

5

Avaliação do Risco no Transporte de Materiais Perigosos

Segundo Andrés Bronfman (2004), os riscos associados a esta atividade fazem do planejamento do transporte de MP um problema complicado. Mesmo que a maior parte dos aspectos analíticos existentes centrem-se no risco, não existe um tipo de acordo entre os pesquisadores sobre como fazer a modelagem. No entanto, existe uma concordância em que este risco tenha uma estreita relação com a probabilidade e a consequência de um “sucesso indesejável”. O sucesso indesejável é considerado, para o caso do transporte de MP, aquele evento que resulta em um derrame de material, que pode ser denominado de incidência.

Ainda que seja possível uma grande quantidade de consequências indesejáveis, tais como danos ambientais, perdas econômicas e lesões, a maioria das literaturas de avaliação de risco se concentra nas fatalidades decorrente de uma liberação de MP. Mesmo que esse enfoque simplifique a avaliação do risco, seu resultado final pode estar longe de representar o risco absoluto de uma atividade potencialmente perigosa. Além disso, a quantificação do número de fatalidades como resultado de um incidente é absolutamente difícil posto que, para a maioria dos MP, o impacto direto em vidas humanas não é conhecido.

Desse modo, para muitas decisões estratégicas de gestão de MP seria mais apropriado uma comparação de riscos relativos do que uma quantificação do risco absoluto de cada alternativa de decisão.

5.1

Estimação das Conseqüências

Para as finalidades deste estudo, a consequência é medida segundo o potencial de causar fatalidades, e que pode ser estimado usando o conceito de λ - vizinhança desenvolvido por Batta e Chiu (1988), o qual estabelece que caso ocorra um acidente de liberação no traslado de MP, o material derramado terá um raio de dispersão λ que depende, entre outros fatores, das propriedades físicas e

químicas da substância em questão. A área determinada pelo raio λ corresponde a Área de Impacto para o MP em consideração, e a população que vive dentro deste raio será chamada de população exposta, aquela que poderia ser afetada pelo derrame do material (veja figura 5.1)

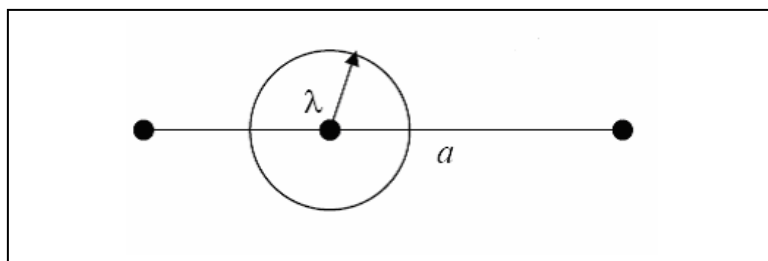


Figura 5.1: Área de Impacto sobre um arco a e conceito de λ -vizinhança

Se a área de impacto é inspecionada como uma área de perigo, pode-se visualizar na figura 5.2 a atividade de transporte de MP como o movimento desta área ao longo de uma rota em uma rede de caminhos desde uma origem a um destino. Esse movimento para ambos os lados da rota representa a região de possíveis impactos, ou seja, Área Potencialmente Exposta. E a população dentro dessa região será a População Potencialmente Exposta aos riscos de uma incidência.

