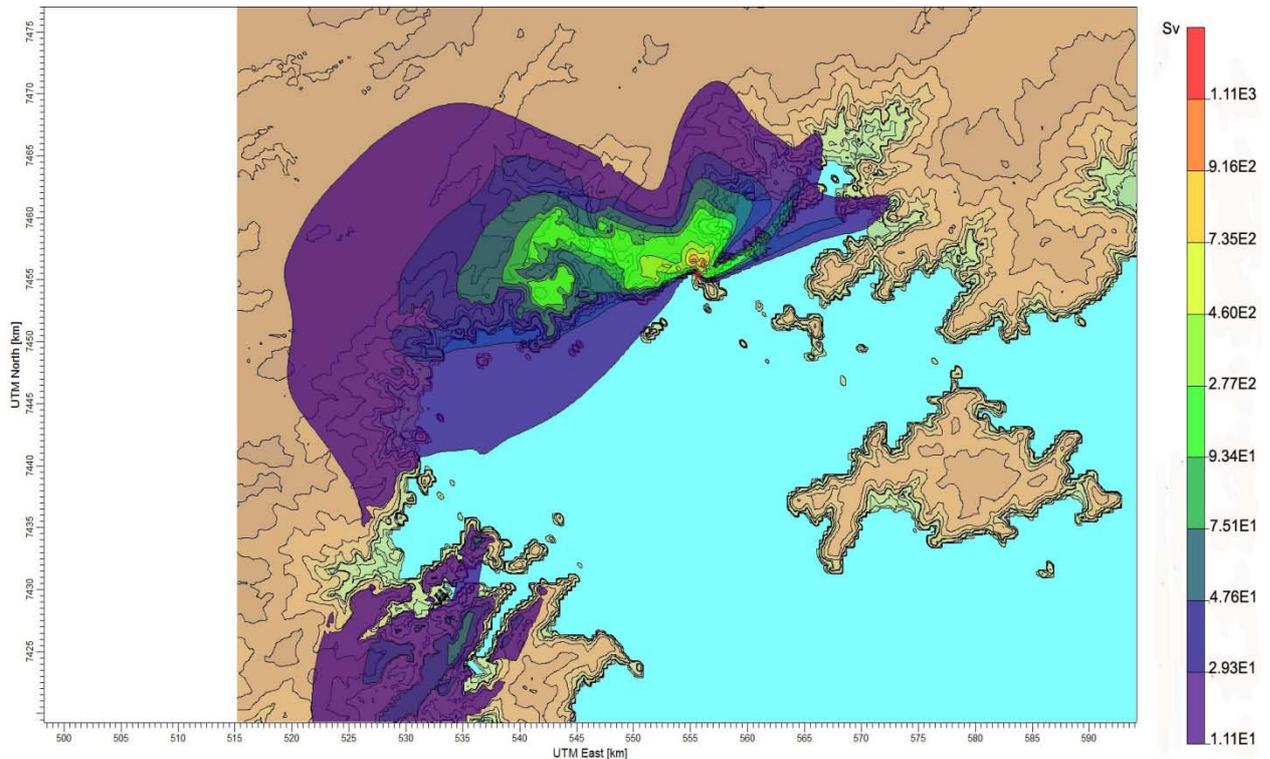


Fig 74 – Dose para tireoide referente a 48 horas de exposição no cenário de 24 horas de liberação

- As Figuras 75 a 78 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 48 horas.

Na Figura 75 para 1 hora de exposição, as doses apresentam valores de  $1,73 \times 10^1$  a  $9,56 \times 10^1$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,85$  a  $5,86$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,85$  a  $9,67$  Sv. Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $1,85$  a  $9,67$  Sv. Na região da Ilha Grande as doses variam de  $1,47$  a  $5,86$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,10$  Sv cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na Figura 76 para 3 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $5,38$  a  $1,14 \times 10^2$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $2,52$  a  $5,38$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $5,38$  a  $1,17 \times 10^1$  Sv. Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $5,38$  a  $1,17 \times 10^1$  Sv. Na região da Ilha Grande as doses variam de  $2,52$  a  $5,38$  Sv. A

pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $1,41 \text{ Sv}$  cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na *Figura 77* para 24 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $2,33 \times 10^1$  a  $3,21 \times 10^2 \text{ Sv}$  tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $4,49$  a  $9,52 \text{ Sv}$ . Na região do Frade as doses são de  $9,52$  a  $3,24 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $4,49$  a  $9,52 \text{ Sv}$ . Na região da Ilha Grande a dose apresenta valor de  $4,49 \text{ Sv}$ . A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta dose mínima modelada de  $3,60 \text{ Sv}$  cujo deslocamento é de 30 km na região de Paraty.

Na *Figura 78* para 96 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $1,96 \times 10^1$  a  $5,51 \times 10^2 \text{ Sv}$  tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,04 \times 10^1$  a  $1,96 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Na região do Frade as doses são de  $1,96 \times 10^1$  a  $5,62 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $1,04 \times 10^1$  a  $1,96 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Na região da Ilha Grande a dose apresenta valor de  $6,94 \text{ Sv}$  que representa o valor da dose mínima modelada da pluma de  $^{131}\text{I}$  alcançando também a região de Paraty cuja distância é de 30 km.

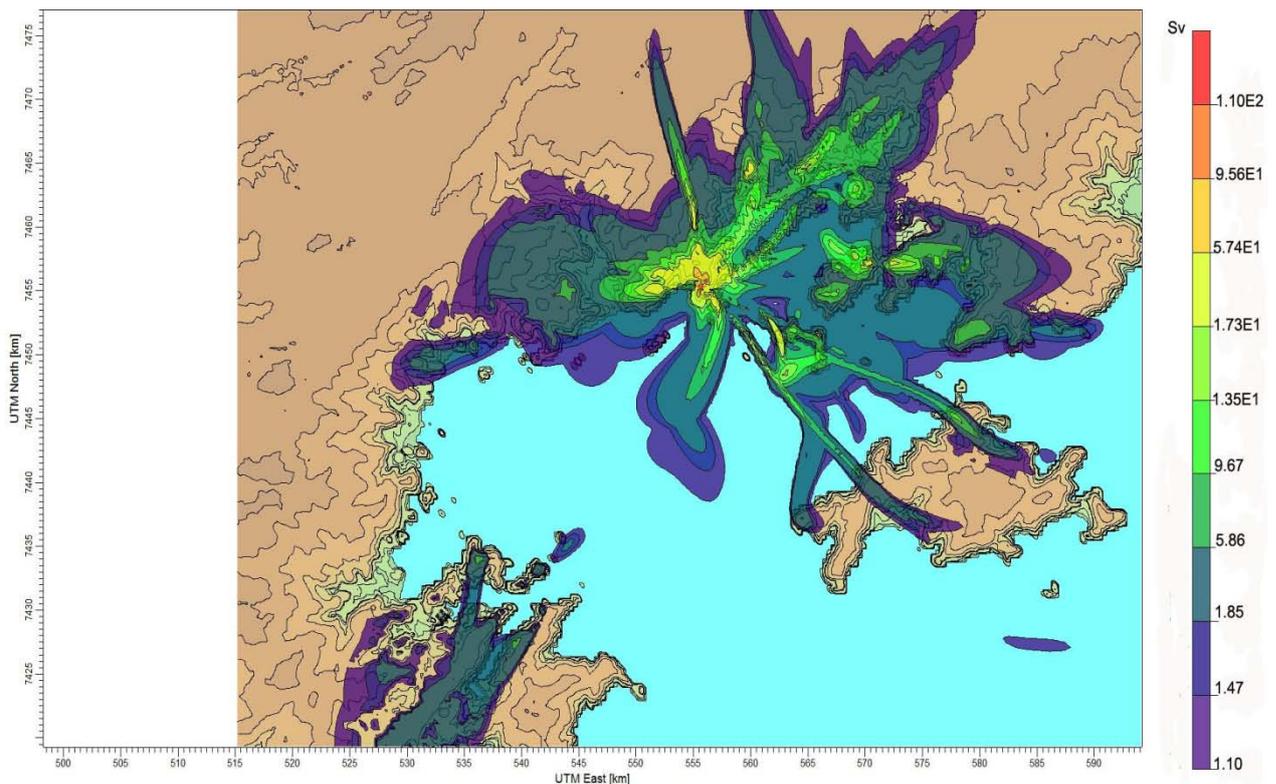


Fig 75 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 48 horas de liberação

