

Ângela Seixas<sup>1</sup> e Carlos Bateira<sup>2</sup>

## **Determinação de áreas potencialmente afetadas em caso de acidente com transporte de mercadorias perigosas – comparação entre duas metodologias na estação ferroviária de Vila Nova de Gaia.**

### **Resumo**

O que diferencia o transporte de substâncias e preparações perigosas de outros tipos de transporte de mercadorias é, naturalmente, o risco associado à sua eventual libertação durante o transporte, uma vez que podem ser extremamente prejudiciais para o ambiente e para a saúde humana. A libertação de uma destas matérias durante o seu transporte constitui um *perigo*, ou seja, um processo capaz de produzir perdas e danos identificados (Julião, R. P. et al, 2009).

O transporte ferroviário de mercadorias perigosas, objecto de análise neste trabalho, é o menos elaborado ao nível do desenvolvimento de modelos de avaliação do risco, apesar do potencial para desenvolver acidentes mais gravosos, na medida em que tem uma maior capacidade de carga e pode combinar, num único transporte, várias matérias perigosas (VERMA e VERTER, 2007).

---

1. Estudante do 3º Ciclo em Geografia da Faculdade de Letras da Universidade do Porto; Dynat - Natural Processes Assessment, Modeling and Mapping

2. Centro de Estudos em Geografia e Ordenamento do Território (CEGOT):

De entre os vários modelos de avaliação de riscos existentes, abordam-se dois dos mais utilizados, o modelo de ERKUT e VERTER (1995) e o de ERKUT e VERTER (1998). De acordo com estes modelos, o maior obstáculo ao desenvolvimento de modelos mais precisos, nomeadamente no que se refere à determinação das áreas potencialmente afectadas (APA), são as limitações dos dados disponíveis relativamente às condições meteorológicas, à topografia, ao efeito da substância transportada nas pessoas e à localização destas no momento do incidente. Esta limitação conduz ao uso dos limites fixos referidos pelo ERG (Emergency Response Guidebook).

A par desse recurso, de muito fácil utilização, existem softwares para determinação de APAs gratuitos. Destes destacamos o ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), software produzido e disponibilizado gratuitamente pela agência ambiental americana, EPA. Neste software é possível incluir parâmetros relativos ao tipo e quantidade de matéria, às características da área relativamente ao tipo de ocupação, às condições meteorológicas e à topografia.

Propomo-nos mostrar as diferenças no dimensionamento das APAs em resultado da inclusão ou não destes parâmetros.

**Palavras-Chave:** Mercadorias Perigosas; ALOHA; ERG; Transporte de Mercadorias Perigosas e Áreas Potencialmente Afectadas (APA).

**Abstract:** What differentiates the transport of dangerous substances and preparations from other types of goods transport is, of course, the risk associated with its eventual release during transport, since they can be extremely harmful to the environment and human health. The release of these materials during transport is a hazard, ie a process capable of producing identifiable damages (Julian, RP et al, 2009).

Among existing models for hazmat transport risk assessment we focus on two of the most widely used, from ERKUT and VERTER (1995, 1998). According to these, the largest obstacle to developing more accurate models, particularly for the determination of the potentially affected areas (APA), are the limitations of available data on meteorological conditions, topography, the effect of the substance transported in people and locating of these people at the time of the incident. This limitation leads to the use of fixed limits specified by the Emergency Response Guidebook.

On this purpose, there is free software very easy to use, for the determination of APAs, as ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres), produced by the U.S. Environmental Protection Agency. We test this software and show that important differences occur as parameters on the type and quantity of hazmat, the characteristics of the area for the type of occupancy, weather conditions and topography are included or not.

**Key Words:** dangerous goods; ALOHA; ERG; transportation of dangerous goods and potentially affected areas (APA).

## **Modelos de avaliação do risco associado ao transporte de mercadorias perigosas**

De acordo com GUO e VERMA (2009), o modelo de ERKUT e VERTER (1995), designado *de expected consequence model*, continua a ser um dos mais utilizados.

Na sua versão básica este modelo propõe uma metodologia para a avaliação dos riscos associados ao transporte de mercadorias perigosas por via rodoviária. Identifica risco como correspondendo à probabilidade de se verificarem as consequências nefastas decorrentes da fuga de uma matéria ou substância perigosa durante o seu transporte. Considera os acidentes de tráfego como os principais causadores de incidentes (accident risk – consequências da libertação de uma matéria devido a um acidente de tráfego). Considera o conceito de *risco social*, definindo-o como sendo a probabilidade de ocorrer uma fuga no transporte multiplicada pelas consequências dessa fuga. O cálculo do risco social agrega os vários riscos impostos a cada indivíduo que reside na proximidade da via utilizada para o transporte. Considera o conceito de centro populacional, marcado como um ponto no local onde se considera que a população se concentra, assumindo que cada pessoa num centro populacional tem o mesmo risco. Neste modelo apenas é incluída a pior consequência de um incidente (por exemplo, no caso de libertação de clorine, a morte do indivíduo) e apenas é considerada a possibilidade de ocorrência de um tipo de incidente durante o transporte (mais uma vez, no caso da clorine, a formação de uma névum tóxica).

