

## **CARACTERIZAÇÃO DE PADRÕES PONTUAIS DE ACIDENTES DE TRÂNSITO APLICANDO AS FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESPACIAL**

**Marcelo Pereira Queiroz**

Centro de Formação de Recursos Humanos em Transportes - CEFTRU  
Universidade de Brasília – UnB

**Carlos Felipe Grangeiro Loureiro**

Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes - PETRAN  
Universidade Federal do Ceará - UFC

**Yaeko Yamashita**

Mestrado em Transportes  
Universidade de Brasília - UnB

### **RESUMO**

Este artigo apresenta a aplicação de ferramentas de análise espacial exploratória de padrões pontuais para caracterizar e diferenciar geograficamente as concentrações de acidentes de trânsito em Fortaleza, possibilitando a identificação de locais críticos na malha viária da cidade. A metodologia adotada foi aplicada sobre uma base de dados de acidentes georeferenciados em uma plataforma de Sistemas de Informações Geográficas. Primeiramente, foram utilizadas ferramentas de estatística espacial (índice do vizinho mais próximo e elipse de desvio padrão) para identificar locais com significativas concentrações espaço-temporais. Em seguida, aplicou-se a técnica hierárquica na identificação de agrupamentos espaciais por tipo de acidente, demonstrando ser esta uma ferramenta eficiente e com enorme potencial de contribuição para estudos de identificação de locais críticos, podendo também auxiliar na programação de medidas de fiscalização, de engenharia e de educação em várias escalas nos órgãos de trânsito.

### **ABSTRACT**

This paper presents the use of point pattern exploratory spatial analysis tools to geographically characterize and distinguish the concentration of traffic accidents in Fortaleza, helping the identification of critical spots within the city's urban road network. The adopted methodology was applied to an accident database geocoded in a Geographical Information System platform. Firstly, spatial statistical tools (nearest neighbour index and ellipses of standard deviation) were used to identify places with significant spatial and temporal concentrations. Following, the hierarchical technique was applied to identify spatial clusters by accident type, proving that this is an efficient tool with a huge potential to contribute in critical spot studies, as well as helping traffic engineers to program enforcement, engineering and educational actions in different scales.

### **1. INTRODUÇÃO**

Em geral, os programas de segurança viária para diagnóstico e tratamento de locais com ocorrências significativas de acidentes de trânsito contemplam o uso de metodologias para identificar e priorizar os locais críticos com maiores concentrações de acidentes, considerando suas tipologias e graus de severidade (Ministério dos Transportes, 2002; IHT, 1996). Entretanto, a utilização de modelos estatísticos tradicionais nestas metodologias é passível de crítica por considerar o pressuposto da independência entre os eventos observados (Cressie, 1991; Nicholson, 1998). Este argumento tem sido reforçado por pesquisas no Brasil e no exterior (Levine *et al.*, 1995; Kim e Yamashita, 2002; Queiroz, 2003) que vêm comprovando que os acidentes de trânsito são geograficamente dependentes, ou autocorrelacionados, requerendo modelos que considerem a premissa da dependência espacial nos estudos de segurança viária.

Visando consolidar uma base de dados georeferenciados dos acidentes de trânsito registrados na malha viária urbana de Fortaleza, possibilitando o desenvolvimento de modelos que incorporem o caráter espaço-temporal destas ocorrências, o órgão gestor do trânsito municipal implantou, em maio de 2000, o Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito de Fortaleza – SIAT-FOR (Queiroz *et al.*, 2003). Os dados já

armazenados neste sistema, georeferenciados em plataforma de Sistema de Informações Geográficas (SIG), têm viabilizado a elaboração de vários tipos de análises (ver Queiroz, 2003) usando não só as ferramentas de seleção e manipulação de dados espaciais disponíveis nos pacotes computacionais de SIG, como também algumas ferramentas de análise exploratória e confirmatória, atualmente pouco utilizadas nas pesquisas de segurança viária no âmbito nacional.

