

O Tratamento do Espaço em Modelos de Interação Espacial – Considerações sobre a determinação das oportunidades intervenientes

Ismael Ulysséa Neto ¹
Nilo Kühlkamp ²

¹ Departamento de Engenharia Civil - UFSC
✉ ecv1iun@ecv.ufsc.br

² Departamento de Matemática – UFSC

Conteúdo	<ol style="list-style-type: none"> 1. Introdução 2. Modelos de Interação Espacial 3. Grafos e Redes Viárias 4. Modelos de Distribuição de Viagens <ol style="list-style-type: none"> 4.1 Considerações Gerais 4.2 Modelos de oportunidades intervenientes 5. As Oportunidades Intervenientes e as Interações Espaciais 6. Os Modelos de Oportunidades Intervenientes e os Sistemas de Informações Geográficas 7. Referências Bibliográficas
-----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Resumo : Há muitos anos, pesquisadores, planejadores e administradores urbanos reconhecem a importância dos estudos relacionados com a estrutura urbana e seu interrelacionamento com a movimentação de pessoas (viagens) em áreas urbanas.

Inicialmente, os autores fazem uma análise da sensibilidade dos principais modelos de demanda de viagens (gravitacional e oportunidades intervenientes), aos efeitos da impedância à realização de viagens decorrente da separação entre as zonas de tráfego, seguida de uma abordagem mais detalhada das maneiras alternativas de definir as oportunidades intervenientes entre os pares de origem-destino (O-D).

Constata-se que os modelos tradicionais de oportunidades intervenientes padecem da inconsistência teórica de não levar em conta as posições espaciais relativas das oportunidades intervenientes, fornecendo assim estimativas errôneas do número de viagens entre os potenciais pares de O-D.

Conclui-se que uma nova maneira de considerar o conjunto de oportunidades intervenientes deve ser buscada, juntamente com a dedução de um novo modelo de interação espacial. Finalmente, são apresentados comentários prospectivos sobre as possibilidades de uso de SIG na determinação de matrizes de oportunidades intervenientes.

Palavras Chave : Interação Espacial; Viagens; Modelos; Oportunidades Intervenientes

Abstract : For many years urban researchers, planners and administrators have acknowledged the importance of the study of urban structure and its relationship with people movement patterns in urban areas.

Initially, the authors present an analysis of the main travel demand models (gravity and intervening opportunities), regarding the friction effects of the spatial separation between traffic zones on trip making, followed by a closer view of the alternative ways of defining the intervening opportunities between origin-destination pairs of zones.

It is argued that the conventional intervening opportunities model suffers from a theoretical flaw of not taking into account the relative spatial position of such intervening opportunities, leading, thus, to imprecise estimations on the number of trips between the O-D zones.

It is concluded that a new way of defining the sets of intervening opportunities should be pursued, together with the development of a new demand model. Finally, some prospective comments on the convenience of one using a GIS software to identify an intervening opportunities matrix for the study area, are presented.

Key words : Spatial Interaction; Trips; Models; Intervening Opportunities

1. Introdução

Propor e empreender ações, relativas à ocupação e ao uso do solo urbano, visando oferecer melhores condições de vida à população, é preocupação antiga de pesquisadores e administradores.

As diferentes atividades humanas desenvolvidas no meio urbano em áreas geográficas (zonas) distintas, dão origem às interações espaciais entre estas unidades espaciais de análise. Estas interações, por seu turno, se materializam através dos mais variados fluxos que surgem entre as zonas, como, por exemplo: deslocamentos (viagens) de pessoas; deslocamentos de mercadorias; circulação de jornais, revistas e correspondências em geral; ligações telefônicas; transmissão de informações via fax ou internet e até a realização de negócios (compra e venda de mercadorias) via rede telefônica ou de computadores.