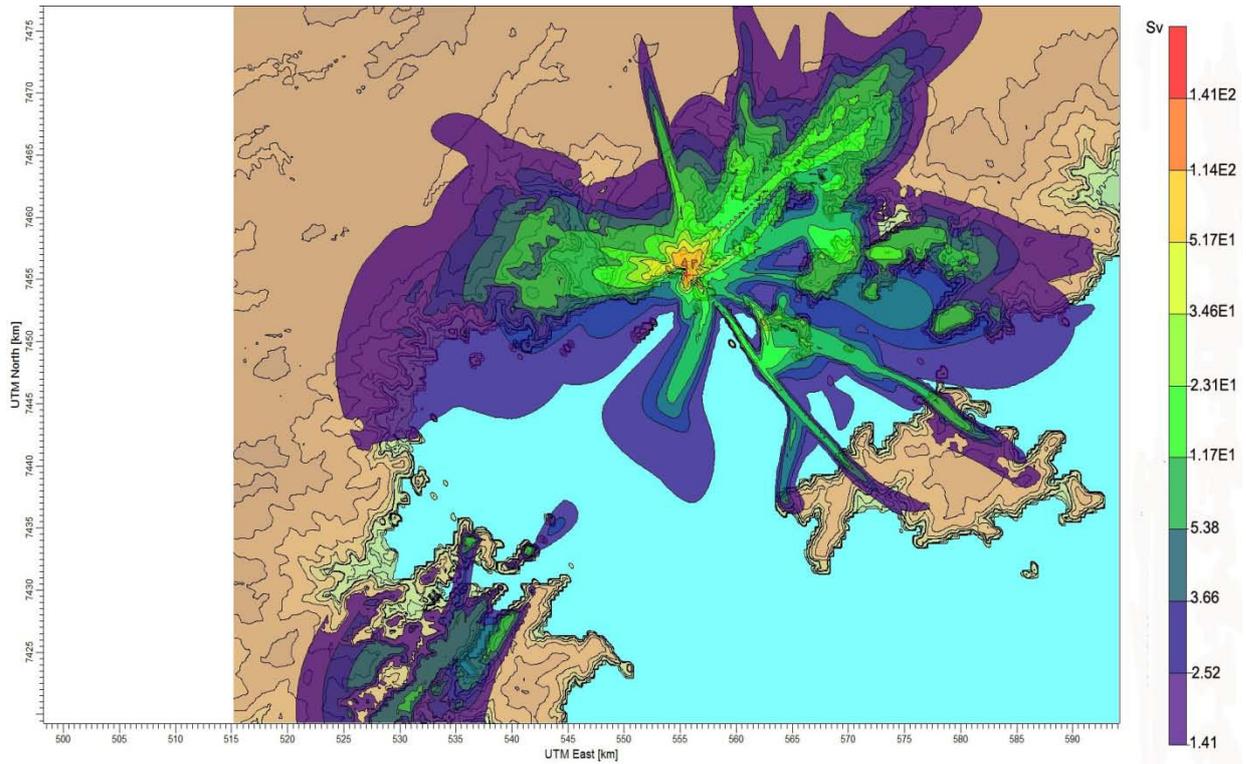


Fig 76 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

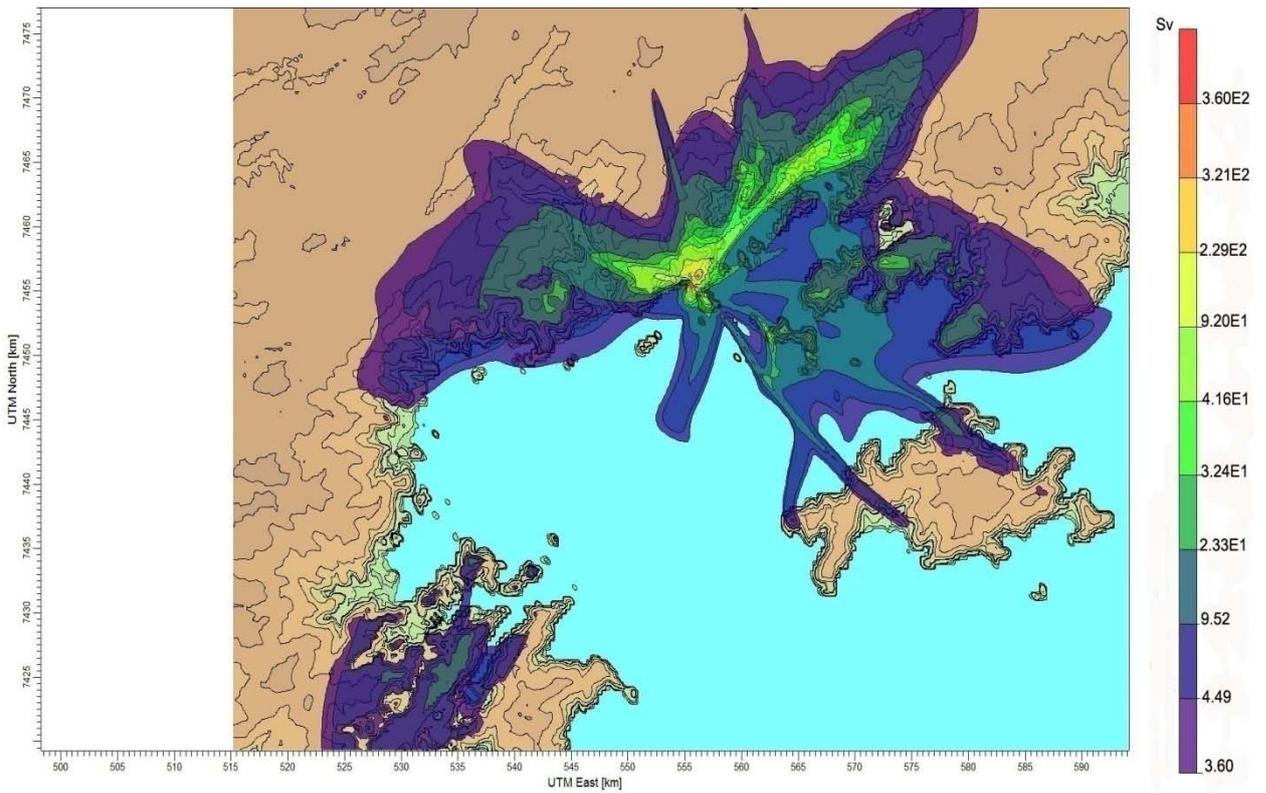


Fig 77 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

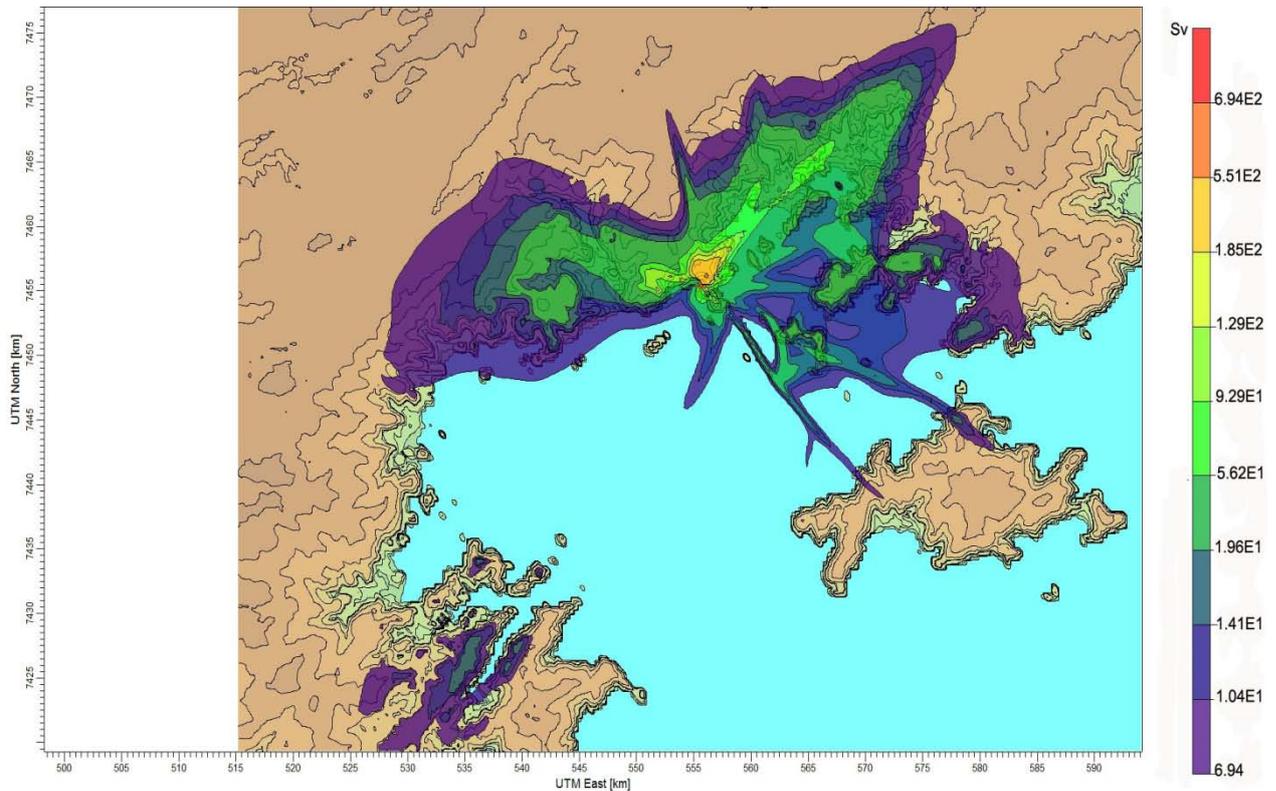


Fig 78 – Dose para tireoide referente a 96 horas de exposição no cenário de 48 horas de liberação

- As Figuras 79 a 82 representam as doses para a tireoide para liberação de todo  $^{131}\text{I}$  em 72 horas.

Na Figura 79 para 1 hora de exposição, as doses apresentam valores de  $1,81$  a  $3,84 \times 10^1$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $8,59 \times 10^{-1}$  a  $1,81$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $1,81$  a  $3,91$  Sv. Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $8,59 \times 10^{-1}$  a  $1,81$  Sv. Na região da Ilha Grande as doses compreendem valores de  $1,24$  a  $1,81$  Sv. A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $4,85 \times 10^{-1}$  Sv alcançando a região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na Figura 80 para 3 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $4,64$  a  $5,72 \times 10^1$  Sv tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $1,77$  a  $2,92$  Sv. Na região do Frade as doses são de  $2,92$  a  $5,78$  Sv. Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $2,92$  a  $4,64$  Sv. Na região da Ilha Grande as doses compreendem valores de  $1,77$  a  $2,92$  Sv. A

pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $6,70 \times 10^{-1} \text{ Sv}$  alcançando a região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na *Figura 81* para 24 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $4,76$  a  $1,37 \times 10^2 \text{ Sv}$  tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $2,47$  a  $4,76 \text{ Sv}$ . Na região do Frade as doses são de  $4,76$  a  $1,39 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $2,47$  a  $4,76 \text{ Sv}$ . Na região da Ilha Grande as doses compreendem valores de  $2,47$  a  $4,76 \text{ Sv}$ . A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $1,59 \text{ Sv}$  alcançando a região de Paraty cuja distância é de 30 km.

Na *Figura 82* para 144 horas de exposição, as doses apresentam valores de  $2,83 \times 10^1$  a  $2,75 \times 10^2 \text{ Sv}$  tanto nas cercanias da usina bem como na praia Brava. Na região de Mambucaba as doses variam de  $9,07$  a  $1,46 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Na região do Frade as doses são de  $2,28 \times 10^1$  a  $2,83 \times 10^1 \text{ Sv}$ . Para região do centro de Angra as doses compreendem valores de  $3,63$  a  $9,07 \text{ Sv}$ . A pluma de  $^{131}\text{I}$  apresenta valor mínimo modelado de  $3,63 \text{ Sv}$  alcançando a região da Ilha Grande, que dista 25 km do ponto de emissão e da região de Paraty cuja distância é de 30 km.

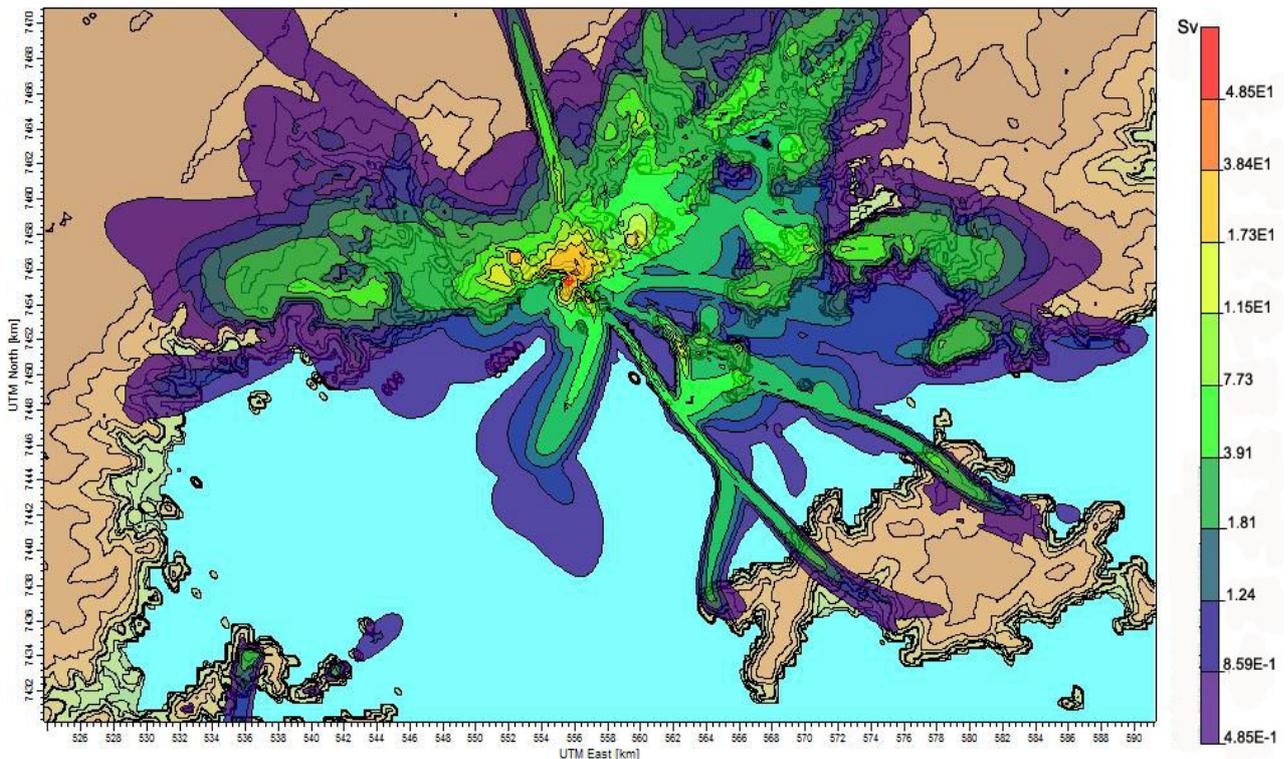


Fig 79 – Dose para tireoide referente a 1 hora de exposição no cenário de 72 horas de liberação

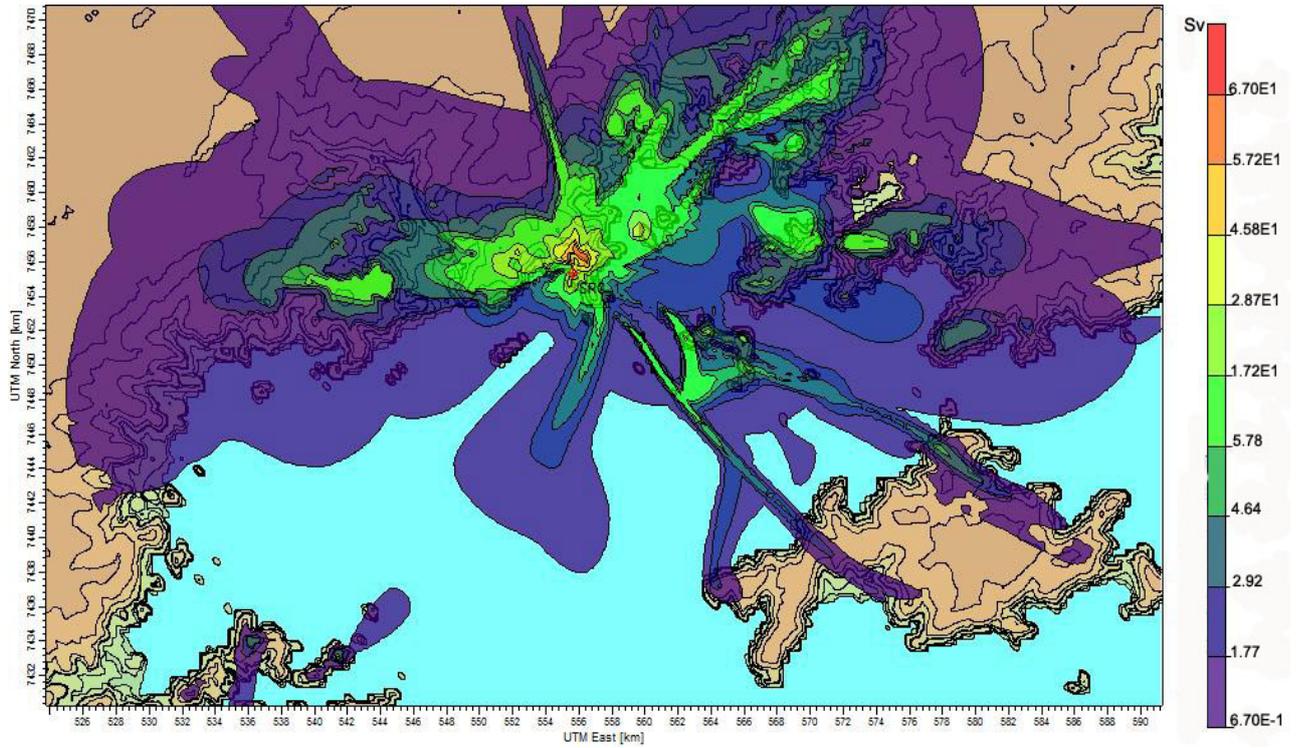


Fig 80 – Dose para tireoide referente a 3 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