A determinação da área potencialmente afectada é utilizada para conhecer a probabilidade que um indivíduo, residente num determinado centro populacional, tem de sofrer as consequências de um acidente. Embora se refira que a natureza e a extensão da contaminação e as suas consequências, dependem da matéria, das características geográficas da área e das condições meteorológicas e que o nível de concentração vai depender da distância ao local do acidente, da direcção do vento e da estabilidade atmosférica, estes não são calculados pelo modelo. Assim, no cálculo da probabilidade de um indivíduo sofrer as consequências do acidente, atribui-se o valor 1 para os centros populacionais que estejam a uma distância igual ou inferior à estabelecida pelos chamados limites fixos e o valor zero para as restantes situações.

Ou seja, o modelo não propõe nenhuma metodologia para a determinação das áreas potencialmente afectadas, utilizando os limites fixos utilizados, em 1988, por BATTÀ e CHIU.

Os autores apresentam ainda, no mesmo artigo, uma extensão daquilo que designaram por modelo base onde, para a determinação das áreas potencialmente afectadas, continuam a utilizar os limites fixos (Transport Canad, ERG). Nesta extensão propõem-se incluir no modelo uma distribuição mais realística da população nas áreas envolventes às vias utilizadas pelo transporte de mercadorias perigosas, referindo que se trata de uma generalização do modelo de BATTÀ e CHIU (1988) (associa a densidade populacional a cada segmento da via) e de um avanço em relação ao modelo de HILLSMAN e COLEMAN (1989).

O outro modelo analisado foi o de ERKUT e VERTER (1998). Este modelo tem como objectivo encontrar os melhores percursos para o transporte de mercadorias perigosas por via rodoviária.

Os autores apresentam aquilo que designam por modelo tradicional de risco, onde se assume que as consequências são proporcionais à dimensão da população nas vizinhanças do incidente (evento de que resulta a fuga de uma matéria perigosa), sendo que a dimensão desta vizinhança depende da matéria em causa. A probabilidade de ocorrência depende da substância transportada e das características da via. Calculam o risco para cada segmento de estrada como correspondendo à probabilidade de um incidente com a matéria B no segmento A a multiplicar pela população ao longo do segmento A dentro da área associada à matéria B. A área de impacto é representada como um círculo com um raio que pode ter de 0 a 7 milhas (cerca de 11 km), dizendo que o CANUTEC 1992 (Emergency Response Guidebook) indica uma área para evacuação imediata de 0,5 a 1 milha para a maioria dos incêndios com matérias perigosas. Reconhecem as limitações associadas à utilização de limites fixos mas, por falta de dados, não propõem nenhuma alternativa.

Desta forma a área de impacto é vista como um danger circle, o que permite visualizar a actividade de transporte de mercadorias perigosas como o movimento deste círculo ao longo de um percurso. O movimento do círculo define uma banda em cada um dos lados da via que é a área de possível impacto. Os autores justificam o uso do círculo

para estimar as consequências de um incidente como uma forma de ultrapassar as limitações motivadas pela falta de dados. Dão um exemplo da análise necessária para estimar com precisão o risco associado a um incidente com amónia, demonstrando que esta tarefa requer dados relativos às condições meteorológicas, à topografia, ao efeito da amónia nas pessoas e à localização destas no momento do incidente. Referem que embora isto possa ser possível para estimar o risco de um incidente específico, não é correcto generalizar os resultados obtidos a toda a rede. Assim, segundo os autores, embora seja teoricamente possível, na prática não é possível estimar com precisão as consequências de um incidente. As razões apresentadas justificam o uso do círculo, sendo este referido como um meio de apresentar o pior cenário, assumindo que cada indivíduo que resida dentro do círculo será sujeito às mesmas consequências independentemente da distância ao incidente, das condições meteorológicas, da topografia, etc.

### **Uso do ERG<sup>3</sup> e do ALOHA<sup>4</sup> para determinação de APAs na área envolvente à estação ferroviária de Vila Nova de Gaia**

Para o desenvolvimento do trabalho, utilizamos dados relativos ao transporte ferroviário de mercadorias perigosas no distrito do Porto.

---

<sup>3</sup> Manual desenvolvido pelos Transportes do Canadá, pelo Departamento de Transportes Americano e pela Secretaria de Transportes e Comunicações do México, contou ainda com a colaboração da CIQUIME (Centro de Informação Química para Emergências da Argentina).