Os congestionamentos e os acidentes de trânsito, as linhas telefônicas ocupadas, a baixa velocidade de transmissão de dados através das redes de computadores, bem como a dificuldade ou impossibilidade de conexão (em determinados horários) a estas redes, são, em grande parte, devidos à falta de um planejamento adequado das vias de transporte e comunicação. Neste contexto, a previsão de viagens, de ligações telefônicas, de conexões à rede de computadores, etc., torna-se importante na medida em que

orienta a alocação de investimentos na manutenção e na expansão da infra-estrutura urbana. A relevância prática da modelagem matemática da demanda de viagens é incontestável e de longa data reconhecida, tanto por pesquisadores como pelas pessoas envolvidas na administração pública, e preocupadas em oferecer melhores condições de vida à população.

As unidades espaciais de análise (UEA) que são utilizadas nos estudos de demanda de viagens, são áreas geográficas definidas para este fim, mediante critérios associados às especificidades dos deslocamentos realizados na área de estudo. Tais UEA's são tradicionalmente chamadas de zonas de tráfego.

Neste trabalho, nos ateremos à questão da previsão da demanda de viagens de pessoas entre as zonas de tráfego, como resultado das interações espaciais que ocorrem entre as mesmas e analisaremos como a questão da consideração do espaço, enquanto fator de impedância às interações espaciais, é tratada no âmbito da especificação dos modelos de interação espacial utilizados na modelagem da demanda de viagens.

2. Modelos de Interação Espacial

A maioria dos modelos de interação espacial voltados para a área de transporte, busca descrever os padrões de viagens de pessoas de forma *agregada*, isto é, visa obter uma estimativa da demanda de viagens de forma coletiva. Estes modelos visam propiciar uma melhor compreensão e avaliação dos complexos sistemas de transporte, permitindo, assim, que as ações implementadas em relação aos mesmos possam realmente trazer benefícios para os usuários.

Quanto mais precisas e confiáveis forem as previsões, melhor será o planejamento que se poderá fazer a partir delas. A busca e o aperfeiçoamento de métodos aplicáveis na solução de problemas práticos (quer seja no seio do atual paradigma, quer seja num novo paradigma) foi, e continuará sendo, um desafio para os pesquisadores.

Para analisar os movimentos de pessoas numa área de estudo, esta é dividida em conjunto exaustivo de sub-áreas chamadas zonas de tráfego. Cada zona, por seu turno, é representada por um ponto, chamado centróide. Para efeitos de operacionalização, considera-se que os centróides são os pontos onde se originam e para onde se destinam as viagens realizadas na área de estudo.

O número de viagens que tem início numa zona i , genérica, é representado por O_i , o número de viagens que se destinam a uma zona j , genérica, é representado por D_j e o número de viagens com origem numa zona i e destino numa zona j é representado por T_{ij} .

O número de viagens entre os pares de zonas que compõem uma área de estudo, num determinado intervalo de tempo, é representado numa matriz, chamada matriz origem-destino (O-D). Esta matriz O-D é representada por $[T_{ij}]$, e tem como elemento genérico posicionado na interseção da linha i com a coluna j , o número T_{ij} das viagens com origem na zona i e destino na zona j . Assim

$$[T_{ij}] = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & \dots & T_{1n} \\ T_{21} & T_{22} & \dots & T_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{n1} & T_{n2} & \dots & T_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

é a matriz de todas as viagens ocorridas num certo intervalo de tempo entre as n zonas de tráfego da área de estudo.

3. Grafos e Redes Viárias

Na medida em que um grafo constitui-se num conjunto não vazio de nós e um conjunto de arestas (*links*) que ligam pares ordenados de nós, a associação, por analogia, de uma rede viária, seja urbana ou não, com um grafo é imediata. Os pontos de cruzamento correspondem aos nós e cada segmento da rede viária que liga dois pontos de cruzamento de uma forma direta, isto é, sem passar por outro cruzamento, é identificado com um *link*.

Convencionalmente, uma via de sentido único é representada por um *link* orientado (com uma seta) e as vias de dois sentidos são representadas por *links* sem orientação.

Num grafo pode-se associar um 'peso' a cada *link*, e quando um grafo representa uma rede viária este 'peso' pode ser considerado como sendo, por exemplo, a distância, ou o tempo de viagem ou uma medida de custo generalizado de viagem no respectivo percurso. A Figura 1 apresenta um grafo no qual se associou um 'peso' a cada *link*.