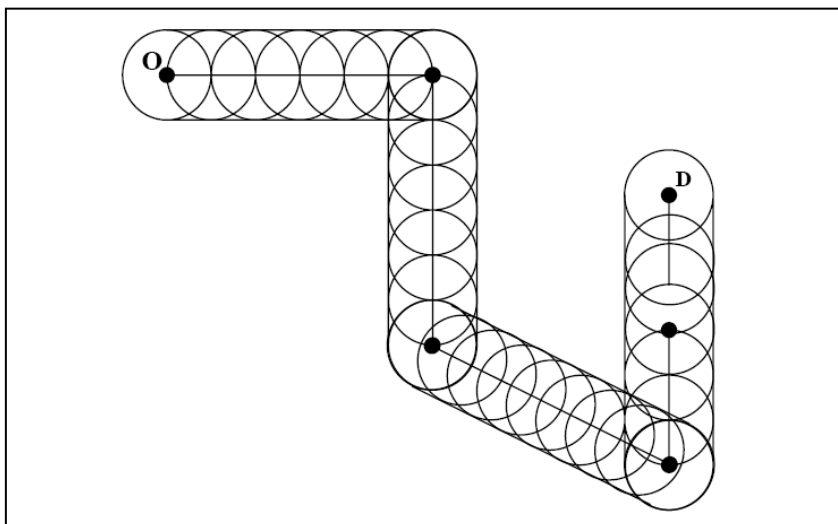


Figura 5.2: Área Potencialmente Exposta entre um para $O-D$

Além disso, a Área Potencialmente Exposta pode fazer parte de diferentes zonas ou centros populacionais já antes geograficamente especificadas pela região (cidade ou município) onde se realiza o transporte de MP. Essa situação está ilustrada na figura 5.3.

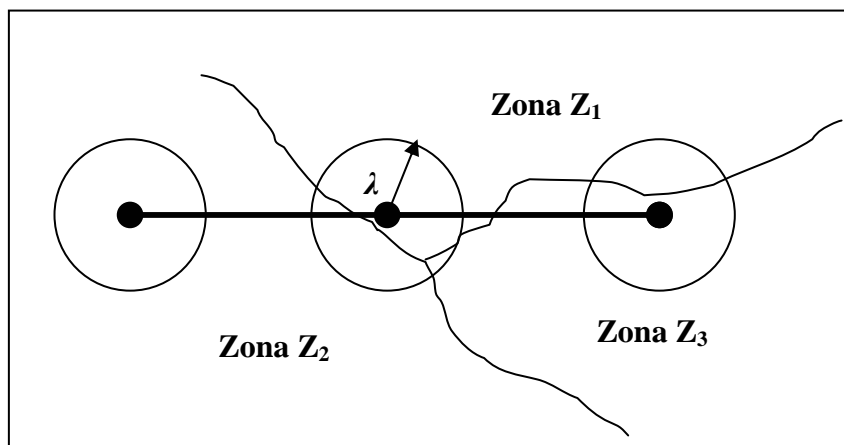


Figura 5.3: Especificação das Zonas Geográficas

Como ilustração, considere o modelo do efeito de um derrame de um recipiente com gás de cloro apresentado por Saccomano e Shortreed (1993). Para estimar corretamente o número de fatalidades devido a esta liberação, requer-se estimar a concentração do gás em função do valor e tipo de derrame, a distância ao recipiente, a velocidade e direção do vento e a topografia da região, além de requerer-se avaliar a probabilidade de uma fatalidade humana em função da concentração do gás a uma distância dada do incidente. Finalmente, multiplicando estas probabilidades pelo número de pessoas que vivem ou estão a diferentes distâncias do derrame e agregando-as, é possível encontrar o número esperado de fatalidades (consequência esperada) como resultado desta incidência.

É possível perceber que este processo de estimação demanda muita informação. Requer um conhecimento preciso da topografia e condições meteorológicas, do efeito do gás de cloro sobre seres humanos e da localização dos indivíduos no momento do derrame. Ainda que seja provável estimar o risco para uma incidência específica (fixando os parâmetros do modelo, tal como a direção do vento no lugar do derrame), é pouco realista gerar todas estas informações para todos os arcos de uma rede de transporte e para diferentes tipos de MP a transportar, além de não serem conhecidos os efeitos na saúde ou na vida de um ser humano com o contato com algumas substâncias perigosas. Ainda que teoricamente viável, é praticamente impossível obter-se uma estimação precisa das consequências de uma incidência. Portanto, o uso do conceito de λ -vizinhança no modelo de risco se torna necessário. Isto pode ser percebido num cenário de “pior caso”, onde se assume que cada indivíduo que se encontra na área

de impacto estará sujeito às mesmas conseqüências indesejáveis (morte, no pior dos casos) sem considerar a distância à incidência, condições meteorológicas e topográficas, dentre outras características.