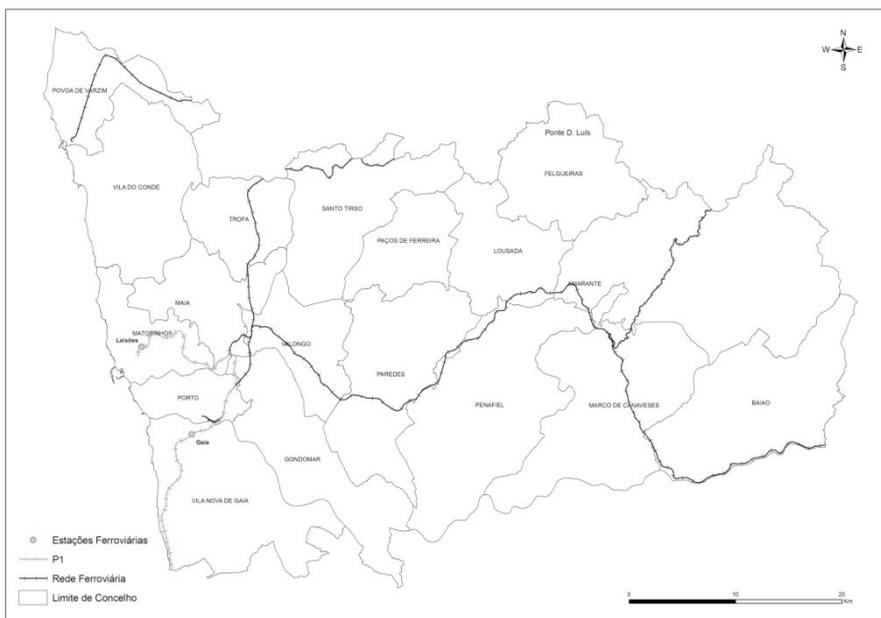
Dá instruções de intervenção na emergência e de medidas de segurança, englobando itens como riscos potenciais, segurança da população, distâncias a evacuar, entre outros, para grupos de matérias com características químicas e toxicológicas semelhantes e destina-se aos agentes dos serviços de emergência que operam no local de ocorrência de acidente com transporte de substâncias perigosas. Segundo os autores é, essencialmente, um manual destinado a identificar rapidamente os riscos associados aos materiais envolvidos no acidente, de forma a assegurar, na fase inicial de resposta, a protecção imediata das equipas de socorro e da população.

<sup>4</sup> U.S. Environmental Protection Agency.

O lanço da rede ferroviária com transito de mercadorias perigosas que atravessa o distrito, identificado como P1, tem uma extensão aproximada de 38 km, atravessa os municípios de Vila Nova de Gaia, Porto, Gondomar, Maia e Matosinhos em extensões de dimensão variável (mapa 1). Neste lanço são utilizadas as estações de Vila Nova de Gaia e de Leixões.

No período de 2003 a 2008, este lanço foi utilizado para a realização de 640 viagens a que correspondeu o transporte de 877 mercadorias perigosas.

Na tabela 1 podemos verificar que não foram transportadas matérias das classes 1 (Matérias e objectos explosivos), 6.2 (Matérias infecciosas) e 7 (Matérias radioactivas) e uqe as matérias mais vezes transportadas foram as da classe 3 (líquidos inflamáveis), seguidas das da classe 6.1 (Matérias tóxicas) e das da classe 2 (Gases).



**Mapa 1** – Identificação do lanço da Rede Ferroviária Nacional com transito de mercadorias perigosas no distrito do Porto (P1).

**Tabela 2** - Matérias transportadas e transportes efetuados por classe de matéria perigosa.

Classe <sup>5</sup>	Transportes		Matérias	
	N.º	%	N.º	%
2	125	14,25	8	7,77
3	366	41,73	29	28,16
4.1	8	0,91	7	6,80
4.2	1	0,11	1	0,97
4.3	2	0,23	1	0,97
5.1	85	9,69	8	7,77
5.2	1	0,11	1	0,97
6.1	138	15,74	19	18,45
8	82	9,35	24	23,30
9	69	7,87	5	4,85

O número de pessoas que podem ser afectadas por um incidente com matérias perigosas varia em função do dia da semana e da hora do dia. A título de exemplo, referem-se neste trabalho os horários em que foram feitas as viagens com mercadorias perigosas no ano de 2003.