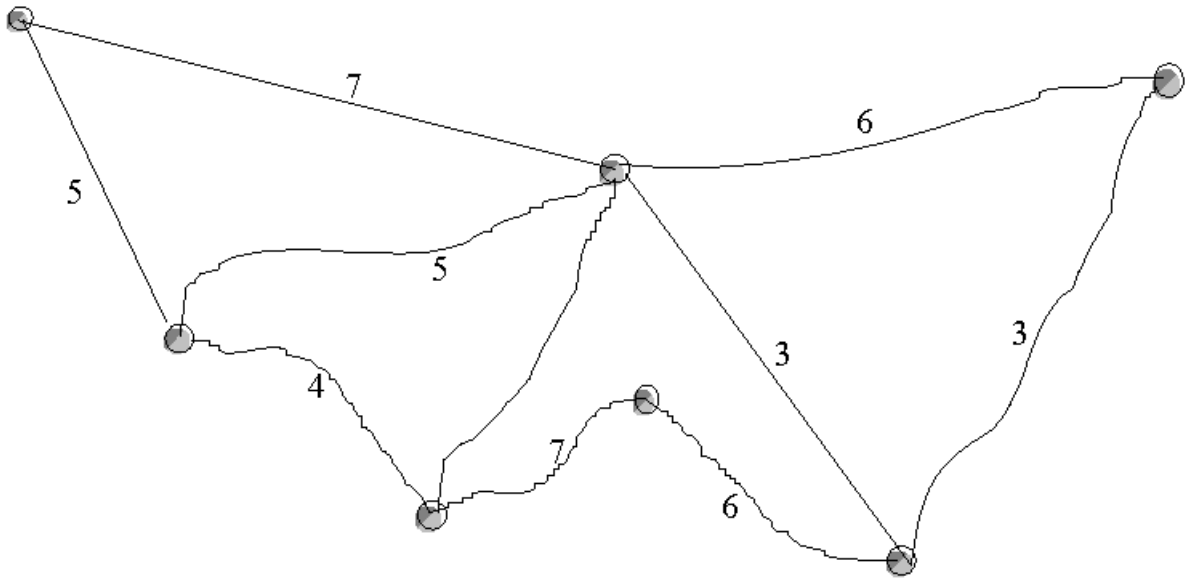


Figura 1 : Ilustração de grafo com pesos atribuídos aos *links*.

Num grafo, um caminho entre dois nós é uma seqüência conexa de *links* que os interliga. Também este conceito se transfere de maneira natural para uma rede viária. A estreita ligação entre os grafos e as redes viárias, permite representarmos uma rede viária através de um grafo, construído de acordo com das correspondências aqui descritas.

4. Modelos de Distribuição de Viagens

4.1 Considerações gerais

Os modelos de distribuição de viagens determinam os elementos T_{ij} da matriz O-D fazendo a distribuição da totalidade das viagens geradas em cada zona de tráfego i , entre os vários destinos alternativos que são as zonas j . Esta distribuição é feita através da confrontação entre as atratividades exercidas pelos diversos destinos possíveis e fatores de impedância como a distância, o tempo ou o custo generalizado de viagem entre a zona de origem i e cada zona de destino j .

Os fatores de propensão à interação entre as zonas i e j são representados pelo número total de viagens originadas na zona i (O_i) e o número total de viagens atraídas pela zona j (D_j), respectivamente. Com relação aos efeitos de impedância, contudo, sua especificação envolve considerações sobre o tratamento do espaço (separação física entre os potenciais pares de origem-destino) que não são triviais. Zipf (1949) já fazia a distinção entre diferentes efeitos de impedância à realização de viagens. Os efeitos de impedância identificados por Zipf relacionam-se com a diminuição da percepção da oferta de bens e serviços disponível em zonas mais distantes do potencial consumidor e com a influência dos custos de viagem entre este último e as zonas de oferta (vide Ulysséa Neto, 1990). Um terceiro efeito de impedância surge quando, além dos efeitos da separação física entre as zonas de origem e destino, considera-se também o efeito das oportunidades intervenientes entre os pares de zonas. Foi Stouffer (1940) quem pela primeira vez evidenciou este terceiro efeito, tendo seu embasamento teórico formal sido feito posteriormente (Harris, 1964; Schneider, 1959; Wilson, 1967 e Wilson, 1970).