Exemplo de aplicação da análise espacial exploratória dos acidentes de Fortaleza foi apresentado por Queiroz e Loureiro (2003), no qual concluem que a aplicação sequencial de ferramentas de estatística espacial em áreas possibilitou uma caracterização espacial mais sistêmica, embora agregada, da segurança na malha viária. Usando medidas de autocorrelação espacial (média móvel, índice global e diagrama de Moran, além de mapas do tipo *Lisa*, *Box* e *Moran Map*), este trabalho confirmou a área central da cidade como sendo a região crítica de acidentes, caracterizada por uma forte associação entre elevados índices de acidentes e intensa utilização do solo, grande densidade de vias e interseções, assim como elevados volumes de tráfego veicular e de pedestres. Além disso, a análise indicou, em apenas dois anos, uma tendência significativa de expansão desta região crítica na direção dos vetores noroeste e sudoeste da cidade.

Dando seqüência a esta linha de pesquisa de aplicação das ferramentas de análise espacial na caracterização do fenômeno dos acidentes de trânsito em Fortaleza, que tem como objetivo secundário ajudar a disseminar as aplicações deste ferramental na solução de problemas relacionados ao sistema de transportes em geral, o presente artigo destaca o potencial de aplicação das ferramentas de *análise espacial exploratória de padrões pontuais* para caracterizar e diferenciar geograficamente as concentrações dos acidentes, considerando suas diversas tipologias. Com este intuito, o artigo inicialmente apresenta a base conceitual dos métodos estatísticos de análise espacial de padrões pontuais. Em seguida, propõe uma metodologia para o desenvolvimento da caracterização do padrão de distribuição espacial e temporal dos acidentes, destacando suas etapas e objetivos, além de descrever sua aplicação aos dados georeferenciados dos acidentes ocorridos em Fortaleza nos anos de 2001 e 2002. A última seção apresenta as conclusões sobre o potencial destas ferramentas para a análise de segurança viária.

## **2. FERRAMENTAS DE ANÁLISE ESPACIAL DE PADRÕES PONTUAIS**

A ênfase da análise espacial é mensurar propriedades e relacionamentos de dados geográficos que, por sua vez, são definidos como quaisquer dados que possam ser caracterizados no espaço, em função de algum sistema de coordenadas (Câmara *et al.*, 2000). Os dados espaciais podem ser classificados e analisados de quatro formas distintas: análise de dados em áreas, análise de superfícies (geoestatística), análise de redes, assim como análise de padrões pontuais, foco deste trabalho.

Denomina-se padrão pontual qualquer conjunto de dados consistindo de uma série de localizações pontuais que estão associadas a eventos dentro da área de estudo. Conforme Câmara e Carvalho (2000), suas principais características são: as áreas dos eventos não são uma medida válida; suas localizações não estão associadas a valores, mas apenas a ocorrência dos eventos; e entidades geográficas representadas como pontos no mapa são consideradas de mesma qualidade. Dentre os objetivos da análise de padrões pontuais, destaca-se o estudo de padrões de distribuição no espaço para

identificar os fatores que determinam a concentração ou a dispersão espacial, além da identificação de fatores de risco associados a estes eventos.

Existem várias funções de estatística espacial para a caracterização da distribuição de dados espaciais em forma de ponto, que permitem localizar o centro desta distribuição, identificar a existência de padrão espacial, identificar autocorrelação espacial, dentre outros objetivos (Cressie, 1993). Descrevem-se, a seguir, algumas destas ferramentas disponibilizadas em pacotes computacionais de estatística espacial (NIJ, 2002).

## 2.1. Elipse de desvio padrão

Esta ferramenta fornece a medida de dispersão espacial dos pontos em duas dimensões ao redor do centro da distribuição dos eventos. Para definir o formato da elipse, inicialmente calcula-se o ângulo de rotação do eixo Y pela seguinte expressão:

$$\theta = \arctg \frac{\{[(X_i - X)^2 - (Y_i - Y)^2] + \sqrt{[\sum (X_i - X)^2 - \sum (Y_i - Y)^2]^2 + 4[\sum (X_i - X)(Y_i - Y)]^2}\}}{2[\sum (X_i - X)(Y_i - Y)]} \quad (1)$$

em que  $X_i$ : valor da longitude no ponto i;  
 $Y_i$ : valor da latitude no ponto i;  
 $X$ : valor da longitude média do conjunto de pontos;  
 $Y$ : valor da latitude média do conjunto de pontos.