---

<sup>5</sup> Classes de mercadorias perigosas do Regulamento Nacional de Transporte de Mercadorias Perigosas Por Caminho de Ferro:

Classe 1—Matérias e objectos explosivos

Classe 2—Gases

Classe 3—Líquidos inflamáveis

Classe 4.1—Matérias sólidas inflamáveis, matérias auto-reactivas e matérias explosivas dessensibilizadas sólidas

Classe 4.2—Matérias sujeitas a inflamação espontânea

Classe 4.3—Matérias que, em contacto com água, libertam gases inflamáveis

Classe 5.1—Matérias comburentes

Classe 5.2—Peróxidos orgânicos

Classe 6.1—Matérias tóxicas

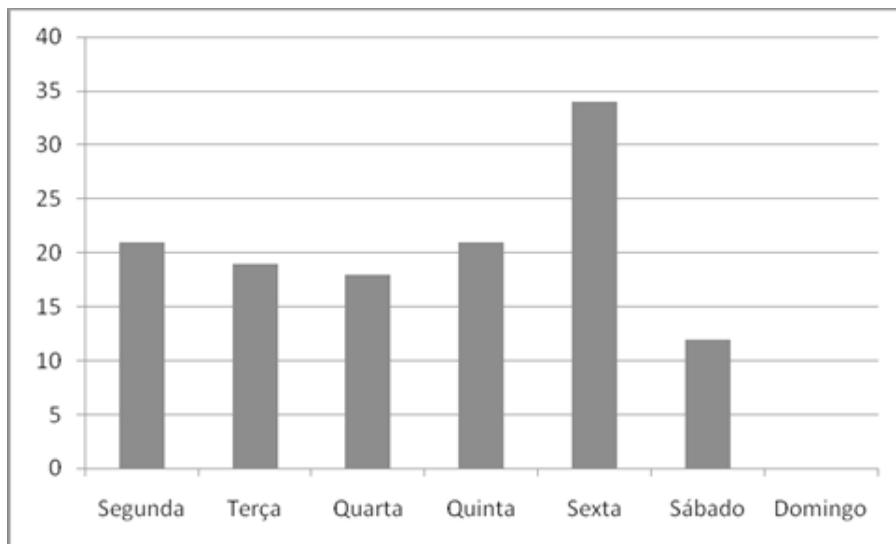
Classe 6.2—Matérias infecciosas

Classe 7—Matérias radioactivas

Classe 8—Matérias corrosivas

Classe 9—Matérias e objectos perigosos diversos

De acordo com as fichas da REFER<sup>6</sup> entregues à Proteção Civil, todos os transportes de mercadorias perigosas no distrito do Porto em 2003 foram efetuados durante a noite, num horário compreendido, aproximadamente, entre as 19 e as 9 horas. Estas viagens realizam-se todos os dias da semana, com exceção dos Domingos e feriados, sendo mais frequentes à sexta-feira (gráfico 1).



**Gráfico 1** - Número de viagens com mercadorias perigosas, por dia da semana, em 2003 no P1.

Das duas estações “utilizadas” por este percurso, a estação de Vila Nova de Gaia tem a particularidade de funcionar como local de paragem, durante períodos de tempo variáveis.

Em 2003, das 116 viagens consideradas (excluindo viagens com contentores e/ou vagões vazios por limpar e uma viagem para a qual não se conhece o horário), em 10 os comboios ficaram parados por períodos entre as 25 e as 75 horas (oito ficam parados cerca

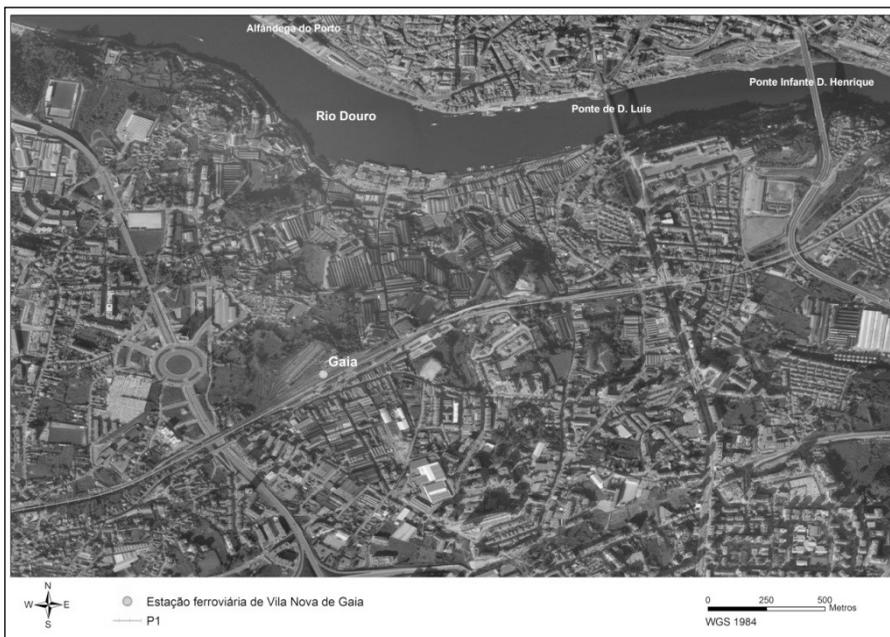
---

<sup>6</sup> Rede Ferroviária Nacional - REFER, EPE

de 48 horas, um cerca de 25 e outro cerca de 75 horas) e, em 9, houve mudança de comboio.