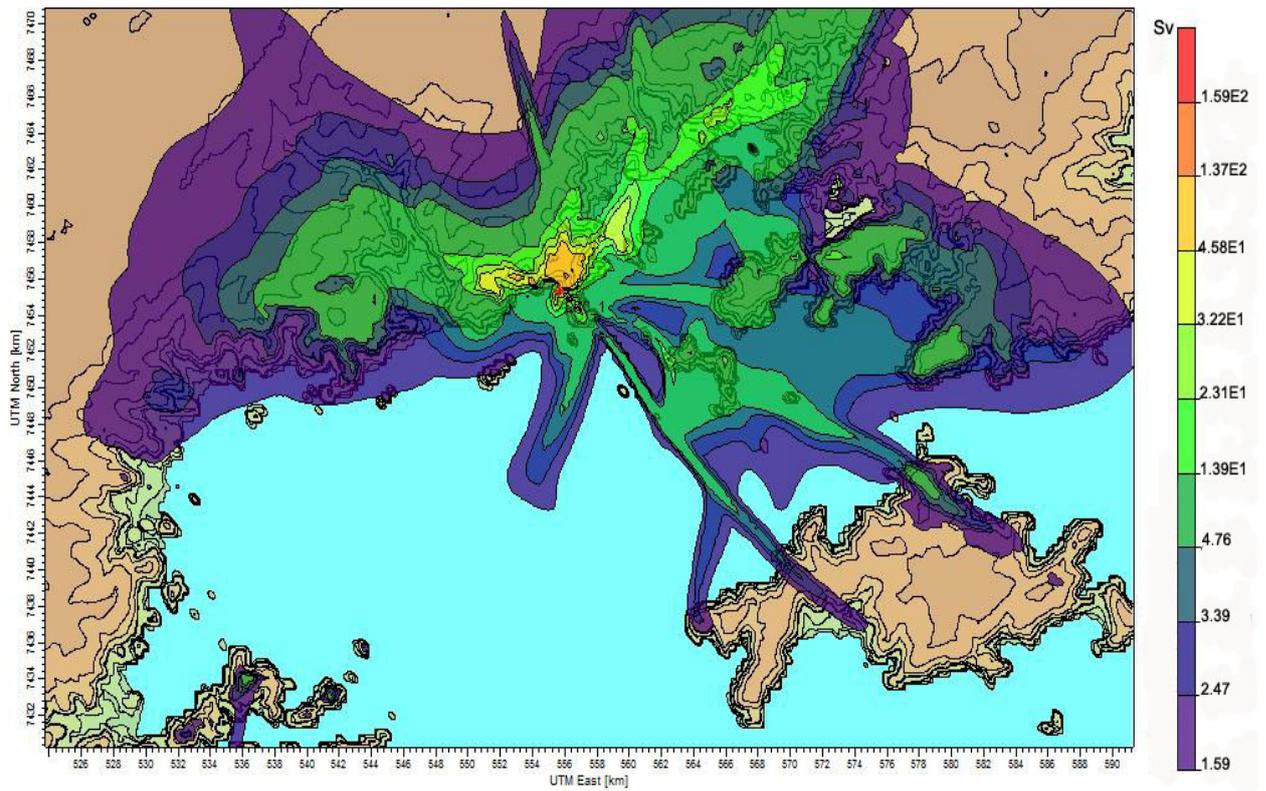


Fig 81 – Dose para tireoide referente a 24 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

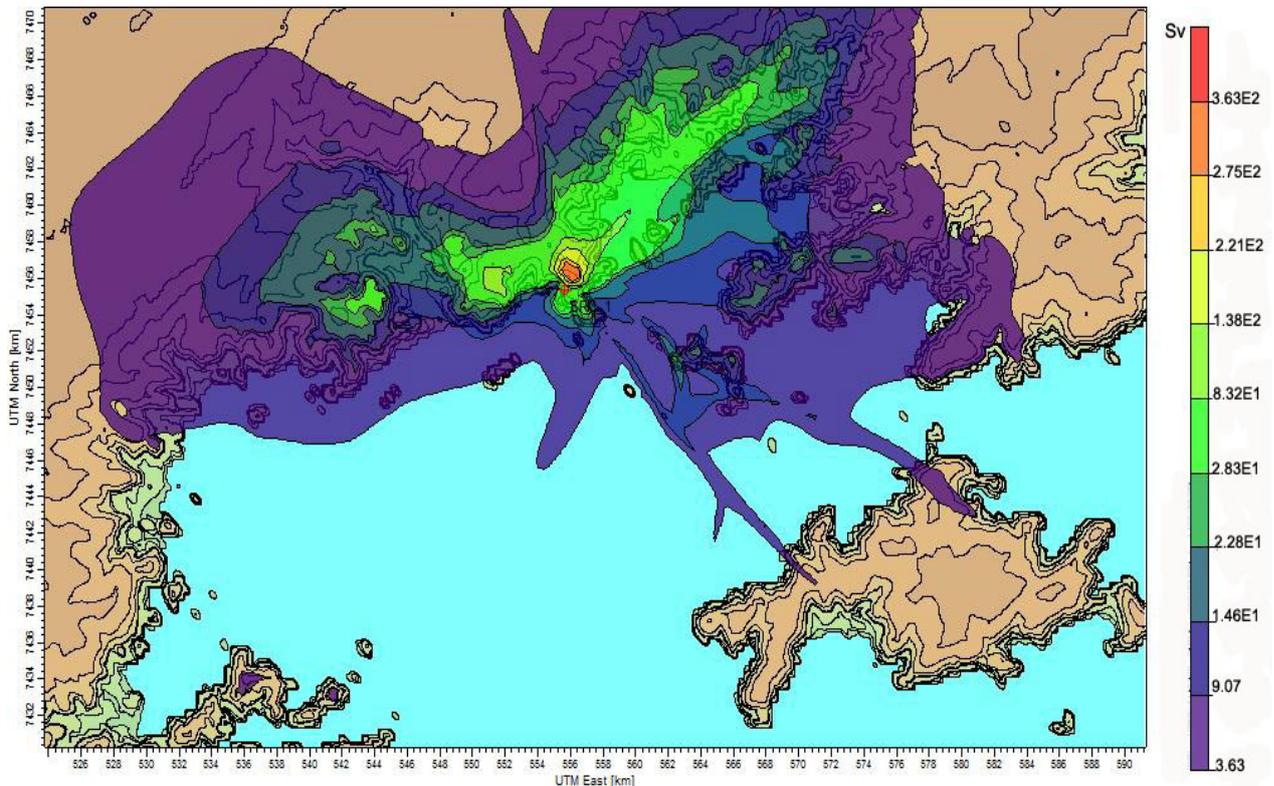


Fig 82 – Dose para tireoide referente a 144 horas de exposição no cenário de 72 horas de liberação

### 7.3 ZONAS DE PLANEJAMENTO DE EMERGÊNCIA – ZPE

Conforme a resolução CNEN n° 09/69 , disponível em <http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm168.pdf> definiram-se critérios básicos para a instalação de reatores nucleares com o estabelecimento de distâncias de segurança. Tais fundamentos se basearam na obrigação moral de prevenir danos às pessoas que vivem além dos limites circunvizinhos a usinas nucleares, principal motivo que levou à adoção dos seguintes critérios: *área de exclusão, zona de baixa população e distâncias do centro populacional*.

- **Área da Exclusão:** Área situada no entorno do reator, cujo acesso está sob controle e autorização do pessoal de operação da usina nuclear. Esta área poderá ser atravessada por ferrovia, rodovia ou canal, desde que não interfiram com as operações normais da instalação, e, desde que, medidas apropriadas e efetivas, possam ser tomadas para controlar o tráfego nestas vias, em caso de acidente, com o fito de garantir a saúde e

a segurança públicas. Normalmente, será proibida a existência de residências dentro da área de exclusão. Será prevista, para moradores eventuais, em caso de acidente, sua remoção imediata.

Para a área de exclusão exigisse que um indivíduo situado em qualquer ponto de seu entorno por 2 horas imediatamente após a liberação dos materiais radioativos não deverá receber uma dose de radiação no corpo todo excedendo 0,25 Sv (dose externa), e dose total de radiação por inalação de  $^{131}\text{I}$  na tireoide não pode exceder de 300 r.e.m. (3 Sv) para um indivíduo situado em um ponto sobre a linha limítrofe externa.

- **Zona de Baixa População:** Espaço que circunda a área de exclusão e que pode conter residentes, de modo que o número total e a densidade populacional é tal que há uma razoável possibilidade de que medidas apropriadas de proteção possam ser tomadas no interesse desta população, na eventualidade de um acidente grave. Baixa população corresponde a um número total e a uma distribuição dos habitantes, conjugados, dentro da área considerada, tal que, dadas as vias de comunicação existentes na mesma, seja possível planejar e executar sua evacuação, ou instruí-los a tomar abrigo, dentro de um certo intervalo de tempo a partir do início de um acidente grave. Para esta zona, exige-se que um indivíduo situado sobre um ponto de sua linha limítrofe, durante todo o período de passagem da nuvem radiativa resultante da liberação de produtos de fissão devido ao acidente máximo postulado não deverá receber uma dose que exceda 0,25 Sv no corpo (dose externa), ou 3 Sv na tireoide, *dose total de radiação por inalação*.
- **Distâncias do Centro de População:** É a distância do reator até os limites de um centro densamente povoado, contendo mais que 25.000 residentes aproximadamente. Esta distância seria de pelo menos de 1 a 1/3 vezes a distância de baixa população. Tendo em vista a dose total integrada para toda a população, no caso de grandes cidades, uma distância maior pode ser necessária.

Fundamentados em tais critérios e utilizando dados sobre modelos de difusão da radiação na atmosfera, foram calculadas as distâncias de segurança e delimitadas as zonas de exclusão da CNAAA, cujo modelo do Máximo Acidente Crível e o cálculo de doses provocadas por liberações acidentais postuladas de radioatividade, serviram de base.

De acordo como o PEE/RJ (2008) – *Plano de Emergência Externo do Estado do Rio de Janeiro*, a fim de hierarquizar os riscos e facilitar o planejamento e a implantação de medidas de proteção recomendadas pela CNEN, adotou-se o conceito de ZPE. As zonas atuais foram subdivididas em coroas circulares a partir do centro da unidade I da CNAAA, em raios de 3, 5, 10 e 15 km, conforme a *Figura 83*.

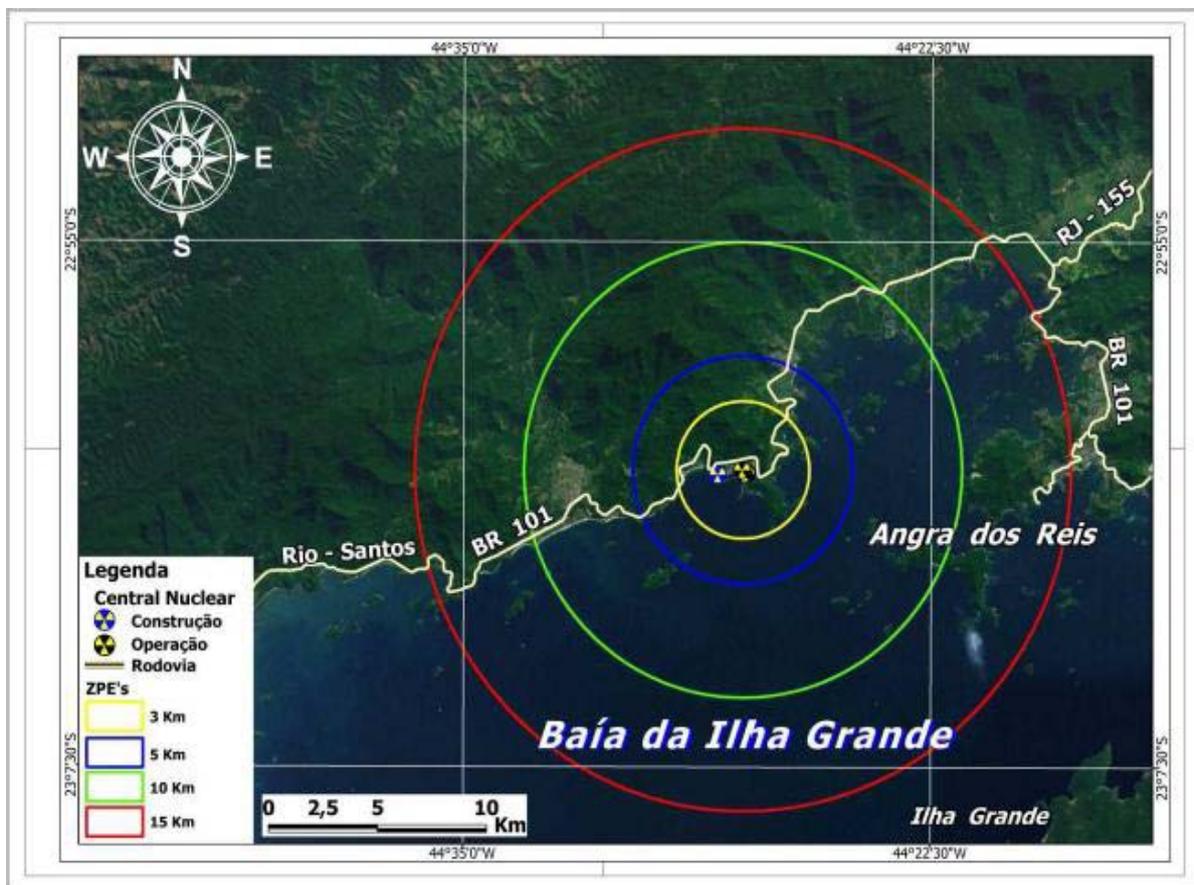


Fig 83 – Zonas de Planejamento de Emergência da CNAAA em Angra dos Reis.