Dentre os modelos convencionais de distribuição de viagens destacam-se os seguintes :

a) modelos do tipo gravitacional; b) modelos de oportunidades intervenientes.

Nos modelos do tipo gravitacional o número estimado de viagens realizadas entre um certo par de zonas de tráfego é inversamente proporcional à distância (ou custo generalizado de viagem) entre as zonas consideradas. Nos modelos de oportunidades intervenientes, por outro lado, parte-se da premissa de que o número de viagens entre zonas é inversamente proporcional às oportunidades intervenientes entre as zonas consideradas. Em se tratando de estimar as interações espaciais que resultam da modificação dos perfis de uso do solo urbano, pode-se dizer que, por levar em conta explicitamente as oportunidades de satisfação dos propósitos dos viajantes, a consistência teórica dos modelos de oportunidades intervenientes é muito superior à dos modelos gravitacionais. Daí resulta a importância dos modelos de oportunidades intervenientes vis-à-vis os modelos gravitacionais, na

avaliação dos efeitos da expansão urbana sobre os padrões de distribuição de viagens de pessoas, estudos de *market share*, etc..

4.2 Modelos de oportunidades intervenientes

Para cada zona j define-se, para estes modelos, o número (V_j) das oportunidades oferecidas pela zona j . Estes números expressam o efeito de atração exercido pelas zonas de destino j .

Estes modelos se baseiam na premissa de que numa área urbana todas as viagens são tão curtas quanto possível, sendo apenas longas o necessário para atingirem o destino aceitável mais próximo (i.e. onde o propósito do viajante será satisfeito). O modelo convencional de oportunidades intervenientes, atribuído a Morton Schneider (SCHNEIDER, 1959), é apresentado por Ulysséa Neto e Gonçalves (1993) com a seguinte formulação:

$$T_{ij} = O_i \cdot k_i \cdot e^{-\lambda W_{ij}} (1 - e^{-\lambda V_j}) \quad (2)$$

onde

T_{ij} = número de viagens com origem na zona i e destino na zona j ,

O_i = número de viagens com origem na zona i ,

λ = probabilidade de uma oportunidade ser aceita se for considerada,

W_{ij} = número de oportunidades intervenientes entre as zonas i e j ,

V_j = número de oportunidades oferecidas pela zona j , e

k_i = constante de calibração associada à origem i .

Na próxima secção analisaremos como estas oportunidades intervenientes são tratadas, relativamente às posições espaciais relativas das zonas de tráfego.

5. As Oportunidades Intervenientes e as Interações Espaciais

Suponhamos que um cidadão que reside num bairro 'A' está com determinada necessidade que pode ser satisfeita no bairro vizinho 'B'. Esta necessidade poderia ser satisfeita, com a mesma qualidade, digamos num bairro distante 'C'. Se o único objetivo for satisfazer a dita necessidade, seria irracional supor que uma pessoa residente no bairro 'A' buscasse tal satisfação empreendendo uma viagem até o bairro distante 'C', enfrentando o trânsito, gastando o seu tempo e arcando com os custos pertinentes a esta viagem, ao invés de simplesmente buscar o que deseja no bairro próximo 'B'. Pelas mesmas razões, a decisão de a pessoa empreender a viagem até 'C' ficará menos provável na medida em que existam outros destinos alternativos que se interponham entre 'A' e 'C'. Ao se estudar as interações espaciais entre regiões ou zonas (viagens de pessoas, por exemplo), é, pois, inegável a forte influência das oportunidades intervenientes.

Uma questão que surge naturalmente é o problema de definir o conjunto das oportunidades intervenientes entre duas zonas de tráfego i e j . Duas maneiras de fazer tal definição foram apresentadas por Stouffer.