5.2 Eqüidade na Roteirização de Materiais Perigosos

A avaliação da magnitude do risco imposto ao público pelas atividades que envolvem MP é o primeiro passo até o desenvolvimento de um modelo analítico para sua gestão. No entanto, alguns autores estabelecem a necessidade de considerar o problema de eqüidade no transporte de tais materiais. A eqüidade implica a distribuição justa dos impactos como resultado de uma decisão política entre os membros do público. Num contexto logístico, a eqüidade, segundo Andrés Broffman (2004), corresponde à imparcialidade na distribuição do risco. Um exemplo de iniquidade é sobrecarregar um pequeno segmento da sociedade com os riscos associados aos MP, enquanto que um grande grupo de pessoas não é atingido por esse risco e se beneficia das vantagens das atividades que implicam estes materiais.

5.3 Métodos de Avaliação do Risco

Seja um exemplo de um arco (i, j) , onde sua λ -vizinhança pode potencialmente causar perigo a três zonas, como mostra a figura 5.4. A função de *risco* (x, y) é definida por um sistema de coordenadas cartesianas na vizinhança encontrada. Assim, o risco computado para uma zona (Z_k) por viajar em um arco a é:

$$\rho_{Z_k}(a) = \iint_{A_k} \text{risco}(x, y) dx dy \quad \forall a \in A \quad (5.1)$$

para $k = 1, 2, 3$. O risco de viajar pelo arco (i, j) , C_a , pode ser mostrada como,

$$C_a = \rho_{Z_1}(a) + \rho_{Z_2}(a) + \rho_{Z_3}(a) \quad \forall a \in A \quad (5.2)$$

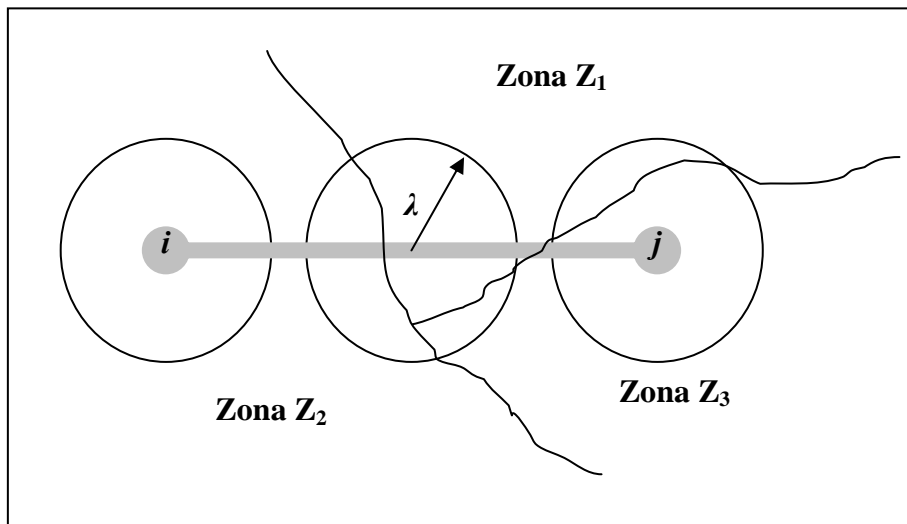


Figura 5.4: A vizinhança de um arco e a propagação do risco entre as zonas.

Com esses dados, é possível propor uma formulação para equidade na distribuição do risco.

5.3.1 Equidade na distribuição do Risco

Para formular um problema de equidade na distribuição do risco, Gopalan et al. (1990) consideram que uma região geográfica, onde se encontra a rede de transporte, é separada em K zonas. Também é definido que um par de zonas é representado como um par ordenado, por exemplo, (Z_u, Z_v) . Com essas considerações, o objetivo é minimizar o risco total, mantendo a diferença do risco entre cada par de zona multiplicada pelo fluxo no arco, dentro de um limite superior de parâmetro de equidade (θ).

A formulação que segue pode ser chamada de *Restrição de Gopalan*,

$$\sum_{\forall a \in A} (\rho_{Z_u}(a) - \rho_{Z_v}(a)) f_a \leq \theta \quad \forall u, v = 1, 2, \dots, K \quad (5.3)$$

onde K é o número de zonas.