PEE/RJ (2008)

A evacuação preventiva da população constitui uma medida de proteção eficaz até uma distância de 5 km em torno da usina. A partir desta distância, não será obtido qualquer benefício adicional com a evacuação preventiva. Desta forma, para as ZPE 10 e ZPE 15 é preferível recomendar, no curto prazo, que a população se mantenha abrigada. Neste sentido, considerando os raios existentes estão classificados da seguinte maneira:

- ***Zonas de Ações Preventivas:***

*ZPE 3:* Área circunscrita a partir do raio de 3 km, com centro na unidade I da CNAAA, excetuando-se a Área de Propriedade da ELETRONUCLEAR.

*ZPE 5:* Coroa circular, com centro na unidade I da CNAAA, com 5 km de raio externo e 3 km de raio interno. Definido como zona de impacto.

- ***Zonas de Controle Ambiental:***

*ZPE 10:* Coroa circular, com centro na unidade I da CNAAA, com 10 km de raio externo e 5 km de raio interno.

*ZPE 15:* Coroa circular, com centro na unidade I da CNAAA, com 15 km de raio externo e 10 km de raio interno.

- ***Zona de Acompanhamento Ambiental:***

Área circunscrita num raio de 50 km, com centro na unidade I da CNAAA.

Com base nas informações acima, será analisado se as doses para as liberações de 100% e 1% do  $^{131}\text{I}$  estarão de acordo com o valor informado na resolução CNEN nº 09/69 para a zona de impacto, que corresponde a um raio de 5 km tendo Angra I como ponto central.

Observa-se que para o pior caso estudado, ou seja, liberação de 100% do  $^{131}\text{I}$ , em 12 horas de liberação temos que as doses calculadas para exposição de 1 hora ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $1,05 \times 10^5$  Sv a uma distância de 12 km tanto a oeste quanto a leste da usina. O mesmo ocorre para exposições de 3 e

24 horas, apresentando valores de  $2,18 \times 10^5$  e  $4,41 \times 10^5$  Sv a uma distância de 15 km, respectivamente.

Para liberação em 24 horas, nota-se que as doses calculadas para exposição de 1 hora ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $2,67 \times 10^4$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 48 horas com doses respectivas de  $5,44 \times 10^4$ ,  $1,10 \times 10^5$  e  $1,11 \times 10^5$  Sv.

Para liberação em 48 horas, nota-se que as doses calculadas para exposição de 1 hora ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $1,10 \times 10^4$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 96 horas com doses respectivas de  $1,41 \times 10^4$ ,  $3,60 \times 10^4$  e  $6,94 \times 10^4$  Sv .

Para liberação em 72 horas, temos que as doses calculadas para exposição de 1 hora também ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $4,85 \times 10^3$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 144 horas com doses respectivas de  $6,70 \times 10^3$  ,  $1,59 \times 10^4$  e  $3,63 \times 10^4$  Sv .

Conforme observado, para este cenário, a zona de impacto é muito maior do que o apresentado pelo Plano de Emergência atual. Isto é devido a uma alta atividade de emissão liberada pela chaminé. Salienta-se devida parcimônia quanto a estes resultados, pois comparando com o pior caso de um acidente severo ocorrido numa usina nuclear, no caso, a usina de Chernobyl que não possuía uma contenção, a quantidade de  $^{131}\text{I}$  liberado para a atmosfera foi de 60%, conforme mostra o documento acessível no site <https://www.oecd-nea.org/rp/chernobyl/c02.html>.

Infere-se com isto, que para um reator PWR que possui uma contenção, este cenário seria improvável, pois quantidades de  $^{131}\text{I}$  seriam depositados na parede da contenção e pelos filtros existentes no sistema da chaminé e por isso, uma melhor avaliação é recomendável para 1% de liberação, cenário postulado no documento de Angra I. (FSAR, 2011).

Para o cenário de 1% do núcleo, com 12 horas de liberação, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $1,07 \times 10^1$  Sv cuja distância é de 15 km. O mesmo ocorre para exposições de 3 e 24 horas, apresentando valores de  $2,18 \times 10^1$  e de  $4,41 \times 10^1$  Sv a uma distância de 15 km, respectivamente.

Para 24 horas de liberação, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de aproximadamente 3 Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 48 horas, apresentando valores de 5,44,  $1,10 \times 10^1$  e de  $1,11 \times 10^1$  Sv a uma distância de 30 km, respectivamente.

Para 48 horas de liberação, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de 5,86 Sv cuja distância é de 12 km. Para a exposição de 3 horas o valor da dose é de 3,66 Sv num raio correspondente a 25 km. O mesmo ocorre com as exposições de 24 e 96 horas que ultrapassam a zona de impacto cujo valor é de 3,60 e 6,94 Sv a uma distância de 30 km, respectivamente.

Para 72 horas de liberação, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição encontram-se dentro da zona de impacto, ou seja, num raio de 5km cujo valor é de 3,91 Sv. Para 3 horas de exposição o valor da dose ultrapassa a zona de impacto alcançando aproximadamente 9 km, cujo valor é de 4,64 Sv. Para 24 horas de exposição o valor de dose também ultrapassa a zona de impacto, cujo valor é de 3,39 Sv chegando a 15 km. Para 144 horas de exposição o valor também ultrapassa a zona de impacto chegando um pouco além dos 25 km num valor de 3,63 Sv.

Nota-se que para 1% do núcleo, para as liberações em 12, 24 e 48 horas, o valor de dose de inalação ultrapassa a zona de impacto, chegando aproximadamente num raio de 15 km nas primeiras horas. Além disso, na liberação em 72 horas o valor de dose se encontra dentro do raio de impacto estabelecido no Plano de Emergência atual apenas nas primeiras horas.

No entanto, os resultados obtidos no presente estudo não podem ser considerados conclusivos do ponto de vista do planejamento das zonas de emergência. Deve ser ressaltado que os cenários do presente estudo, considerados no modelo de dispersão, carecem de base empírica. Isso se deve à ausência de informações que permitam uma caracterização adequada de certas variáveis e parâmetros do modelo atmosférico assim como do termo fonte, quais sejam:

- *Informações mais precisas sobre as variáveis de intensidade e direção do campo de vento local.* Atualmente o Complexo Nuclear conta com

quatro torres meteorológicas, porém devido à complexidade da região já foi identificada a necessidade de instalação de mais 3 torres em pontos selecionados com diferentes cotas altimétricas.

- *Melhor resolução da topografia no modelo de elevação digital.* Permitirá simular de forma mais precisa tanto os fenômenos atmosféricos de mesoescala quanto os de microescala.
- *A taxa de liberação dos radionuclídeos para a atmosfera.* Essa informação, além de não estar explicitada, não foi possível de ser estimada com base empírica através dos dados disponíveis, considerando tanto liberações controladas quanto não controladas pelo sistema de ventilação da chaminé, uma vez que a duração e a quantidade de  $^{131}\text{I}$  liberado não pode ser determinada. Para tanto devem ser conhecidas as quantidades do inventário que ficariam depositadas nas paredes da contenção bem como no filtro da chaminé e o intervalo de tempo da emissão.

Por outro lado, conforme foi observado em evacuações decorrentes de acidentes anteriores, (TMI, Chernobyl e Fukushima) – *descrição dos acidentes disponível no link <http://www.nrc.gov>*, a zona de impacto tem sido bastante superior que a ZPE adotada pela CNAEA, alcançando, respectivamente, diâmetros de *16 km, 10 km (e logo após estendida para 30 km) e 30 km*. Isso decorre do fato de que o planejamento de emergência das usinas nucleares licenciadas no passado não incluía na base de projeto a análise de segurança para o impacto de acidentes severos, devido a sua probabilidade ser considerada muito baixa.

No entanto, a ocorrência dos acidentes mencionados acima vem levando as autoridades regulatórias a exigir atualmente a inclusão de tais estudos nos relatórios de análise de segurança por ocasião do licenciamento das novas centrais nucleares, tal como ocorreu no caso de Angra 3. Em certos casos, dependendo da avaliação dos relatórios e estudos independentes, a autoridade regulatória poderá exigir a ampliação das áreas de exclusão e baixa população se julgar conveniente.

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os modelos existentes de dispersão de poluentes atmosféricos apresentam sempre algumas limitações no sentido de não representar por completo os fenômenos físicos que estão envolvidos. Os modelos mais avançados procuram enfatizar e representar com mais atenção os processos químicos, e outros procuram detalhar os fenômenos atmosféricos envolvidos no transporte de mesoescala, ou concentram esforços na determinação dos parâmetros de difusão turbulenta associados aos efeitos topográficos na pequena escala, e nesse caso, alguns modelos enfatizam os fenômenos meteorológicos.

O que fica claro, é que existe uma lacuna no estudo da dispersão atmosférica, ou seja, não existe um modelo matemático relativamente complexo que possa representar e descrever os problemas que acontecem nas diferentes escalas.

Nesse contexto, o presente trabalho procurou utilizar um modelo que pudesse assimilar as condições complexas do campo de vento em mesoescala, a fim de que as trajetórias simuladas da pluma representassem um padrão realista da dispersão atmosférica na região da Baía de Ilha Grande.

O modelo atmosférico e de dispersão *CALMET/CALPUFF*, se mostrou o mais indicado para a modelagem da região, pois foi possível acoplar os resultados de mesoescala do WRF aos dados observacionais das quatro torres meteorológicas do Complexo Nuclear de Angra e com isso minimizar as incertezas associadas à modelagem.

Os resultados obtidos quanto à direção e intensidade dos ventos, corroboram os resultados de Aguiar et al (2015) e Oliveira Junior et al (2010), evidenciando que o local possui dispersibilidade baixa de poluentes. Infere-se com isso, que o modelo reproduziu, satisfatoriamente, os efeitos brisa vale-montanha (ventos catabáticos e anabáticos), brisa marítima e terrestre, bem como os momentos de calmaria.

Quanto ao acidente proposto no presente trabalho, observa-se que a região de Angra dos Reis apresenta um alto índice de deslizamento de encosta, o que, num caso extremo, afetaria o sistema externo de alimentação da CNAAA, caracterizando assim, falha comum às três unidades. A central, após a queda da alimentação externa,

dependerá do seu sistema interno de energia, ou seja, dos geradores diesel, sendo que a usina com maior probabilidade de falha no seu sistema de back-up é a unidade 1.

Isso se deve ao fato desta usina funcionar com um sistema de redundância de 2x100%, diferente da unidade 2 que funciona com um sistema de redundância 4x50%, diminuindo com isto as falhas associadas. Partindo deste pressuposto, um station blackout nesta unidade tem maior probabilidade, visto que seus geradores diesel (GD1 e GD2) apresentam maiores chances de ocorrer falhas de partida e de continuidade de funcionamento.

Ocorrendo o Station Blackout, as seguintes falhas poderão ocorrer, a saber:

- *Falha na refrigeração do núcleo*, o que acarretaria no aumento de pressão e LOCA no sistema primário, liberação do inventário para o interior da contenção, DNB e reação  $Zr + H_2O$  e por fim, fusão total ou parcial do núcleo.
- *Falha no sistema de ventilação da chaminé*, ocorrendo neste caso liberação não controlada dos radionuclídeos para a atmosfera.

Inferese portanto, que nesse caso, a melhor solução para se evitar um station blackout na unidade 1, seria a utilização de geradores diesel móveis a fim de sanar o problema até o restabelecimento da energia, outra hipótese é a possibilidade de interligação dos Sistemas de Alimentação de Emergência das duas usinas e instalação de meios fixos (cabos e conexões) para possibilitar maiores alternativas de utilização dos 16 Grupos Diesel da Central (com Angra 3), aumentando com isto, a probabilidade de se evitar um Station Blackout e as subsequentes falhas nesta usina.

A partir dos resultados obtidos pela modelagem da dispersão do  $^{131}I$  na atmosfera da região de Angra dos Reis, conclui-se que:

- A pluma de  $^{131}I$ , na liberação de 100% do núcleo, apresenta em 12 horas de liberação, e nas primeiras horas, doses que ultrapassam a zona de impacto cujo valor é de  $1,05 \times 10^5$  Sv a uma distância de 12 km tanto a oeste quanto a leste da Usina. O mesmo ocorre para exposições de 3 e 24 horas, com valores de  $2,18 \times 10^5$  e  $4,41 \times 10^5$  Sv a uma distância de 15 km, respectivamente. Para 24 horas de liberação, as doses calculadas para exposição de 1 hora ultrapassam a zona de impacto, apresentando

um valor de  $2,67 \times 10^4$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 48 horas com doses respectivas de  $5,44 \times 10^4$ ,  $1,10 \times 10^5$  e  $1,11 \times 10^5$  Sv. Em *48 horas de liberação*, as doses calculadas para exposição de 1 hora ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $1,10 \times 10^4$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 96 horas com doses respectivas de  $1,41 \times 10^4$ ,  $3,60 \times 10^4$  e  $6,94 \times 10^4$  Sv. E para as *72 horas de liberação*, as doses calculadas para exposição de 1 hora também ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de  $4,85 \times 10^3$  Sv cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 144 horas com doses respectivas de  $6,70 \times 10^3$ ,  $1,59 \times 10^4$  e  $3,63 \times 10^4$  Sv.