Uma delas consiste em considerar como intervenientes entre as zonas i e j , (considerando i como a origem das viagens) todas as oportunidades situadas em zonas k para as quais a distância de i até k é menor do que a distância de i até j . Uma representação geométrica da região onde estas oportunidades estão situadas pode ser obtida traçando um círculo com centro na zona i , isto é, no centróide da zona i , e raio igual à distância entre esta zona e a zona de destino j . As oportunidades oferecidas pelas zonas contidas neste círculo seriam, então, as oportunidades intervenientes entre a zona de origem i e a zona de destino j . A Figura 2 abaixo, retrata esta situação.

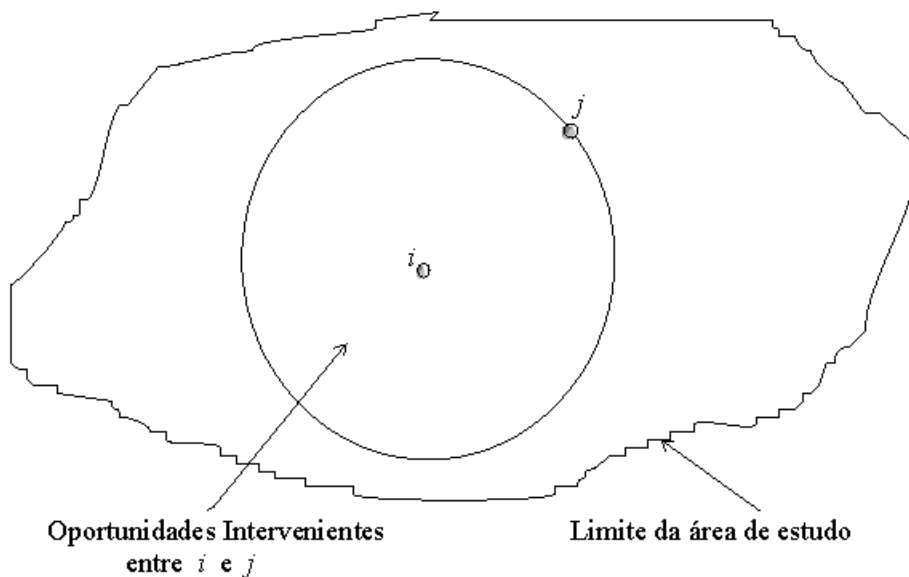


Figura 2 : Figura ilustrativa da delimitação do conjunto das oportunidades intervenientes. (Fonte: HUTCHINSON (1979) – adaptação)

Variações desta forma de definir as oportunidades intervenientes podem ser obtidas substituindo a distância da zona i até a zona que oferece a oportunidade em consideração, pelo custo de transporte ou o tempo de viagem entre estas zonas.

A localização relativa das zonas intervenientes entre um par de O-D será definida em relação ao segmento de reta que une o par de

O-D e pela perpendicular que passa pela zona de origem 'i'.

i = origem; j = destino; A = ponto médio entre i e j (isto é, $d(i, A) = d(A, j)$).

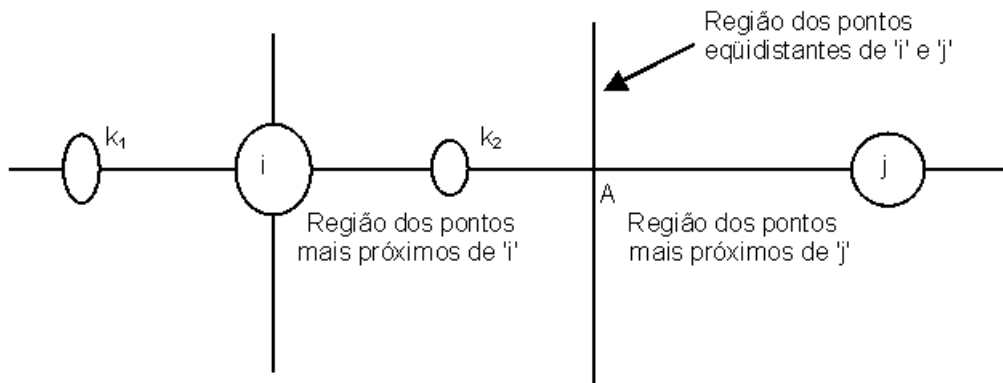


Figura 3 : Posições relativas das oportunidades intervenientes.