Desse modo, a *Restrição de Gopalan* pode ser incluída no modelo de roteirização até então proposto. Sendo chamado de PRM_I o modelo que segue, tem-se:

$$PRM_I) \text{ Minimizar } \frac{\sum_{a \in A} (p_a C_a) f_a}{\sum_{a \in A} p_a f_a} \quad (5.4)$$

Sujeito a:

$$\sum_{a \in F(i)} f_a - \sum_{a \in E(i)} f_a = \begin{cases} T_{OD}, & \text{se } i \equiv O \\ -T_{OD}, & \text{se } i \equiv D \quad \forall i \in N \\ 0, & \forall i \text{ se não} \end{cases} \quad (5.5)$$

$$\sum_{a \in A} p_a f_a \leq \phi \quad (5.6)$$

$$\sum_{a \in A} (p_a C_a) f_a \leq \varphi \quad (5.7)$$

$$\sum_{a \in A} (\rho_{Z_u}(a) - \rho_{Z_v}(a)) f_a \leq \theta \quad \forall u, v = 1, 2, \dots, K \quad (5.8)$$

$$f \equiv (f_a : a \in A) \in F \quad (5.9)$$

$$f_a \geq 0 \quad \forall a \in A \quad (5.10)$$

O item seguinte mostra que, através da discussão sobre quanto pode ser o risco e se o MP produz o mesmo risco em cada zona da região, é possível melhorar a aproximação de Gopalan et al. (1990) mostrada acima.

5.3.2 Incorporação de Graus ou Níveis de Risco

Nos itens anteriores foram abordados os temas de estimação de probabilidades e de conseqüências e a avaliação do risco, considerando eventos de Baixa Probabilidade-Alta Conseqüência, estendendo esses conceitos ao transporte de múltiplos embarques através de um conjunto de rotas (PRM). No entanto, não foi avaliado o grau ou nível de risco que envolve o transporte de cada material.

O desenvolvimento de um sistema efetivo para a roteirização de embarques de MP depende do conhecimento e avaliação da natureza do risco. A ameaça ou perigo associado a um material corresponderá à severidade do dano pela eventual

exposição ao incidente. Dessa maneira, o propósito de proporcionar medidas (graus) de risco é abastecer o problema com dados empíricos para que o processo subjetivo de avaliar a segurança relativa de diversas opções possa desempenhar-se sobre uma base bem informada.

Portanto, o objetivo é determinar o grau do risco associado ao transporte de um dado MP, permitindo desta forma avaliar comparativamente as distintas alternativas de distribuição do MP a ser transportado.

Como exemplo prático, tem-se dois tipos de materiais, um com baixo perigo e o outro que alto perigo, mas que possuem o mesmo raio de propagação (λ - vizinhança). Mas como possuem diferentes perigos, podem afetar uma área maior (figura 5.5). Seja β o índice de perigo de cada tipo de MP.

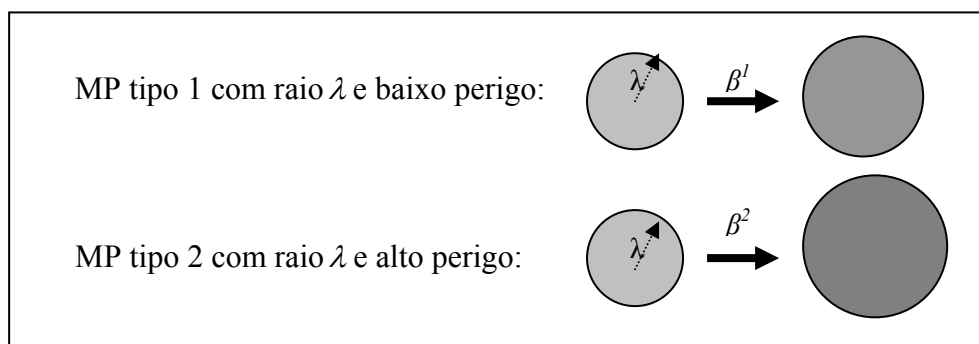


Figura 5.5: Grau de Risco para um dado MP h

Como resultado, é possível definir uma expressão que permita estimar o grau ou nível de risco (GR^h) associado a um carregamento de MP tipo h .

$$GR^h = \beta^h \pi(\lambda^h)^2 \quad (5.11)$$

Onde:

λ^h : Raio de evacuação ou raio da área de impacto por um derramamento de MP tipo h .