- Na liberação de *1% do núcleo*, a pluma de  $^{131}\text{I}$ , apresenta em *12 horas de liberação*, doses de inalação para tireoide com valor de  $1,07 \times 10^1$  Sv, a uma distância de 15 km em 1 hora de exposição. O mesmo ocorre para exposições de 3 e 24 horas, apresentando valores de  $2,18 \times 10^1$  e de  $4,41 \times 10^1$  Sv a uma distância de 15 km, respectivamente. Em *24 horas de liberação*, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de aproximadamente 3 Sv, cuja distância é de 30 km. O mesmo ocorre para exposições de 3, 24 e 48 horas, apresentando valores de 5,44,  $1,10 \times 10^1$  e de  $1,11 \times 10^1$  Sv a uma distância de 30 km, respectivamente. Para *48 horas de liberação*, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição ultrapassam a zona de impacto, apresentando um valor de 5,86 Sv, cuja distância é de 12 km. Para a exposição de 3 horas o valor da dose é de 3,66 Sv num raio correspondente a 25 km. O mesmo ocorre com as exposições de 24 e 96 horas que ultrapassam a zona de impacto cujo valor é de 3,60 e 6,94 Sv a uma distância de 30 km, respectivamente. E finalmente em *72 horas de liberação*, as doses calculadas referente a 1 hora de exposição encontram-se dentro da zona de impacto, ou seja, num raio de 5 km cujo valor é de 3,91 Sv. Para 3 horas de exposição o valor da dose ultrapassa a zona de impacto alcançando aproximadamente 9 km, cujo valor é de 4,64 Sv. Para 24

horas de exposição o valor de dose também ultrapassa a zona de impacto, cujo valor é de 3,39 Sv chegando a 15 km. Para 144 horas de exposição o valor também ultrapassa a zona de impacto, cujo valor é de 3,63 Sv a uma distância de aproximadamente 25 km.

Conclui-se, portanto, através dos dados apresentados nesta tese, que o impacto ocorrido, para tal acidente, vai além da zona de impacto atual da CNAAA, onde tal fato fica evidenciado tanto no pior caso proposto, quanto no caso postulado no FSAR (2011). Contudo, salienta-se devida parcimônia quanto aos resultados apresentados para liberação de 1% do núcleo, pois em 72 horas de liberação e nas primeiras horas, o valor da dose de inalação para tireoide se encontra dentro da zona prevista no Plano de Emergência atual da CNAAA.

Conclui-se também que a melhor opção para uma possível evacuação nas primeiras horas seria pelo mar, pois como foi observado nas simulações do campo de vento local, a predominância para todo o tempo de liberação da pluma ocorre nas direções sudeste e sul, evidenciando que a pluma tem deslocamento para as regiões norte e nordeste.

Acidentes anteriores mostraram que a zona de impacto pode ser estendida, pois acidentes de base de projeto não contemplam eventos severos que tem muito baixa probabilidade, porém grande magnitude. Estudos prospectivos que levem em conta a ocorrência desses eventos, não podem ser considerados triviais devido à grande complexidade das análises requeridas para avaliação do impacto, sendo que suas conclusões podem levar a alterações na definição das ZPEs.

## • RECOMENDAÇÕES

Considerando as limitações da abordagem utilizada e as questões surgidas durante o desenvolvimento do trabalho, recomenda-se a complementação da modelagem com os seguintes estudos, a saber:

- Refinamento dos dados de campo de vento da região, após a aquisição das informações das sete torres meteorológicas que já estão sendo implantadas pela ETN e também adotar uma melhor resolução espacial.
- Simulação para outros cenários meteorológicos, e.g. a liberação no mês mais frio e seco do ano (junho) ou em períodos de calmarias ou entrada de frentes frias.
- Simulação de outros radionuclídeos presentes no núcleo do reator, em especial gases nobres e outros produtos de fissão.
- Estudos sobre o tempo de liberação dos radionuclídeos para a atmosfera, através de uma quantificação mais precisa das saídas de gases pelo sistema de ventilação da chaminé para liberações não controladas.
- Avaliação da quantidade de  $^{131}\text{I}$  efetivamente liberado através de modelos de balanços de massa que levem em conta as frações do inventário depositadas nas paredes da contenção, assim como no filtro da chaminé, que permanecem na planta ou são liberadas mais lentamente.
- Cálculo de dose da pluma no ponto e também cálculo de dose de deposição para o  $^{131}\text{I}$ , como também para outros radionuclídeos, assim como avaliação de risco a médio e longo prazo.

O conhecimento sobre esses aspectos permitiriam diminuir as limitações do modelo e melhorar a precisão sobre as trajetórias das plumas em diferentes condições de tempo e termo fonte, permitindo simular uma grande gama de cenários que poderiam gerar subsídios para tomada de decisão quanto ao planejamento, preparação e resposta em situações de emergência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ATMET, 2003, MM5 Simulations for Tex AQS 2000 Episode. In: Review of the TKEPBL schemes in MM5, 2003.
- AGUIAR.A.S, F.F.Lamego Simoes Filho, A.C.M. Alvim, L.C.G. Pimentel, N.O. Moraes. Station Blackout in unit 1 and analysis of the wind field in the region of Angra dos Reis. Annals of Nuclear Energy. Elsevier, vol 78, pg 93-103.2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.12.010>
- AGUIAR. A.S. Simulação do campo de vento da região de Angra dos Reis para todo o mês de janeiro de 2009. 2015. Acesso em: <https://www.youtube.com/watch?v=ILgcjxWT41U>
- AGUIAR. A.S. Simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 12 horas de liberação. 2015. Acesso em : <https://www.youtube.com/watch?v=s2PvxTVZNOw&feature=youtu.be>
- AGUIAR. A.S. Simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 24 horas de liberação. 2015. Acesso em: <https://www.youtube.com/watch?v=ZnFHrpjKNpU>
- AGUIAR. A.S. Simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 48 horas de liberação. 2015. Acesso em : <https://www.youtube.com/watch?v=GQ3lqxsInM0>
- AGUIAR. A.S. Simulação da dispersão do  $^{131}\text{I}$  na atmosfera de Angra dos Reis no cenário de 72 horas de liberação. 2015. Acesso em : <https://www.youtube.com/watch?v=uws8etaIcE8>
- BERMANN, Celio. Avaliação dos aspectos de Segurança do Projeto da Usina Nuclear Angra 3. Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo. Brasil, 2012.
- BLACKADAR, A. K. “High-Resolution Models of the Planetary Boundary Layer”. Advances in Environmental Science and Engineering, v.1, pp.50–52, 1979.
- CNEN-NE-1.26. INSTALAÇÕES NUCLEARES. Segurança na Operação de Usinas Nucleoelétricas. outubro,1997.
- CNEN. Normas para escolha de locais para reatores de potência. Instalações Nucleares.Comissão Nacional de Energia Nuclear.Resolução-09/69. Brasil, 1969.
- CNEN. Coeficientes de dose para exposição do público.Posição Regulatória 3.01/011. Brasil,2011.
- CROSSETTI, Patrícia Guimarães. Um modelo de confiabilidade do Sistema Elétrico de Angra 1 pelo Método dos Estágios Otimizados por Algoritmos Genéticos. D.Sc.Engenharia Nuclear, COPPE/UFRJ, 2006.

- CROSSETTI, Patrícia Guimarães. Análise da Confiabilidade dos barramentos de segurança de Angra 1 considerando a nova configuração de geradores diesel. M.Sc., COPPE/UFRJ, RJ - BRASIL, 1997.
- CURBANI, F e RADAELI, L. A. Aplicação da Modelagem da Dispersão de Poluentes na Atmosfera para Avaliação de Situações de Emergência Relacionadas a Emissões Acidentais de Agentes Químicos. Monografia de Pós-Graduação. Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo. 87p, 2006.
- CORREA, E. B. .Avaliação do Sistema Combinado de Modelagem MM5/CALMET na representação da Circulação Atmosférica da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.,194 p., Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.2008.
- DORMAN, J.L. and SELLERS, P.J. A Global Climatology of Albedo, Roughness Length and Stomatal Resistance for Atmospheric General Circulation Models as Represented by the Simple Biosphere Model (SiB), Journal Applied Meteorology, v. 28, pp. 833-855.1989.
- ELETRONUCLEAR . Angra 1- Ciclo 20 – Inventário de Radionuclídeos para termo fonte. Nº GCN.T.018.14, Brasil – Rj, 2014.
- EPA - United States Environmental Protection Agency. User's guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET).(EPA-454/B-03-002). North Carolina, U.S. Environmental Protection Agency. 2004b.
- EPRI. German Risk Study - Main Report - A Study of Risk Due to Accidents in Nuclear Power Plant. EPRI NP 1804 - SR - Special Report, 1991.
- EISENBUD, M. Environmental Radioactivity, An Interdisciplinary Monograph Series, 2nd, Academic Press, N. Y., 1973.
- FSAR, Final Safety Analysis Report. Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto – Unidade 1. Rev.35. Eletronuclear – Eletrobras Termonuclear S.A., 2011.
- GRELL, G. A.; DUDHIA, J.; STAUFFER, D. R.; A description of the fifth generation Penn State/ NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note NCAR/TN -398 + STR, 138 pp., 1994.
- HAEA - Hungarian Atomic Energy Authority. Emergency Preparedness. Source, Term. Available,,in,,  
[http://www.haea.gov.hu/web%5Cv2%5Cportal.nsf/main\\_tasks\\_en/88D6B6B8458CAD7C125710B003ACE6E?OpenDocument](http://www.haea.gov.hu/web%5Cv2%5Cportal.nsf/main_tasks_en/88D6B6B8458CAD7C125710B003ACE6E?OpenDocument). Released on 04/02/2006.
- HANNA, S. R.; PAINE, R. J.; Hybrid Plume Dispersion Model (HPDM) development and evaluation. J Appl. Met; 28:206-224, 1989.

- HOLMES, N. MORAWASKA, L. A review of dispersion modeling and its application to the dispersion of particles: An overview of different dispersion models available. Atmospheric Environment. V.40 p.5902-5928, 2006.
- IAEA. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements part 3, n°.GSR part 3. viena, 2014.
- IAEA. Assessment of Occupational Exposure due to intakes of Radionuclides. Safety Guide n°.RS-G-1.2. viena, 1999.
- IAEA. International Atomic Energy Agency. Safety Series No. 115, “International Basic Safety Standards for Protection against Ionising Radiation and for the Safety of Radiation Sources. IAEA, VIENA. 1996.
- ICRP. International Commission on Radiological Protection. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60, Pergamon Press. 1991.
- DORSSELAERE, Jean Pierre Van, Thierry Albiol and Jean-Claude Micaelli. Research on Severe Accidents in Nuclear Power Plants. Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), France, 2011.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.C.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; JENNE, R. and JOSEPH, D. “The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project”. Bulletin of the American Meteorological Society, v. 77, n. 3, pp. 437 – 470. 1996.
- LAMARSH, John R. Introduction to Nuclear Reactor Theory. Addison-Wesley Publishing Company. New York University, 1975.
- LEÃO, I. L. B. Cenários Ambientais em Centrais Nucleares: Integração da Meteorologia Local com outros fatores Ambientais por meio do Sistema de Informações Geográficas. Dissertação de M. Sc., Engenharia Nuclear – IME, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1998.
- LEWIS, E.E. Nuclear Power Reactor Safety. Nuclear Engineering Program the Technological Institute Northwestern University. New York, 1977.
- LISBOA, H.M. Meteorologia e Dispersão Atmosférica. Capítulo VIII In: Controle da Poluição Atmosférica. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Centro Tecnológico. Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em <http://www.lcqa.ufsc.br/adm/aula/>, 2007.
- LUDWIG, F. L., L.S. Gasiorek, and R. E. Ruff. “Simplification of a Gaussian Puff Model for Real-Time Minicomputer Use.” Atmospheric Environment. Volume 11, 431-436. 1977.

- MELLOR, G. L., YAMADA, T. “Development of a Turbulence Closure Model for Geophysical Fluid Problems”. *Review Geophysical Space Physical*, v. 20, pp. 851-875, 1982.
- MELLOR, G.L., YAMADA, T. “A Hierarchy of Turbulence Closure Models for Planetary Boundary Layers”. *Journal Atmospheric Science*, v. 31, pp.1791-1806, 1974.
- MELO, A. M. V., Avaliação de Desempenho dos Modelos AERMOD e CALPUFF Associados ao Modelo PRIME. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Espírito Santo. 2011.
- MORAES, M. R. Ferramenta para a previsão de vento e dispersão de poluentes na Micro-escala atmosférica. 2004. Tese (Doutorado em engenharia mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2004.
- NATRONTEC. Estudo de Impacto Ambiental (EIA) para a Usina Nuclear de Angra 2, Volumes, 1, 2, 3 e 5, 1998.
- NICOLI, D. Primeira campanha de experimento de difusão atmosférica na área da Central Nuclear de Angra dos Reis – análise de resultados, julho, Relatório Técnico da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) - n° 133, p. 100, 1986.
- NRC, USA Nuclear Regulatory Commission. Periodic Testing of Diesel Generator Units used as onsite electric power systems at Nuclear Power Plants. Regulatory Guide 1.108, Washiton, 1983.
- NIWA.FRST program proposal 2004, National Institute of Waterand Atmospheric Research, Wellington, 2004.
- NIWA. National Institute of Water and Atmospheric Research. Good Practice Guide For Atmospheric Dispersion Modelling. Wellington, New Zealand, June 2004.
- OLIVEIRA JÚNIOR, José Francisco de. Estudo da camada limite atmosférica na região de Angra dos Reis através do modelo de mesoescala MM5 e dados observacionais. D.Sc.Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2008.
- OLIVEIRA Junior, J.F., Pimentel, L.C.G., Landau, L. Criteria of atmospheric stability for the regional round the nuclear Power plant ALMIRANTE ÁLVARO ALBERTO, Angra dos Reis – RJ. *Revista Brasileira de Meteorologia* 25 (2), pg 270–285.2010.
- PAIVA, C. M. ; ALVES, G. S. ; XAVIER, M. C. A. . Classificação e Índícios de Mudança Climática em Angra dos Reis - RJ. In: X Congresso Brasileiro de Meteorologia, 1998, Brasília. *Anais do X Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Rio de Janeiro: Sociedade Brasleira de Meteorologia, v. 1. 1998.
- PASQUILL, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Meteorol. Mag.*, 90 (1063), pp33-49, 1961.