Os desvios ao longo do eixo transposto de X e do eixo transposto de Y são calculados pelas seguintes equações:

$$S_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - X) \cos \theta - (Y_i - Y) \sin \theta]^2}{N - 2}} \quad S_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(X_i - X) \sin \theta + (Y_i - Y) \cos \theta]^2}{N - 2}} \quad (2)$$

O eixo X e o eixo Y da elipse são definidos por meio das seguintes equações:

$$Eixo\_X = 2 * S_x \quad Eixo\_Y = 2 * S_y \quad (3)$$

A área da elipse é calculada usando os desvios  $S_x$  e  $S_y$ , da seguinte forma:

$$A = \pi * S_x * S_y \quad (4)$$

## 2.2. Índice do vizinho mais próximo

Trata-se de um método clássico para descrever a distribuição espacial dos eventos pontuais. Para cada ponto na distribuição, a distância a cada outro ponto é calculada e a distância mais próxima é selecionada. Calcula-se a média destes valores selecionados, resultando na distância média observada do vizinho mais próximo, representada pela seguinte equação:

$$D_p = \frac{\sum d_{min}}{N} \quad (5)$$

em que  $D_p$ : distância média observada do vizinho mais próximo;  
 $d_{min}$ : distância mínima de um ponto a outro; e,  
 $N$ : quantidade de pontos.

Logo depois, a distância aleatória média do vizinho mais próximo é calculada, sendo representada pela seguinte equação:

$$D_a = 0,5\sqrt{A/N} \quad (6)$$

em que  $D_a$ : distância aleatória média do vizinho mais próximo;

$A$ : área da região; e,

$N$ : quantidade de pontos.

O índice do vizinho mais próximo (*IVMP*) é obtido por meio da razão entre a distância média do vizinho mais próximo observada ( $D_p$ ) e a distância aleatória média do vizinho mais próximo ( $D_a$ ). Os resultados deste índice representam o tipo de relacionamento entre os dados espaciais da seguinte maneira: concentração espacial, se *IVMP* for menor que 1; dispersão espacial, se *IVMP* for maior que 1; e aleatoriedade espacial, se *IVMP* for igual a 1 (Cressie, 1993; Chou, 1996):

### 2.3. Agrupamentos espaciais

O agrupamento espacial corresponde a qualquer agrupamento de eventos (pontos, linhas e áreas) no espaço, em determinado período de tempo. Existem na literatura várias técnicas estatísticas de agrupamento que diferem entre si pelos critérios de identificação, com todas elas iniciando pelo cálculo da matriz  $n \times n$  de dissimilaridades entre cada par de observações, sendo usada geralmente uma distância média euclidiana. As técnicas de particionamento e as hierárquicas são normalmente as mais aplicadas (Ripley, 1999). As técnicas de particionamento dividem os pontos em uma quantidade de agrupamentos definida pelo usuário, sendo que cada ponto é alocado a somente um agrupamento. Já as técnicas hierárquicas agrupam inicialmente dois ou mais pontos baseadas em algum critério do tipo, como a média das distâncias e vizinhos mais próximos.

Bailey e Gatrell (1995), *apud* Grubestic e Murray (2003), citam que a técnica hierárquica usando o critério do vizinho mais próximo é a mais aplicada em problemas de agrupamentos. Esta técnica identifica agrupamentos que são geograficamente próximos, usando dois critérios. O primeiro usa o *IVMP* para definir uma distância limite e compará-la a outras distâncias entre todos os pares de pontos. Somente os pontos que são mais próximos a um ou mais pontos dentro da distância limite são selecionados para os agrupamentos. O outro critério consiste em definir a quantidade mínima de pontos dentro de um agrupamento. Os agrupamentos de 1ª ordem são formados pelos pontos que obedecem a estes dois critérios. Estes agrupamentos, os quais são geograficamente mais próximos que uma distância limite calculada a partir dos seus centros mínimos, geram os agrupamentos de 2ª ordem. Define-se centro mínimo como o ponto em que a soma das distâncias a todos os outros pontos é mínima. Os agrupamentos de 2ª ordem são agrupados em outros de 3ª ordem, e este processo se repete até que todos os agrupamentos converjam em um único agrupamento, ou ainda, o mais provável, que um dos critérios de agrupamento não seja verificado.