Embora não disponhamos de dados, é legítimo assumir que a probabilidade de ocorrência de um incidente seja maior, quer em resultado da permanência destes comboios na estação, quer devido às operações de mudança de comboio.

Assim, escolhe-se, para dimensionamento das APAs, a área envolvente à estação de Vila Nova de Gaia.



**Mapa 2** - Enquadramento da estação ferroviária de Vila Nova de Gaia.

Para este exercício, considerar-se-á o exemplo de uma matéria. As matérias transportadas nas 10 viagens com paragem na estação de Vila Nova de Gaia estão listadas na tabela 2.

**Tabela 3** - Matérias transportadas nas viagens com paragem na estação de Vila Nova de Gaia em 2003.

<b>Matéria</b>	<b>ONU</b>	<b>CLA SSE</b>	<b>N.º de TRANSPORTES</b>	<b>QUANTIDAD E MÈDIA</b>
Líquido corrosivo, inflamável, n.s.a.	2920	8	1	17000
Aerossóis	1950	2	5	19466.6
Mat. Perigosa do ponto de vista do ambiente, líquida, n.s.a.	3082	9	2	5283.5
Poliâmidas líquidas corrosivas, n.s.a.	2735	8	1	3800
Líquido inflamável, n.s.a.	1993	3	1	3800
Tintas e similares	1263	3	1	16600
Etanol em solução	1170	3	1	40578
Isopropanol	1219	3	1	7667
Adesivos	1133	3	1	7667
Amianto Branco	2590	9	1	72400

Nos modelos analisados consideram-se os valores referidos pelo Emergency Response Guidebook (ERG) para determinação da área potencialmente afetada (APA). O ERG refere medidas indicativas, não possibilitando a integração de dados relativos à topografia, à meteorologia e à quantidade de matéria transportada.

O ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) permite a introdução de valores relativos à topografia, às condições meteorológicas, à quantidade de matéria e ao tipo de fonte.

**Tabela 4** - Distâncias de evacuação ERG 2008.

<b>Matéria</b>	<b>ONU</b>	<b>GUIA ERG</b>	<b>Distância Evacuação Imediata (m) <sup>7</sup></b>	<b>Distância evacuação incêndio (m) <sup>8</sup></b>
Líquido corrosivo, inflamável, n.s.a.	2920	132	50	800
Aerossóis	1950	126	100	800
Mat. Perigosa do ponto de vista do ambiente, líquida, n.s.a.	3082	171	50	800
Poliâmidas líquidas corrosivas, n.s.a.	2735	153	50	800
Líquido inflamável, n.s.a.	1993	128	50	800
Tintas e similares	1263	128	50	800
Etanol em solução	1170	127	50	800
Isopropanol	1219	129	50	800
Adesivos	1133	128	50	800
Amianto Branco	2590	171	50	800

Das matérias transportadas nas dez viagens consideradas, escolheu-se uma que estivesse disponível na lista do ALOHA, o Isopropanol.

O isopropanol é uma matéria da classe 3 (líquidos inflamáveis), com o número de perigo 33. Neste, o primeiro dígito representa o perigo principal (inflamabilidade de matérias líquidas -vapores- e de gases ou matéria líquida auto-aquecida) e o segundo dígito o perigo secundário (propriedades inflamáveis).

O ERG2008 apresenta, para esta matéria, uma distância de evacuação imediata de 50 metros e uma distância de evacuação de 800 metros no caso de ocorrer incêndio. Podemos assumir esta última como o pior cenário.

Para a determinação da APA no ALOHA, foram introduzidos dados relativos às condições meteorológicas, topografia, matéria e quantidade transportada (figura 1). Os dados relativos às condições meteorológicas são, com exceção da direção e intensidade

---

<sup>7</sup> Em todas as direções.

<sup>8</sup> Em todas as direções.

do vento (informação do dia em que se realizou o transporte registada pela estação meteorológica de Pedras Rubras<sup>9</sup>), aleatórios devido à ausência de dados reais.