- PEE/RJ - Plano de Emergência Externo do Estado do Rio de Janeiro. Para Caso de Emergência Nuclear nas Instalações da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA). SECRETARIA DE ESTADO DE SAÚDE E DEFESACIVIL – SESDEC.2008.
- PIMENTEL, J..Projeto áreas de risco na região de Angra dos Reis, RJ: Modelagem espacial de dados em SIG para a geração de mapa previsional de áreas de risco geológico. Acordo de cooperação técnica CPRM – Serviço 245 Geológico do Brasil e Korea Institute of Geosciences and Mineral Resources – KIGAM. 113 p, 2010.
- ROSA, N. A.Relatório de Impacto Ambiental – RIMA - Unidade III do DIRR/CNAAA, julho, p. 102, 2003.
- SARAIVA,G.J.P. Energia Nuclear no Brasil: Fatores Internos e Pressões Externas. In: Cadernos de Estudos Estratégicos. Centro de Estudos Estratégicos da Escola Superior de Guerra (Brasil) - N. 07 (jul 2007) - Rio de Janeiro. 274 p. ISSN 1808-947X, 2007.
- SALDANHA, P.L.C. Aspectos na Avaliação de Segurança Relacionados à Perda Total de Energia Elétrica de Corrente Alternada em Centrais Nucleares. V Congresso Geral de Energia Nuclear (CGEN), Rio de Janeiro, pp 65-70, 1994.
- SCIRE, J. S. et al. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5).Earth Tech. Inc. 2000.
- SCIRE, J. S. et al. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5).Earth Tech. Inc. 2000a.
- SCIRE, J. S. et al. A user's guide for the CALPUFF dispersion model (Version 5).Earth Tech. Inc. 2000b.
- SILVA, Corbiniano. Modelagem Lagrangeana da Dispersão Atmosférica de Radionuclídeos e Sistemas de Informação Geográfica como ferramentas de suporte ao planejamento de emergência na área de influência do complexo nuclear de Angra dos Reis. D.Sc. Engenharia Civil -COPPE/UFRJ, 2013.
- SOARES, Elenir Pereira. Caracterização de precipitação na região de Angra dos Reis e a sua relação com a ocorrência de deslizamentos de encostas. M.Sc. Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, 2006.
- SOARES da Silva, M. Estratégias de Simulação da Dispersão de Poluentes com os Modelos WRF/CALMET/CALPUFF para a Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia Mecânica. UFRJ;COPPE. Rio de Janeiro, 2012.
- SMAGORINSKY, J.; General circulation experiments with the primitive equations. Part I: The basic experiment. Mon. Wea. Rev., v. 91, pp. 99-164, 1963.
- SKAMAROCK, W.C.; KLEMP, J.B.; DUDHIA, J.; GILL, D.O.; BARKER, D.M.;DUDHA, M.G.; HUANG, X.; WANG, W. and POWERS, Y. A Description of the Advanced Research WRF Ver.3.0. In: NCAR Technical Note. NCAR/TN-475STR. Mesoscale and

Micro-scale Meteorology Davison, National Centre for Atmospheric Research, Boulder Colorado, USA, 113 p, 2008.

TODREAS, Neil E. and Kazimi, Mujid S. Nuclear Systems I – Thermal Hydraulic Fundamentals. Massachusetts Institute of Technology. Published by Taylor & Francis Group 270 Madison Avenue, New York, NY- 1990.

TORBEN Mikkelsen. Modelling of Pollutant Transport in the Atmosphere. Atmospheric Physics Division. Roskilde, Denmark, July 2003.

USGS, United States Geological Survey. Topography of Angra dos Reis. <http://www.usgs.gov/>.

XAVIER, A.M.; LIMA, A.G.; VIGNA, C.R.M.; VEBI, F. M.; BORTOLETO, G.G.; GORAIEB, K.; COLLINS, C.H. e BUENO, M.I.M.S. “Marcos da História da Radioatividade e Tendências Atuais”. In: Revista Química Nova, Vol. 30, Nº 1, 83-91. Departamento de Química Analítica, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, CP 6154, 13084-971 Campinas - SP, Brasil, 2007.

XIAOYING Cao. Modelling the Concentration Distribution of Non-Buoyant Aerosols Released from Transient Point Sources into the Atmosphere. Department of Chemical Engineering, 2007.

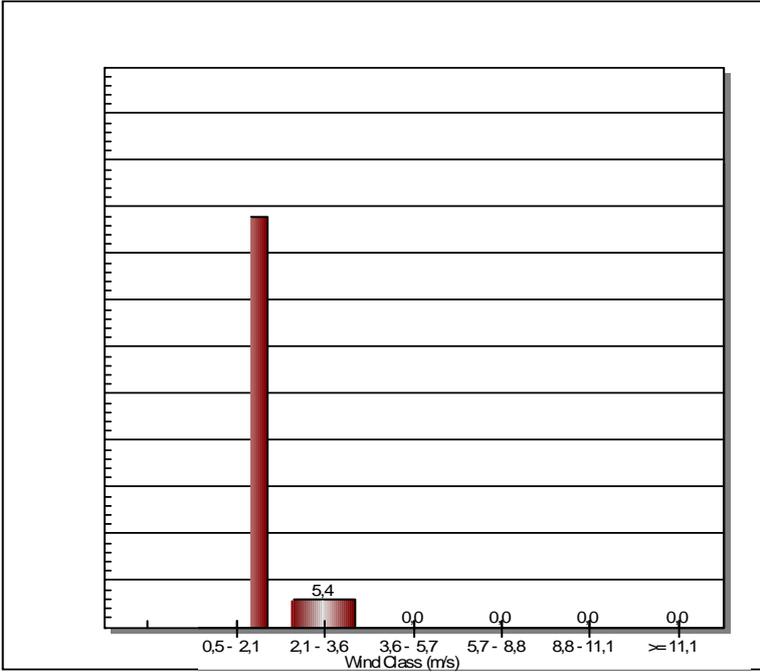
XUE, M., ZONG, J., DROEGEMEIER, K. K. Parameterization of PBL turbulence in a multi-scale non-hydrostatic model. In: 11th conference on Numerical Weather Prediction. American Meteorology Society, Norfolk, VA, 1996.

WESTINGHOUSE Electric Corporation. The Westinghouse Pressurized Water Reactor, nuclear power plant. Nuclear Operations Division, 1984.

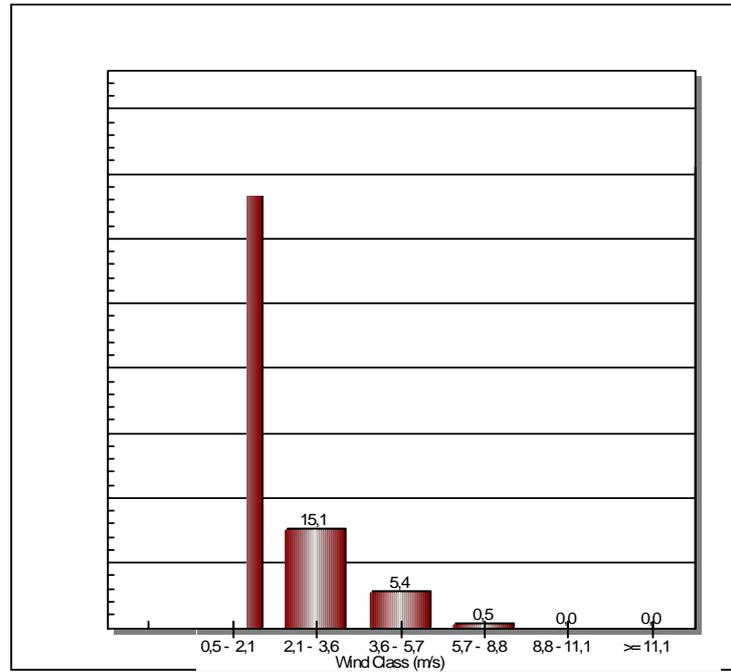
WRF/CHEM USER’S GUIDE. Version 3.4. Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration. The Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences. The University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). The National Center for Atmospheric Research (NCAR). The Max Plank Institute. The University of Chile, 2012.