Para aplicar esta técnica, deve-se calcular um intervalo de confiança para a distância aleatória do vizinho mais próximo, usando a seguinte expressão:

$$IC = D_a \pm t * SE_{Aleat.} \quad (7)$$

em que  $IC$ : intervalo de confiança;

$D_a$ : distância aleatória média do vizinho mais próximo;

$SE_{aleat.}$ : erro médio da distância aleatória do vizinho mais próximo;

$t$ : valor associado a um percentual de probabilidade observado na distribuição *t-Student*.

O valor de  $D_a$  é calculado segundo a Equação 6. O erro médio de  $D_a$  é calculado por meio da seguinte expressão (Cressie, 1993):

$$SE_{aleat.} = \sqrt{\frac{(4 - \pi)A}{4\pi N^2}} \cong \frac{0,26136}{\sqrt{(N^2 / A)}} \quad (8)$$

Desta maneira, o intervalo de confiança é determinado pela seguinte expressão:

$$IC = 0.5\sqrt{A/N} \pm t * \left(\frac{0,26136}{\sqrt{N^2 / A}}\right) \quad (9)$$

Este intervalo de confiança define uma probabilidade para a distância entre qualquer par de pontos. Por exemplo, uma probabilidade uni-caudal específica “p” significa que menos do que p% dos pontos teriam distância do vizinho mais próximo menor do que a distância limite, supondo uma distribuição aleatória. Em outras palavras, a distância limite é um percentual de probabilidade para selecionar qualquer par de pontos considerando uma distribuição aleatória.

Existem algumas limitações da técnica de agrupamento do vizinho mais próximo (NIJ, 2002). Inicialmente, o tamanho da área de agrupamento depende do tamanho da amostra. Distribuições com muitas ocorrências terão distâncias aleatórias menores do que aquelas que têm poucas ocorrências. Outra limitação é que não há qualquer teoria explicativa sobre a causa dos agrupamentos, sendo responsabilidade do analista identificar as causas desses agrupamentos. Apesar de NIJ (2002) mencionar que há uma certa arbitrariedade na seleção da quantidade mínima de pontos, Grubescic e Murray (2003) citam que já existem procedimentos, como o critério de agrupamento cúbico, que auxiliam o analista nesta identificação.

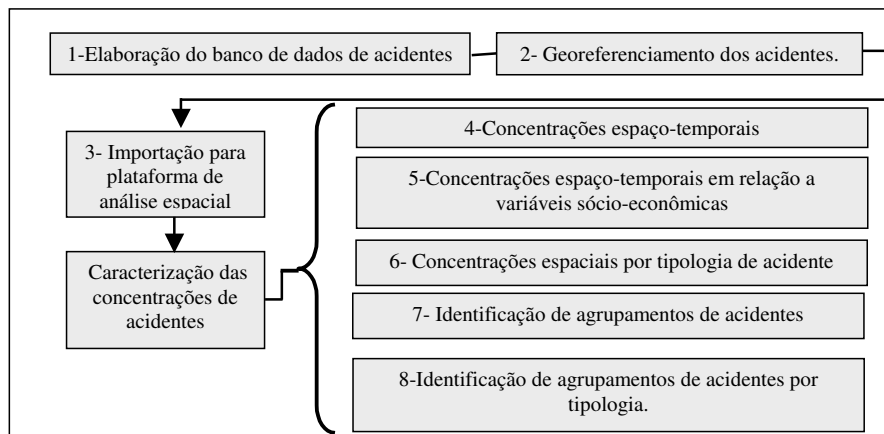
Ao revisar a literatura estrangeira, foram localizados poucos trabalhos, como os estudos de Levine *et al.* (1995) e Kim *et al.* (2002), que aplicaram estas ferramentas para obter caracterizações espaciais de acidentes. Destaca-se também a aplicação de Nicholson (1998) que usava as características das distribuições espaciais, estacionariedade e anisotropia, para selecionar o tipo de plano a ser aplicado. No Brasil, trabalhos com aplicação destas ferramentas em estudos de segurança viária são desconhecidos.