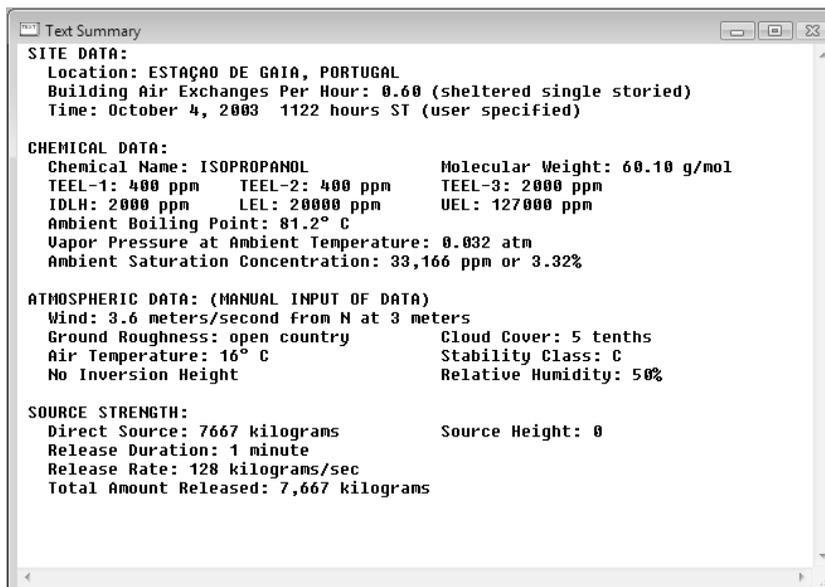


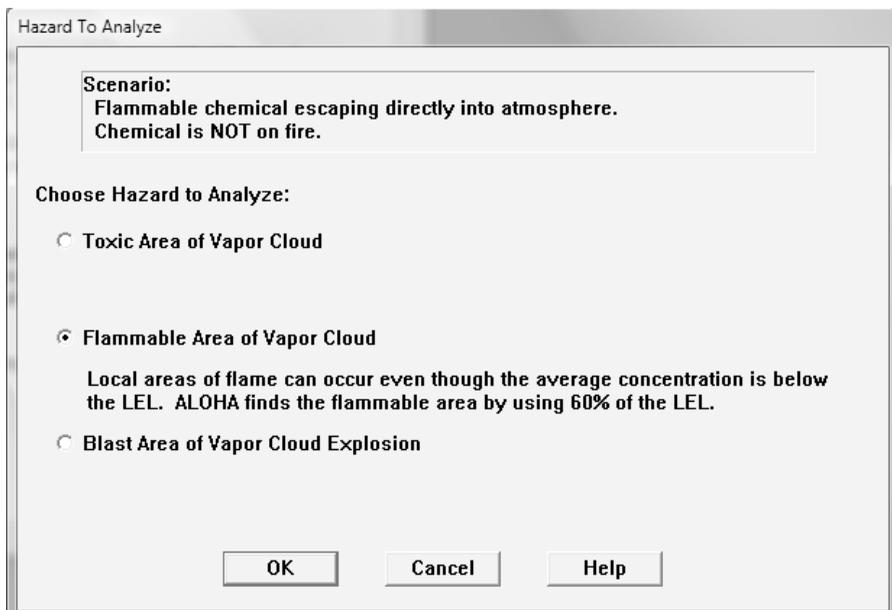
Figura 1 - Parâmetros introduzidos no ALOHA.

Com base nestes dados, o ALOHA calcula a APA em função de diferentes níveis de concentração da matéria (Level of Concern - LOC). O LOC representa o limite acima do qual pode existir perigo.

Para o cálculo da APA, o ALOHA permite que se seleccione 1 de 3 cenários (figura 2). O primeiro é a determinação da névem tóxica, no segundo é considerado um nível acima do qual pode ocorrer incêndio e o terceiro determina a área onde ocorrerá explosão (figura 2).

---

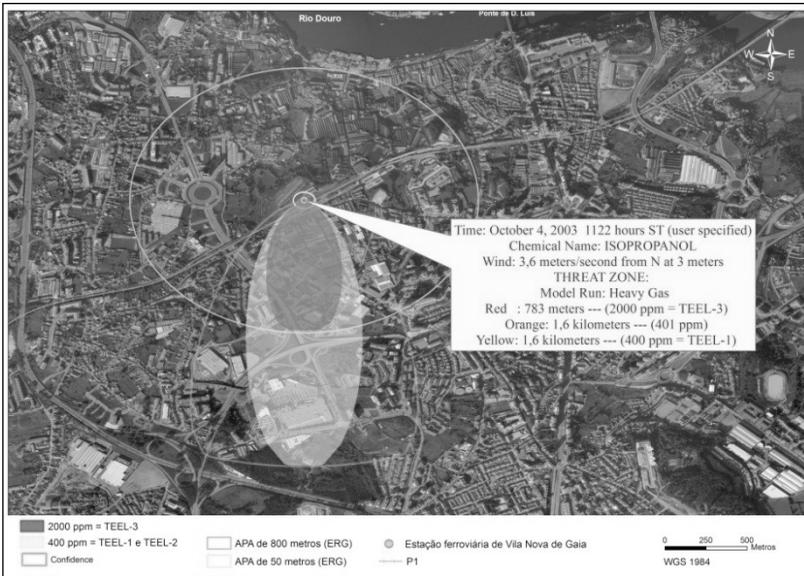
<sup>9</sup> Existe uma estação meteorológica mais perto da estação de Vila Nova de Gaia, a estação da Serra do Pilar (Instituto Geofísico, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto), de que não se obtiveram dados. Embora se assuma que as diferenças não sejam muito significativas, o ideal é inserir dados o mais precisos possível, ou seja, da estação meteorológica mais próxima.