A Figura 3 mostra como as oportunidades intervenientes são tradicionalmente consideradas.

Suponhamos que a distância de i a k_1 seja igual à distância de i a k_2 . Nos modelos convencionais tanto k_1 como k_2 são consideradas como zonas intervenientes entre i e j . Além disso, os efeitos das oportunidades intervenientes de k_1 e k_2 são considerados iguais.

Obviamente, que, num primeiro momento, a atratividade de k_2 se somará à atratividade de j , induzindo o viajante a escolher o sentido de i para k_2 (e para j), em detrimento do sentido de i para k_1 . Daí, depreende-se que k_1 e k_2 , na realidade, não competem em igualdade de condições. Uma abordagem mais detalhada sobre esta questão é feita logo abaixo.

Outra forma de definir o conjunto de oportunidades intervenientes entre duas zonas i e j , apresentada por Stouffer, consiste em considerar como intervenientes entre as zonas i e j as oportunidades oferecidas pelas zonas contidas no círculo que tem por diâmetro o segmento de reta que une os centróides das zonas i e j . A Figura 4 ilustra esta forma de delimitar as oportunidades intervenientes. O círculo pode também ser substituído por uma elipse que tenha o mesmo segmento de reta como eixo maior.

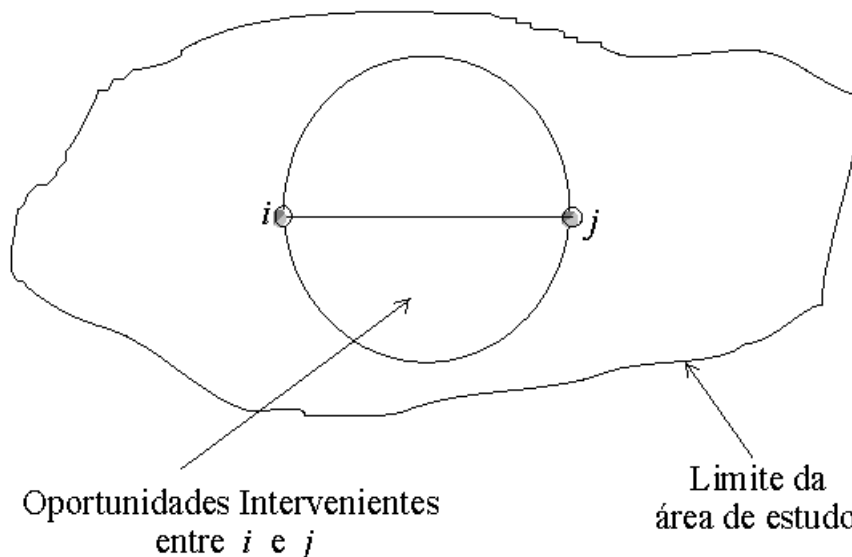


Figura 4 : Forma alternativa de delimitar o conjunto das oportunidades intervenientes.

Se a primeira forma de definir o conjunto de oportunidades intervenientes pode gerar inquietação de ordem conceitual, esta segunda maneira de fazê-lo traz consigo problemas bem maiores. De fato, de acordo com esta maneira de definir tal conjunto, as oportunidades oferecidas por zonas não contidas no círculo que tem por diâmetro o segmento de reta que une os centróides das zonas i e j , não são consideradas intervenientes entre i e j , por mais próximas de i que se encontrem.

Uma breve reflexão sobre esta questão nos fará concluir que toda oportunidade situada em uma zona de tráfego mais próxima da zona i do que a zona j , tem interferência (para pessoas residentes na zona i) sobre a busca da satisfação de alguma necessidade na zona j . Portanto, a primeira das duas maneiras já descritas, de definir o conjunto de oportunidades intervenientes, encerra maior consistência teórica na consideração dos efeitos das oportunidades intervenientes, apesar de sua inconsistência vista acima, na Figura 3.