### 3. METODOLOGIA DE CARACTERIZAÇÃO DE PADRÕES PONTUAIS

O objetivo desta metodologia é sistematizar as etapas necessárias para aplicar o ferramental da análise exploratória de padrões pontuais na caracterização das concentrações de acidentes de trânsito. Conforme destacado na Figura 1, a etapa 1 visa descrever as características do banco de dados de acidentes, especificando as variáveis armazenadas e o seu ambiente computacional. Selecionar um dos possíveis modos de georeferenciamento e aplicá-lo aos dados armazenados no banco relacional constitui o objetivo da etapa 2. A etapa 3 importa os dados georeferenciados para uma plataforma SIG na qual possam ser caracterizadas as concentrações de acidentes.

A aplicação das ferramentas para caracterizar estas distribuições é realizada nas etapas a seguir. A etapa 4 usa a ferramenta do *IVMP* para comparar graficamente índices médios de concentrações de acidentes entre os dias úteis e finais de semana, possibilitando identificar horários de concentração para estudos posteriores. A etapa 5 compara a distribuição espaço-temporal dos acidentes com variáveis sócio-econômicas, com o intuito de identificar as áreas onde há concentrações de acidentes, usando os resultados

gráficos da ferramenta de elipse de desvio padrão. Aplica-se esta mesma ferramenta na etapa 6, porém visualizando os resultados em um mapa temático, para comparar a distribuição das tipologias dos acidentes, verificando suas áreas de concentração e comparando uma mesma tipologia para períodos diferentes. A etapa 7 usa a ferramenta de agrupamento do vizinho mais próximo para identificar e apresentar visualmente os locais de concentração de acidentes em seus vários formatos. A etapa 8 aplica a mesma ferramenta, considerando as diversas tipologias dos acidentes. A seleção de qualquer uma destas caracterizações depende das variáveis usadas na análise e da disponibilidade destas ferramentas nos pacotes comerciais de SIG ou em pacotes de estatística espacial.



**Figura 1:** Metodologia para caracterização das concentrações de acidentes.

#### 4. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA: ESTUDO DE CASO EM FORTALEZA

Esta metodologia foi aplicada aos dados de acidentes ocorridos em 2001 e 2002 no município de Fortaleza, com o intuito de verificar a viabilidade de utilização do ferramental de análise espacial para identificar locais de concentração de acidentes, base para o desenvolvimento futuro de uma metodologia de análise espaço-temporal para a identificação de locais críticos na malha viária.

##### 4.1.Elaboração do banco de dados e georeferenciamento dos acidentes de trânsito

O cenário negativo de segurança e o Artigo 24 do Código de Trânsito Brasileiro foram os motivadores para que a Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania de Fortaleza (AMC) implantasse o SIAT-FOR (Queiroz *et al.*, 2003). Este sistema foi desenvolvido em linguagem de programação *Delphi 5.0*, usando o banco de dados *MS SQL Server 6.5/7.0*. Aplicando a metodologia de georeferenciamento, desenvolvida no trabalho de Queiroz (2003), foram georeferenciados 72% do total de acidentes em 2001 e 2002 armazenados no SIAT-FOR. Neste mesmo trabalho são apresentados os principais motivos que fizeram com que os 28% restantes dos acidentes não fossem georeferenciados, destacando-se a ausência de numeração do endereço no local defronte ao acidente no Boletim de Ocorrência, com 11,2 % deste total.