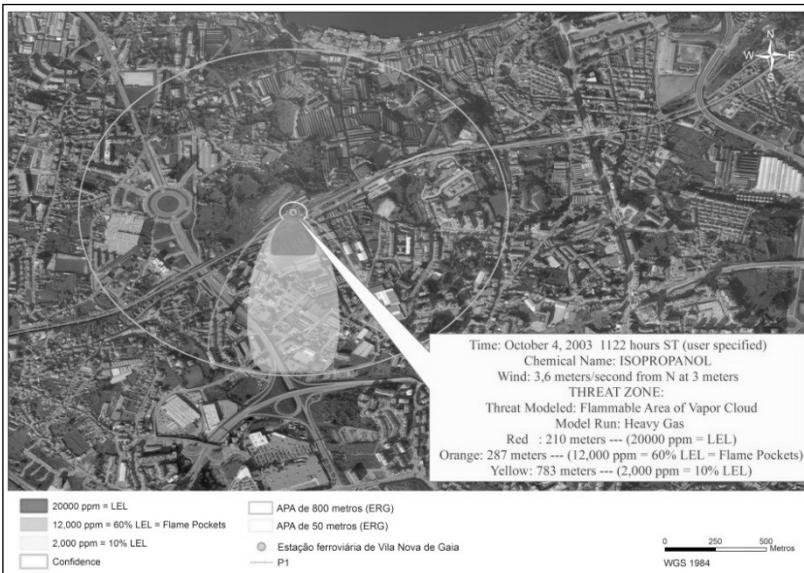
**Figura 2** - Cenários possíveis com o ALOHA.

Os mapas 3, 4 e 5, todos à mesma escala, apresentam os resultados obtidos para cada um dos cenários referidos anteriormente, e mostram a dimensão das áreas indicadas no ERG2008. Relativamente aos LOCs e a parâmetros adicionais necessários para o terceiro cenário foram mantidos os valores atribuídos por defeito pelo ALOHA.

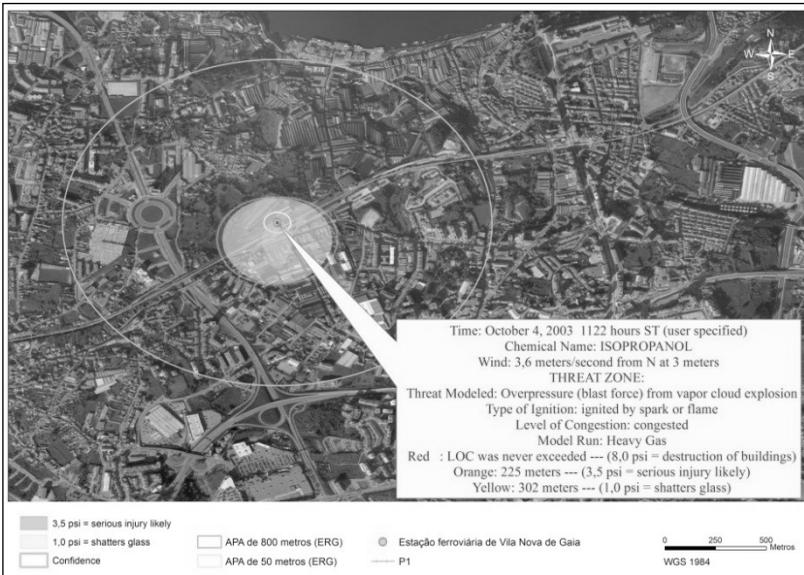
Consideramos que o segundo cenário é o que mais se aproxima das condições em que o ERG determina uma distância de 800 metros, porque prevê a possibilidade de ocorrência de incêndio.



**Mapa 3 - Cenário 1 (Toxic area of vapor cloud).**



**Mapa 4 - Cenário 2 (Flammable area of vapor cloud).**



**Mapa 5** - Cenário 3 (Blast area of vapor cloud explosion).

Tal como se observa no mapa 4, o cenário mais gravoso, representado pelos 800 metros referidos pelo ERG2008, apresenta alguma semelhança com a pluma projetada pelo ALOHA (883 metros para o nível mais baixo de concentração da matéria). Contudo, a pluma permite uma informação mais precisa das áreas expostas, na medida em que considera diferentes níveis de concentração em função da distância ao local do incidente e das características da área. Assim, e de acordo com os resultados obtidos para o cenário 2, a área onde se sentiriam os efeitos mais severos do incidente tem uma dimensão de cerca de 37000 m<sup>2</sup> e localiza-se na freguesia de Vila Nova de Gaia (Santa Marinha).