β^h : Índice de periculosidade do MP tipo h (danos/acidente).

A expressão (5.11) mede o grau de risco associado ao transporte de um material através do índice de perigo por área de exposição. Assim, quanto maior o valor de λ , maior será a área de impacto e maior a população ameaçada. Por

outro lado, um valor alto de β representará uma periculosidade maior para a população.

Conseqüentemente, é definido GRR^h como o Grau de Risco Relativo associado uma carregamento de MP tipo h em relação ao mínimo GR^h , para todo $h \in H$, onde H é o conjunto de materiais perigosos.

$$GRR^h = \frac{GR^h}{\min_{h \in H} \{GR^h\}} \quad (5.12)$$

Devido a que o grau de risco (GR) contém uma componente que mede a distância de evacuação para cada classe de MP (como um indicador da população potencialmente afetada por um incidente) e uma componente que mede a periculosidade relativa da cada classe de MP (como um indicador de potencial severidade do incidente), é possível considerar o grau do risco exposto por cada tipo de material transportado sobre uma zona como parte de uma avaliação final do risco.

Como neste trabalho a aplicação proposta envolve somente um tipo de MP, o grau de risco relativo é igual a 1.

5.3.3 Valor Prático para a função do Risco

Neste item será definida uma função constante de risco levando em consideração as dimensões espaciais que podem ser atingidas caso ocorra um acidente. Esta função é baseada na expressão do risco de uma zona (Z_k) por passar pelo arco a de Gopalan, Kolluri and Karwan (1990).

Da expressão 5.1, tem-se:

$$\rho_{Z_k}(a) = \iint_{A_k} risk(x, y) dx dy \quad \forall a \in A$$

Como a expressão matemática acima calcula a área de uma dada figura em x e y e, neste caso, a vizinhança de um arco é considerada como uma figura geométrica, é possível definir uma função de risco para uma zona (Z_k) por passar pelo arco a .

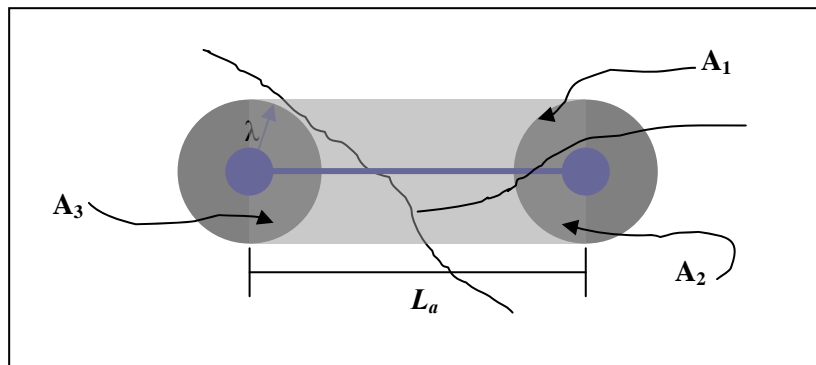


Figura 5.6: A vizinhança de um arco a

$$\rho_{Z_k}(a) = (2\lambda L_a + \pi\lambda^2) \times d_k \times \delta_{ak} \quad \forall a \in A \quad (5.13)$$

Onde:

d_k : densidade demográfica associada a zona Z_k .

L_a : comprimento do arco a .

δ_{ak} : porcentagem da zona Z_k no arco a .

$(2\lambda L_a + \pi\lambda^2)$: soma da área de um retângulo e da área de uma circunferência.