##### 4.2.Importação para a plataforma de análise espacial

Como plataforma de análise espacial, foi utilizado o pacote computacional *CrimeStat* versão 2.0 (NIJ, 2002), o qual contém estatísticas espaciais descritivas, tais como centro médio e elipse de desvio padrão, assim como estatísticas inferenciais, como o *IVMP* e as técnicas de agrupamentos. Este pacote exige os seguintes dados de entrada:

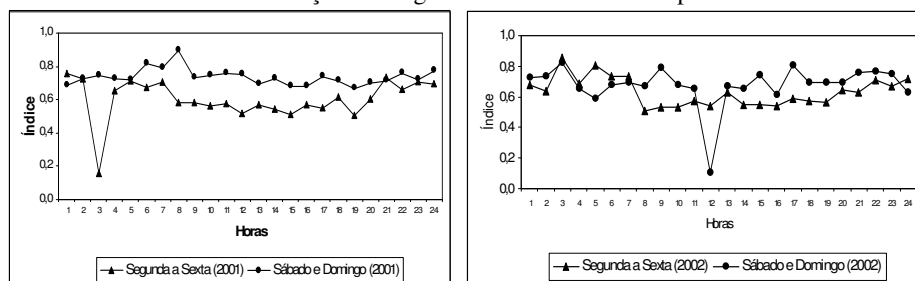
uma tabela com as coordenadas dos pontos e os valores da área da região de estudo e da quilometragem viária. Os dados de saída são numéricos e gráficos, os quais podem ser exportados para vários pacotes de SIG, sendo que neste trabalho foi usado o *software* Arcview 3.0 (ESRI, 1996).

### 4.3. Caracterização das concentrações de acidentes

As etapas a seguir apresentam aplicação das ferramentas de análise espacial para caracterizar as concentrações espaciais de acidentes na malha viária de Fortaleza.

#### 4.3.1. Concentrações espaço-temporais

Para analisar a distribuição espaço-temporal dos acidentes, foi aplicado o conceito do vizinho mais próximo. Os dias da semana foram agrupados em dias úteis (segunda a sexta) e fim de semana (sábado e domingo). Encontrou-se um *IVMP* médio de 0,63 em 2002, superior ao valor de 0,60 em 2001, indicando uma tendência de dispersão um pouco maior dos acidentes, conforme já verificado na análise exploratória em áreas (Queiroz e Loureiro, 2003). Percebe-se na Figura 2 que os acidentes estão mais concentrados espacialmente nos dias úteis do que nos finais de semana, tanto em 2001 como em 2002, com exceção de algumas horas ao longo do dia. Tal fato se justifica porque o trabalho e o estudo são os principais motivos de viagem durante a semana e estas atividades se concentram fortemente na região central; enquanto nos finais de semana as viagens são realizadas por outros motivos com destinos mais dispersos pela cidade, como lazer e compras, por exemplo. Já os acidentes que ocorrem entre 0 e 8 horas, e após as 20 horas, apresentam índices de dispersão aproximados nos dias úteis e finais de semana, ou seja, nesta faixa horária eles se encontram dispersos pela cidade, independente do dia da semana. Esta dispersão pode ser resultante da variedade de motivos e destinos de realização de viagens nos horários de fora-pico.



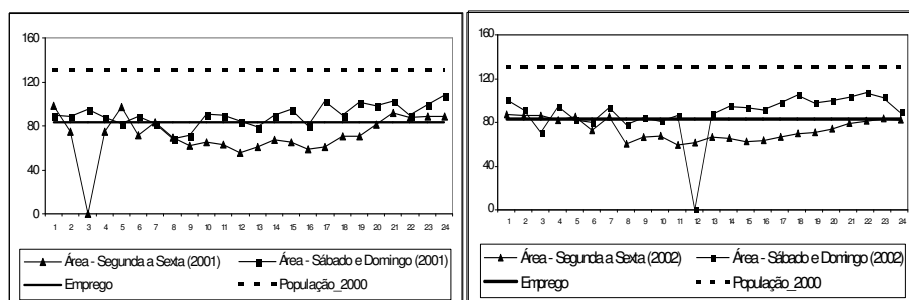
**Figura 2:** Variação horária do índice do vizinho mais próximo em 2001 e 2002.