Para que a previsão de viagens possa ser realizada com o nível de precisão adequado, por outro lado, é necessário que os modelos de oportunidades intervenientes sejam conceitualmente bem concebidos e especificados, sejam operacionalmente realísticos e identifiquem de forma adequada o conjunto das zonas de tráfego que contém estas oportunidades. Ora, um modelo de distribuição de viagens que seja sensível às variações de posição relativa das oportunidades intervenientes, teria uma fundamentação teórico-conceitual melhor do que aqueles que não apresentam tal sensibilidade.

Vimos acima que a posição relativa ocupada por cada uma dessas zonas em relação à origem i e ao destino j das viagens, não foi levada em conta. De fato, nos modelos convencionais de oportunidades intervenientes, as oportunidades alternativas, com suas mais variadas posições relativas dentro da região que contém as oportunidades intervenientes, são tratadas da mesma maneira. Conseqüentemente, as oportunidades apresentam a mesma interferência no número de viagens previsto por aqueles modelos. Ou seja, uma oportunidade pode ser deslocada para as mais variadas posições dentro da região de oportunidades intervenientes e sua influência sobre a distribuição de viagens permanece a mesma (segundo o modelo de Schneider).

Para melhor compreensão, considere, por exemplo, quatro zonas de tráfego pertencentes à área de estudo, denominadas i , j , k e m . Estas zonas estão distribuídas geograficamente de maneira que a distância de i até j seja 3 km, e que a distância de i até k , seja igual à distância de i até m , sendo ambas 2 km, como ilustra a Figura 5. Se, por exemplo, o melhor caminho (o caminho "natural" a ser escolhido pelo viajante) para ir da zona i para a zona j , passa pela zona k , enquanto que para se deslocar da zona i para a zona m o viajante deve tomar o sentido oposto ao que toma para ir às zonas j ou k , não parece razoável que se admita terem as oportunidades oferecidas pelas zonas k e m a mesma influência sobre a probabilidade de ocorrer uma viagem de i para j . Parece natural supor que ao iniciar a viagem, as oportunidades oferecidas pela zona k juntamente com as oferecidas pela zona j , atraíam o viajante em direção à zona j , e que somente após iniciar uma viagem em direção a j , as oportunidades localizadas em k atuem verdadeiramente como oportunidades intervenientes entre i e j .

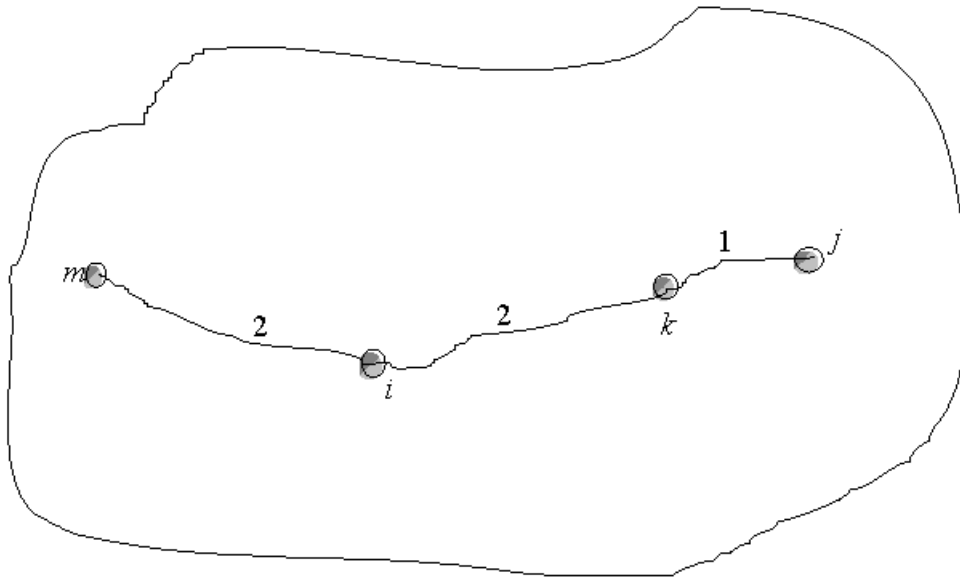


Figura 5 : Figura mostrando as posições relativas das oportunidades intervenientes

O desenvolvimento de um novo modelo de distribuição de viagens, sensível às variações das posições relativas das oportunidades intervenientes, constitui-se num dos objetivos principais de trabalho de pesquisa que ora está sendo desenvolvido pelos autores. As possibilidades de uso de Sistemas de Informações Geográficas na determinação das posições espaciais relativas das oportunidades intervenientes também estão sendo investigadas. Na próxima secção serão apresentadas algumas considerações sobre estas possibilidades.