# APÊNDICE – A

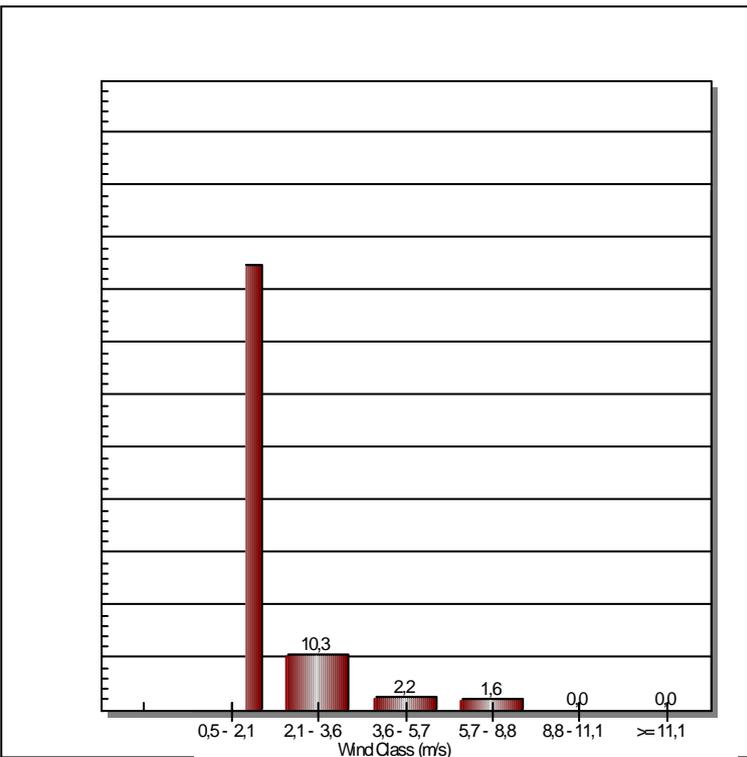
## MADRUGADA



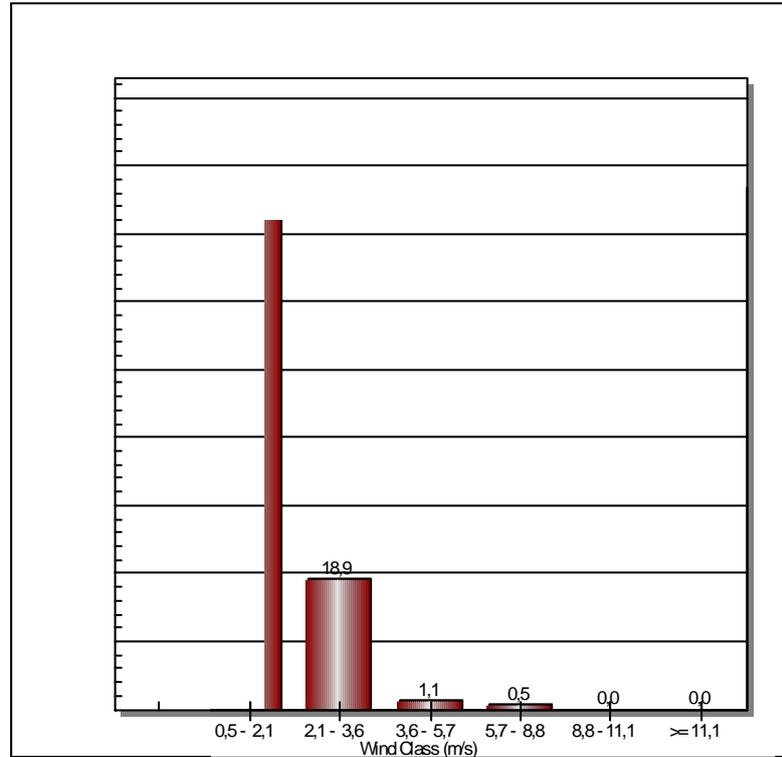
Torre A



Torre B



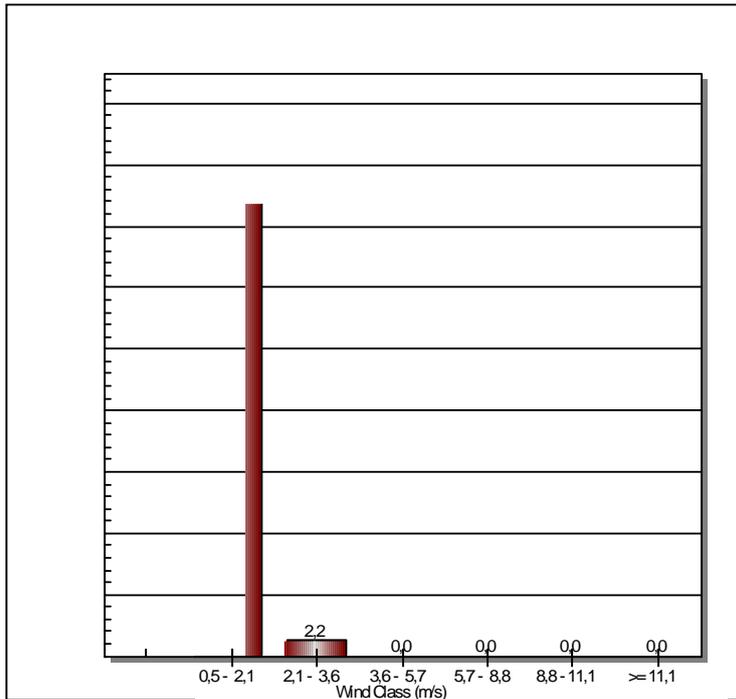
Torre C



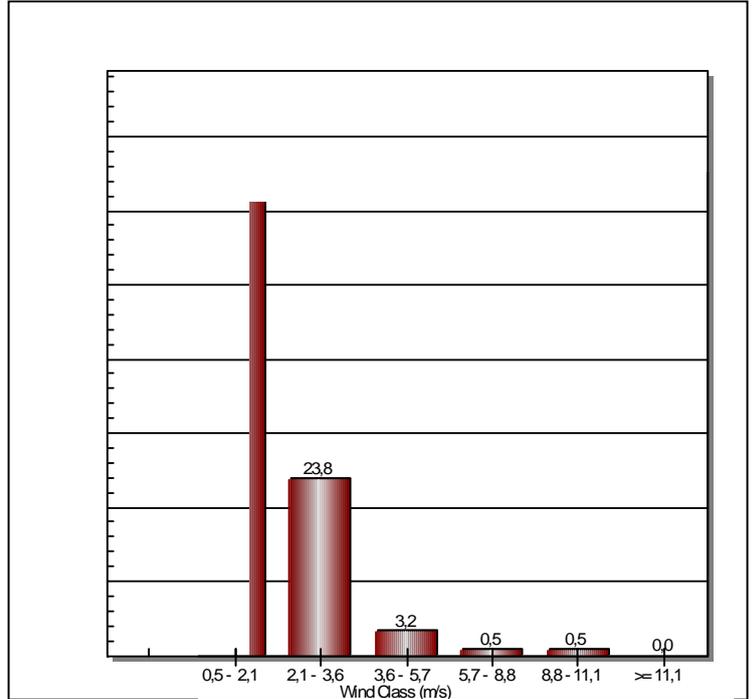
Torre D

# APÊNDICE – B

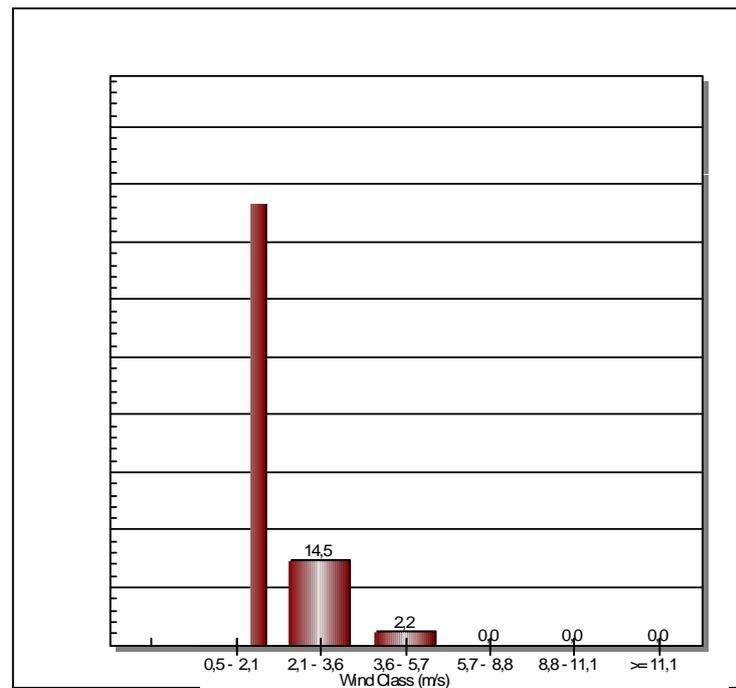
## MANHÃ



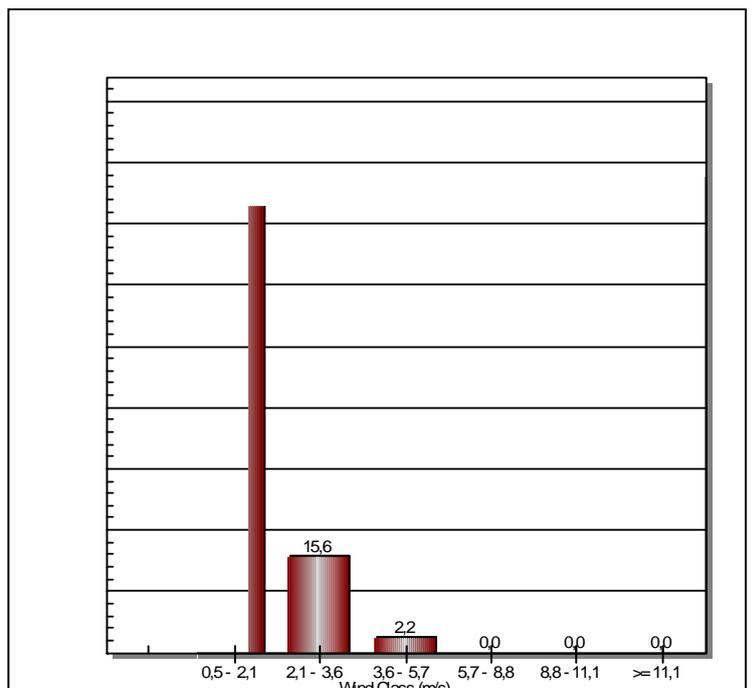
Torre A



Torre B



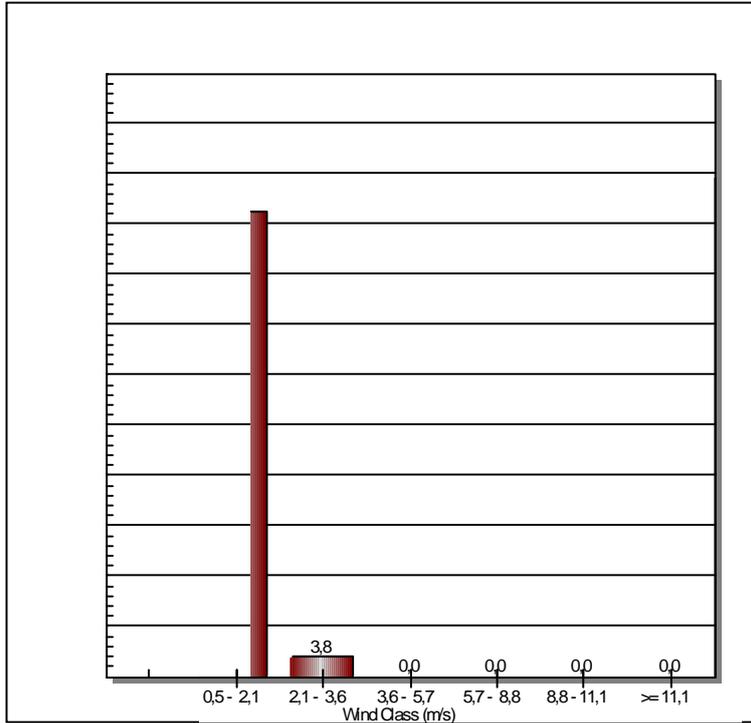
Torre C



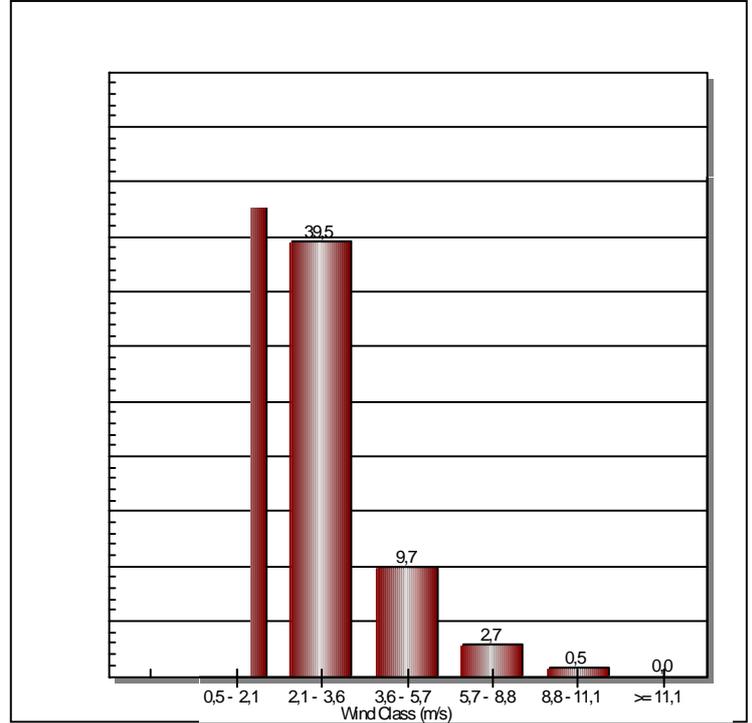
Torre D

# APÊNDICE – C

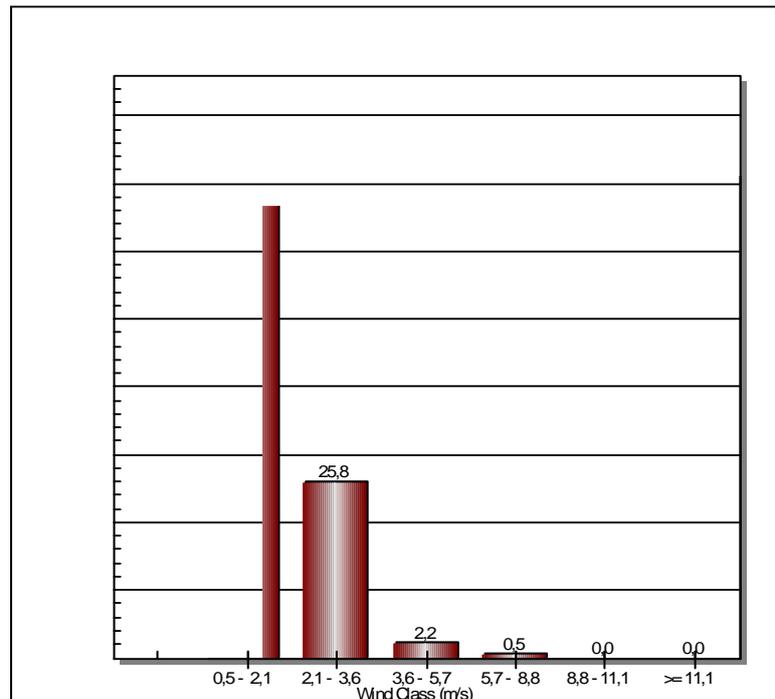