Pode-se também considerar a expressão acima como sendo a população potencialmente exposta aos riscos do transporte de MP sobre um arco a . O item seguinte define um parâmetro chamado *Baseline Risk*.

5.3.4 Baseline Risk

A aceitabilidade e equidade do risco podem ser analisadas e medidas também através da *Baseline Risk* (B_k). Este fator é um parâmetro de zonas que representa a existência de um risco já presente em cada zona, por exemplo, a

existência de uma planta de tratamento de resíduos perigosos ou uma indústria de petróleo e gás.

Notar que este último suposto se realiza a nível zonal e não ao nível de indivíduos. Existe clara evidencia de que a aceitabilidade individual frente a um evento de risco difere entre as pessoas. No entanto, o objetivo aqui é estabelecer um risco máximo aceitável para cada centro populacional que permita representar as características do modelo de roteirização, encontrando-se fora do alcance deste estudo estabelecer uma metodologia para a estimação da aceitabilidade de diferentes grupos de indivíduos frente aos riscos associados ao transporte de materiais perigosos.

Usando o parâmetro *baseline risk*, pode-se obter uma nova restrição de equidade para o modelo de roteirização proposto que considera somente um tipo de MP. Obtém-se então:

$$\sum_{a \in Z_k} GRR \ x(2\lambda L_a + \pi(\lambda)^2) \ x \ d_k \ x \delta_{ak} + B_k \leq \theta \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (5.14)$$

como o GRR para um tipo de MP é igual a 1, tem-se:

$$\sum_{a \in Z_k} (2\lambda L_a + \pi(\lambda)^2) \ x \ d_k \ x \delta_{ak} + B_k \leq \theta \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (6.15)$$

O valor de θ é um parâmetro de aceitabilidade zonal para todo $k \in K$ e essa restrição pode representar a aceitabilidade zonal e equidade do risco.

Desse modo é possível modificar o problema PRM_1 incorporando as definições apresentadas acima.

$$PRM_2) \text{ Minimizar } \frac{\sum_{a \in A} (p_a c_a) f_a}{\sum_{a \in A} p_a f_a} \quad (6.16)$$

Sujeito a:

$$\sum_{a \in F(i)} f_a - \sum_{a \in E(i)} f_a = \begin{cases} T_{OD}, & \text{se } i \equiv O \\ -T_{OD}, & \text{se } i \equiv D \\ 0, & \forall i \text{ se não} \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (6.17)$$

$$\sum_{a \in A} p_a f_a \leq \phi \quad (6.18)$$

$$\sum_{a \in A} (p_a C_a) f_a \leq \varphi \quad (6.19)$$

$$\sum_{a \in Z_k} \rho_{Z_k}(a) + B_k \leq \theta \quad \forall k = 1, \dots, K \quad (6.20)$$

$$f \equiv (f_a : a \in A) \in F \quad (6.21)$$

$$f_a \geq 0 \quad \forall a \in A \quad (6.10)$$

Ao longo desse trabalho é possível perceber que uma característica do problema de roteirização para materiais perigosos é a existência de múltiplos objetivos conflitantes. Ou seja, uma rota que minimiza o risco pode não coincidir com a rota que minimiza o custo de operação de um caminhão, ou com a rota que minimiza o risco imposto a categorias especiais de populações.

Na tentativa de encontrar pontos de equilíbrio entre os objetivos que envolvem o transporte de MP, será desenvolvida uma aplicação prática do problema multiobjetivo (PM) que será apresentado no capítulo seguinte.

A consideração de múltiplos objetivos em modelos de roteirização de materiais perigosos pode ser vantajosa, pois permite analisar estratégias de roteirização que representam os interesses de vários grupos afetados pelo transporte de MP, por exemplo, grupos de residentes, de indústrias, frota etc.

5.4 Aplicação Numérica

Dada a importância do transporte de materiais perigosos na segurança populacional, na conservação do meio ambiente e para as indústrias, como foi discutido neste trabalho, é proposto como aplicação, um exemplo numérico considerando a distribuição de combustíveis. Como mencionado anteriormente, o exemplo aborda somente um tipo de material perigoso (inflamável) desde uma única origem a um único destino.