6. Os Modelos de Oportunidades Intervenientes e os Sistemas de Informações Geográficas

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) podem trazer uma clara contribuição positiva aos modelos de distribuição de viagens. A partir de uma interação entre um SIG e um modelo de distribuição de viagens, este último poderá beneficiar-se da disponibilidade de uma série de informações georeferenciadas contidas no SIG, além da manipulação e criação de novas informações.

Para que uma interface de interação entre um SIG e um modelo de oportunidades seja concebida, todavia, o SIG deverá ser flexível o bastante para permitir que novos *scripts* (programas) possam ser desenvolvidos e operacionalizados em seu seio, na forma de um *strong coupling* (acoplamento forte). Como um exemplo, pode-se citar o *script* "snp.avx" do módulo Network Analyst que no SIG ArcView determina uma matriz das distâncias mínimas entre zonas de tráfego a partir de mapas temáticos (zonas de tráfego e rede viária) da área de estudo.

Na medida em que os SIG são concebidos de forma a associar mapas temáticos georeferenciados a bancos de dados relacionais, sua possibilidade de uso na detecção de oportunidades intervenientes é, sem dúvida, muito promissora. A identificação de feições pontuais no espaço bidimensional (pontos de oferta de um determinado bem ou serviço, por exemplo), através de suas coordenadas cartesianas, é facilmente realizável através de um SIG. Por outro lado, a identificação de suas posições, relativamente a um potencial par de pontos de O-D, mediante o estabelecimento de uma combinação matemático-topológica de distâncias entre suas coordenadas é algo teoricamente possível de ser realizado. Esta combinação (linear ou não linear), terá que ser estabelecida em função de novas regras de definição das oportunidades intervenientes entre os pares de O-D.

A partir do estabelecimento de um novo conceito de oportunidades intervenientes, que contemple as posições relativas dos destinos alternativos em relação à origem da viagem, os autores estão trabalhando no desenvolvimento de um novo modelo de oportunidades intervenientes, para ser utilizado em ambiente SIG.

7. Referências Bibliográficas

Harris, B. *A note on the probability of interaction at a distance*. Journal of Regional Science, volume 5, n. 2, p. 31-35. 1964.

- Hutchinson, B. G.** – *Princípios do planejamento dos sistemas de transporte urbano*. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois S. A., 1979.
- Schneider, M.** *Gravity models and trip distribution theory*. Papers and Proceedings of the Regional Science Association, volume 5, p. 51-56. 1959.
- Stouffer, S. A.** *Intervening opportunities : a theory relating mobility and distance*. American Sociological Review, volume 5, n. 6, p. 845-867. 1940.
- Stouffer, S. A.** – *Intervening opportunities and Competing Migrants*. Journal of Regional Science, vol2, nº 1, 1960.
- Ulysséa Neto, I.** *Especificação e calibração dos fatores de impedância de viagens, no âmbito da modelagem da demanda agregada de transporte de passageiros*. Trabalho apresentado no V Encontro Nacional da ANPET. Porto Alegre. 1990.
- Ulysséa Neto, I. e Gonçalves, M.B.** *Modelos de oportunidades intervenientes e modelos gravitacionais de distribuição de viagens – Possibilidades de amalgamação*. Revista de Transporte e Tecnologia, n. 10, p. 35-48. Campina Grande. 1993.
- Wilson, A. G.** *A statistical theory of spatial distribution models*. Transportation Research, volume 1, p. 253-269. 1967.
- Wilson, A. G.** *Entropy in urban and regional modelling*. Pion. London. 1970.
- Zipf, G.K.** *Human behaviour and the principle of least effort*. Hafner Publishing Company. New York. 1949.