## TARDE



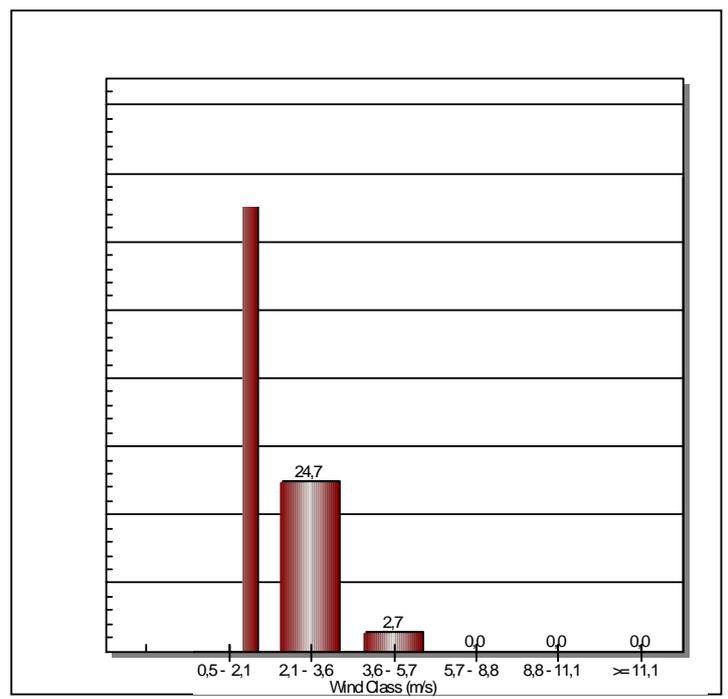
Torre A



Torre B



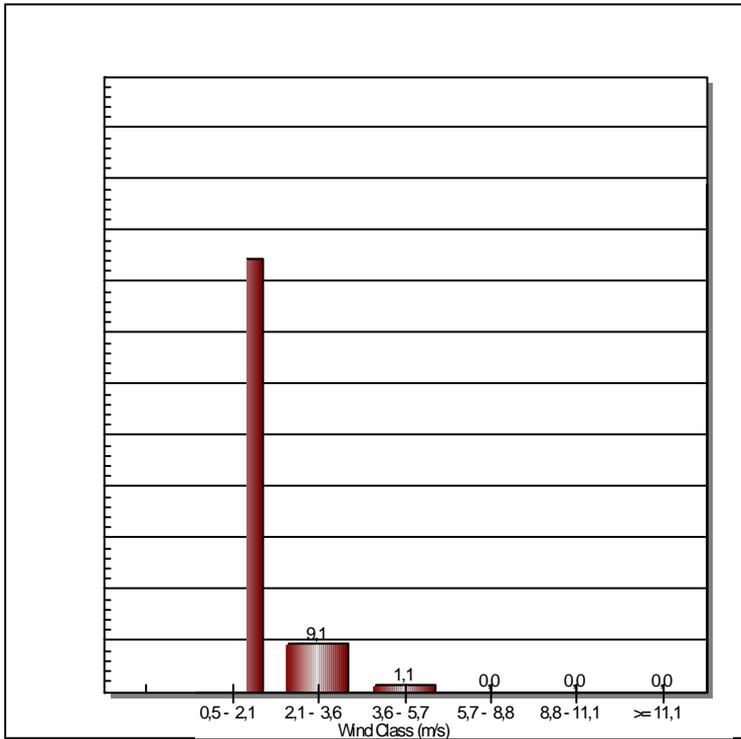
Torre C



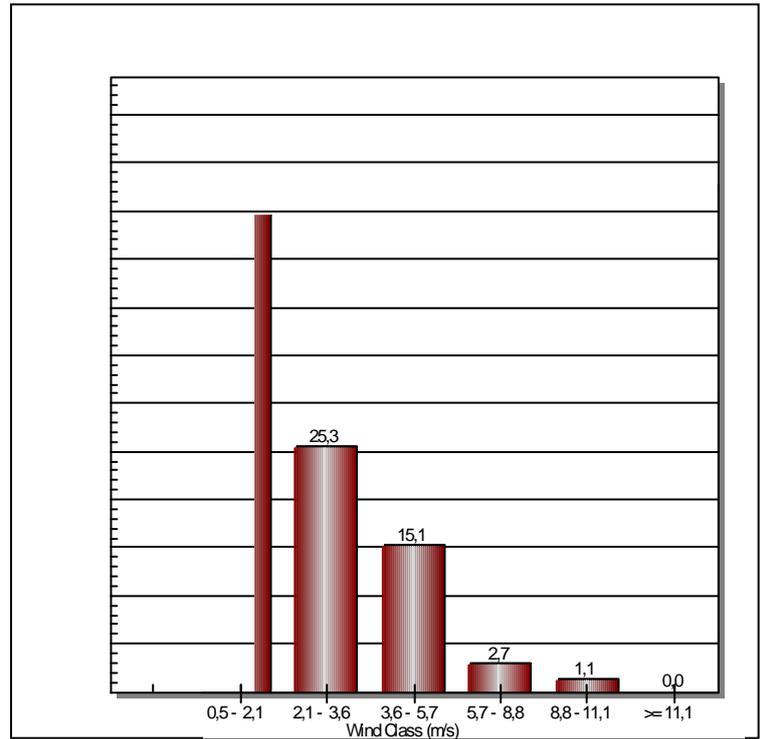
Torre D

# APÊNDICE – D

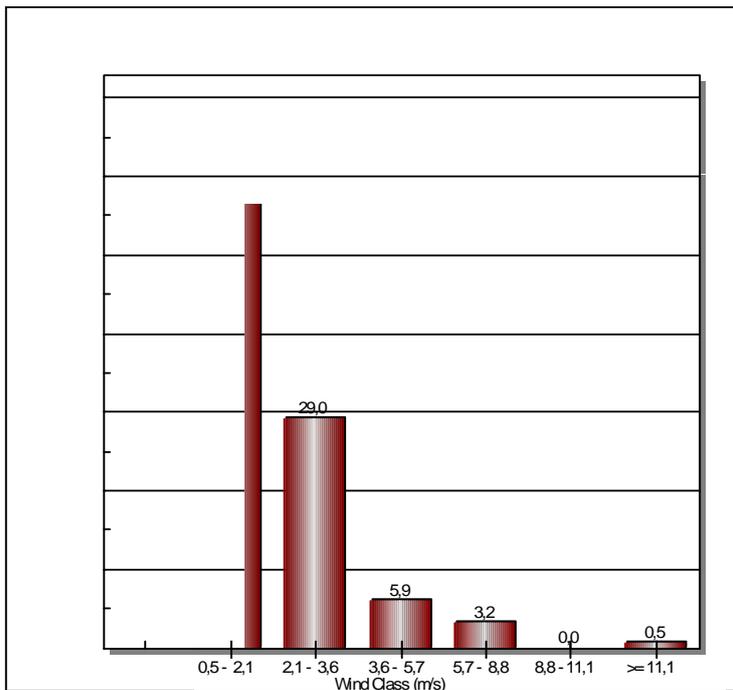
## NOITE



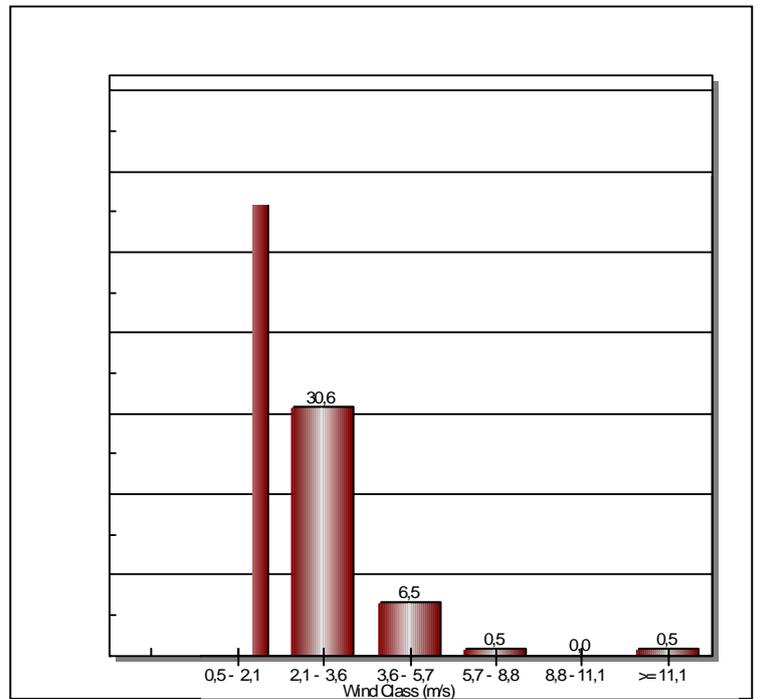
Torre A



Torre B



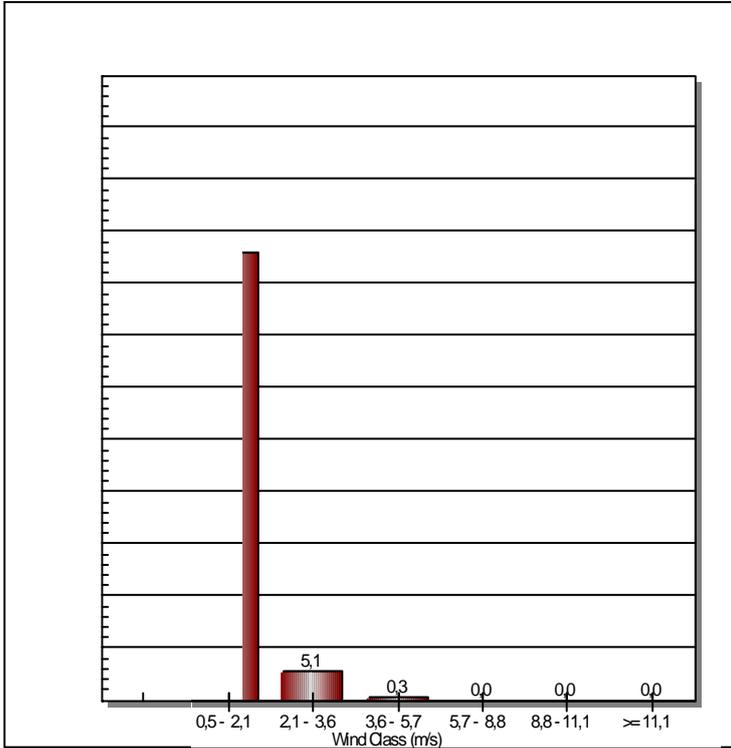
Torre C



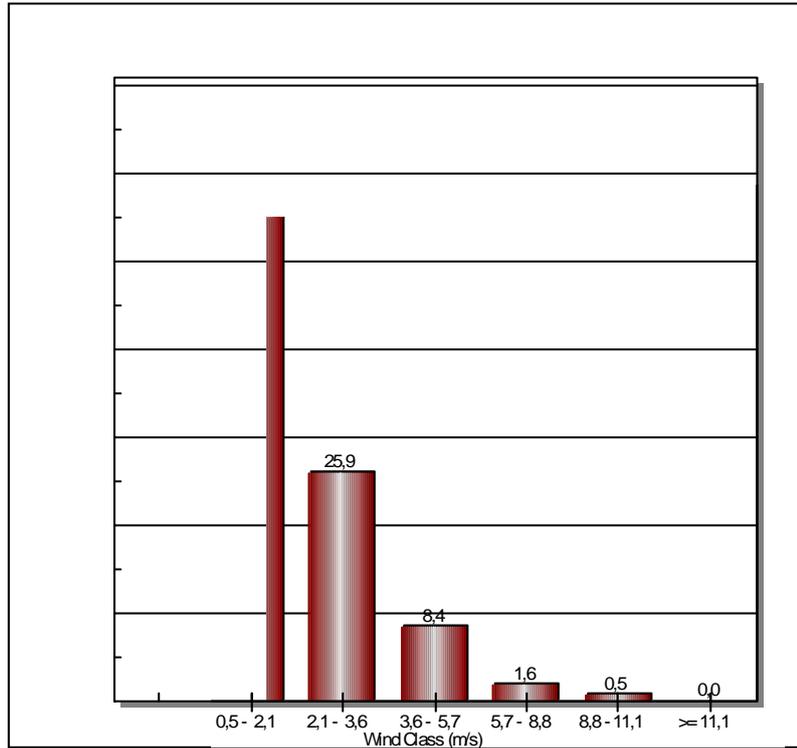
Torre D

# APÊNDICE – E

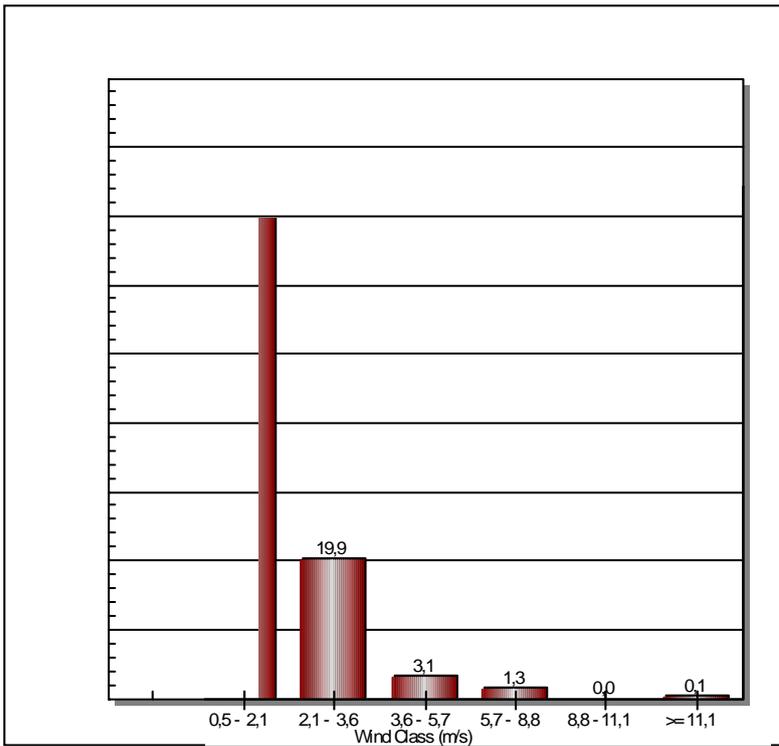
## PERÍODO TOTAL



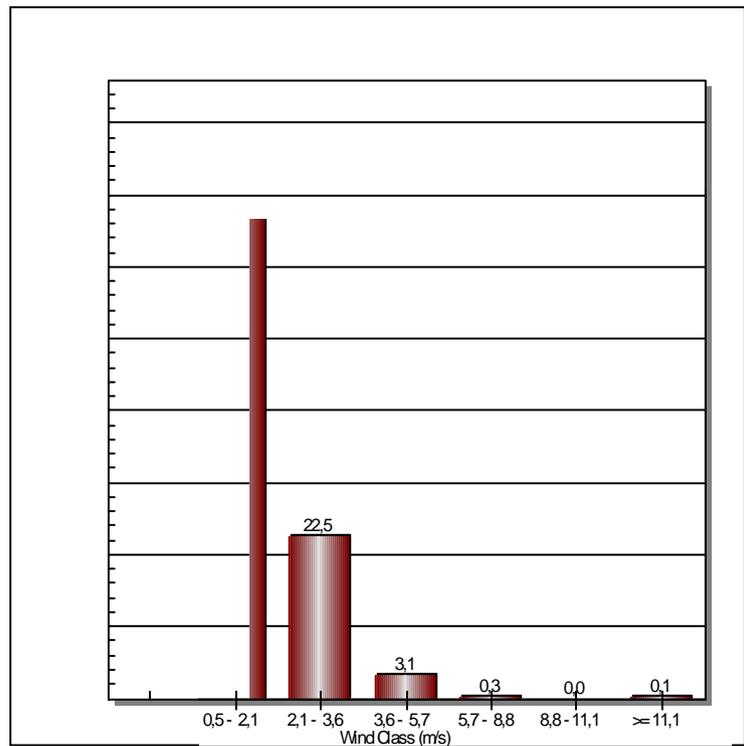
Torre A



Torre B



Torre C



Torre D