Os mapas 2, 3 e 4 mostram que o cenário 1 é aquele que afecta uma área mais extensa e o cenário 3 é o que apresenta uma área afectável de menor dimensão, mostrando que, além das características da área, das condições meteorológicas e da quantidade de matéria, também o tipo de ocorrência, variável em função de todas estas

condições e do tipo de incidente de que resultará a fuga da matéria, tem uma importância fundamental na determinação das APAs.

## **Conclusão**

Este exercício de comparação dos resultados obtidos com duas das mais utilizadas ferramentas para determinação de APA permite concluir da complexidade desta matéria.

O ERG simplifica uma parte dos modelos de avaliação do risco pelo facto de dar indicações, aceites como válidas para a maioria dos autores referidos no texto, sobre as áreas a evacuar em caso de acidente, permitindo assumir que a consideração dos valores mais elevados (800 metros no exemplo) assegura todos os cenários, ou seja, assumindo estes valores como o pior cenário, todos os restantes estarão considerados.

Isto, como se observa no nosso exemplo, não corresponde à realidade. Como vimos (mapa 2), a extensão da névum tóxica tem cerca do dobro da área considerada pelo ERG2008.

Embora alguns autores, como se referiu, utilizam estes valores, argumentando que representam o pior cenário, justificam esta utilização com a falta de dados de que, referem, resulta a inoperacionalidade de ferramentas como o ALOHA. Por exemplo, ERKUT e VERTER (1998), embora não referindo concretamente o ALOHA, justificam o uso do chamado *danger circle*, cujo raio é dado pelos valores referenciados pelo ERG2008, com a ausência de dados precisos relativamente ao tipo e quantidade de matéria transportada, às condições meteorológicas, à topografia, ao efeito da substância transportada nas pessoas e à localização destas no momento do incidente.

Concordamos que é inviável produzir todos os cenários possibilitados pelo ALOHA e introduzir esses resultados num modelo preciso de avaliação do risco. Mas, resulta também evidente que a indicação dada pelo ERG é, para esta questão, muito pouco precisa.

Como objectivo para o desenvolvimento deste trabalho, propomo-nos confrontar os resultados aqui analisados com as abordagens de VERMA e VERTER (2007), ERKUT, TJANDRA e VERTER (2007), VERMA e VERTER (2009) e VERMA (2009).

Consideramos ainda como objectivo trabalhar a possibilidade de incluir na análise dados relativos à topografia (muito poucos no ALOHA) e à hidrologia (inexistentes no ALOHA), estudando, para isso, a forma como estas variáveis podem influir na determinação da APA em resultado de um incidente com transporte de mercadorias perigosas.

## Bibliografia

- ALOHA – Manual de utilizador. 2007, U.S. Environmental Protection Agency e National OCEANIC and Atmospheric Administration.
- BAtta, , R. e CHIU, S. S. (1988). Optimal Obnoxious Paths on a Network: Transportation of Hazardous Materials. *Operations Research*, 36, 84–92.
- Emergency Response Guidebook (2008). Secretariat of Transport and Communications, Canadá.
- Erkut, E., & Verter, V. (1995). A framework for hazardous materials transport risk assessment. *Risk Analysis*, 15, pp. 589-601.
- Erkut, E., & Verter, V. (1998). Modeling of Transport Risk for Hazardous Materials. *Operations Research* , pp. 624-642.
- Erkut, E., Tjandra, S. A., & Verter, V. (2007). *Hazardous Materials Transportation*. (Vol. 14). (C. B. Laporte, Ed.) Elsevier.
- Guo, X. & Verma, M (2009). Choosing vehicle capacity to minimize risk for transporting flammable materials. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* (article in press).
- Hillsman, E. L. e Coleman, P. R. (1989). Integrating Demographic, Atmospheric, and Dose Information to Estimate Effects from Accidental Release of Chemical Agents," *Env. Prof.* 11, 354-366.
- Julião, R.P.; Nery, F.; Ribeiro, J.L.; Castelo Branco, M.; Zêzere, J.L. (2009) – Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica de base municipal. Autoridade Nacional de Proteção Civil, Direção Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano, Instituto Geográfico Português.
- Verma, M., & Verter, V. (2007). Railroad transportation of dangerous goods: Population exposure to airborne toxins. *Computers & Operations Research*, 34, pp. 1287-1303.
- Verma, M., & Verter, V. (2009). A lead-time based approach for planning rail-truck intermodal transportation of dangerous goods. *European Journal of Operational Research* , pp. 1-11.
- Verma, M. (2009). A Cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials. *Transportation ResearchPart D*, 14, pp. 300-308.