A presença de valores reduzidos na Figura 2, indicando concentrações de eventos, merece uma investigação detalhada, pois pode ser um indício de locais críticos de acidentes em alguns horários específicos. Analisando os acidentes ocorridos entre 3 e 4 horas da manhã de dias úteis em 2001, foram detectados oito acidentes localizados em quadras bem próximas na região central, embora em datas com diferenças de 3 meses em média. Outro exemplo de concentração atípica ocorreu em 2002, por volta do meio-dia nos finais de semana, com acidentes localizados em avenidas que são alguns dos principais corredores usados para acessar ou retornar aos pólos de compras e lazer.

#### 4.3.2. Concentrações espaço-temporais em relação a variáveis sócio-econômicas

Nesta análise, foram calculadas as áreas das elipses de desvio padrão das variáveis população e empregos, usando o centróide de cada zona de análise de tráfego como

ponto representativo, ponderado pelo valor da variável na zona. As áreas das elipses das duas variáveis foram então comparadas com as áreas das elipses de total de acidentes, considerando sua variação horária em dias úteis e finais de semana. Pode-se observar na Figura 3 que a distribuição espacial dos acidentes em dias úteis no horário comercial (entre 8 e 20 horas) apresenta-se mais concentrada que a distribuição espacial dos empregos, indicando que os acidentes ocorrem com maior frequência nas zonas que disponibilizam mais empregos na cidade. Durante o final de semana, especialmente após o meio-dia (eliminando-se a influência das atividades comerciais aos sábados pela manhã), pode-se observar uma maior dispersão espacial dos acidentes, tendendo a se aproximar da distribuição da população. Deve-se lembrar que a ausência dos 28% dos acidentes não georeferenciados pode estar afetando a distribuição espacial da variável “acidentes”, já que muitos destes acidentes podem estar localizados em zonas com elevada população na periferia da cidade.



**Figura 3:** Distribuição espaço-temporal dos acidentes e das variáveis sócio-econômicas em 2001 e 2002.

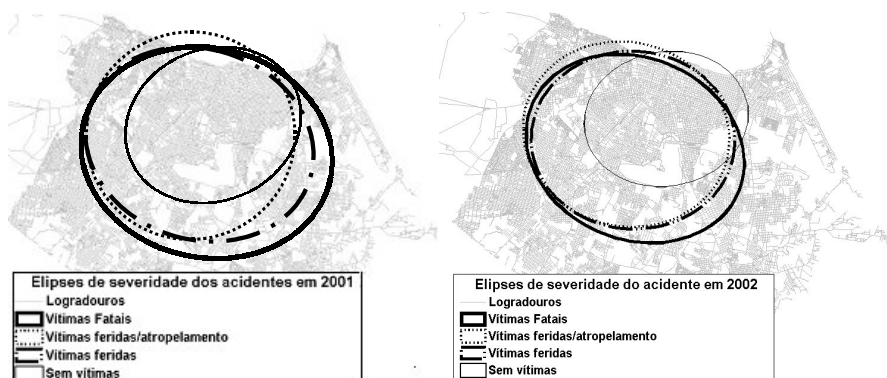
#### 4.3.3. Concentrações espaciais por tipologia de acidente

A Tabela 1 apresenta os resultados do IVMP e os percentuais de georeferenciamento segundo a severidade do acidente, sendo que os percentuais são mostrados porque podem afetar o resultado deste índice. Comparando os resultados do IVMP dos acidentes com vítimas fatais de 2001 com os de 2002, observa-se que eles se dispersaram ainda mais em 2002, enquanto os outros tipos de severidade mantiveram-se quase estáveis. A Figura 4 comprova este fato ao mostrar que os acidentes com vítimas fatais apresentam a área da elipse de desvio padrão mais ampla que as áreas dos demais tipos de severidade. Isto pode ser justificado porque estes acidentes normalmente ocorrem em vias de maior velocidade, as quais se encontram dispersas pela malha viária da cidade. Talvez pelo mesmo motivo, os atropelamentos com vítimas feridas apresentem uma dispersão espacial superior aos demais tipos de acidentes com menor severidade. Pode-se também verificar na Figura 4 que os acidentes sem vítimas, colisões na sua grande maioria, possuem uma maior concentração espacial na região central da cidade.

**Tabela 1:** Índice do vizinho mais próximo (IVMP) para a severidade dos acidentes.

Severidade do acidente	Total		% Georeferenciamento		IVMP	
	2001	2002	2001	2002	2001	2002
Vítima fatal	367	360	48,7%	51,1%	0,59	0,79
Vítima ferida por atropelamento	2235	2246	64,2%	69,8%	0,53	0,53
Vítima ferida	5191	6455	71,3%	76,7%	0,42	0,41
Sem vítimas	8992	10583	73,2%	71,7%	0,30	0,29

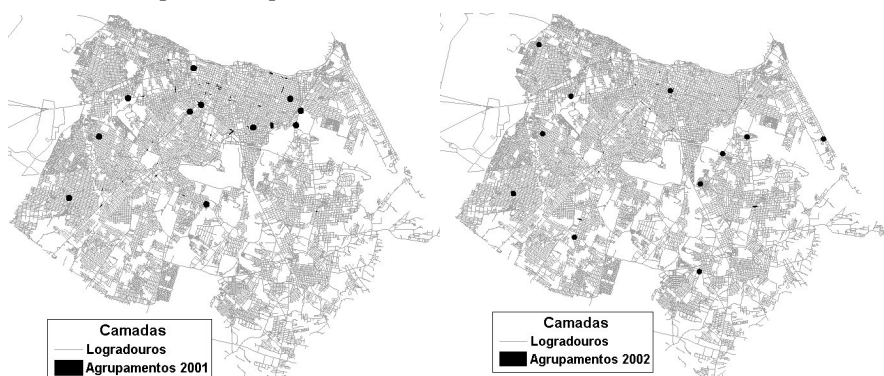




**Figura 4:** Elipses de desvio padrão da severidade dos acidentes em 2001 e 2002.

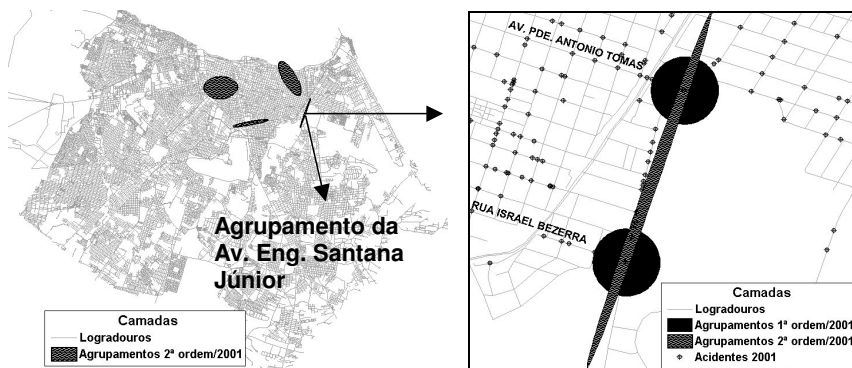
#### 4.3.4. Identificação dos agrupamentos de acidentes

Na aplicação desta ferramenta foram considerados os 11.903 acidentes georeferenciados de 2001, com os seguintes critérios de entrada: valor de probabilidade uni-caudal (valor de probabilidade  $p$ ) igual a 10% e quantidade mínima de 20 acidentes. A Figura 5 apresenta os 73 agrupamentos de 1ª ordem, na qual se observam alguns agrupamentos com uma elipse maior ao redor da interseção, indicando a área e sentido de maior ocorrência dos acidentes em cada agrupamento. Em 2002, foram georeferenciados 14.296 acidentes, representando 72,5% do total de acidentes naquele ano. A Figura 5 também apresenta os 88 agrupamentos de 1ª ordem obtidos em 2002, sendo usados os mesmos critérios dos agrupamentos de 2001. A maior quantidade de agrupamentos em 2002 deve-se principalmente a elevação de 20% na quantidade de acidentes analisados de um ano para o outro. Pode-se observar que os agrupamentos de 1ª ordem em 2002 foram mais dispersos do que em 2001.



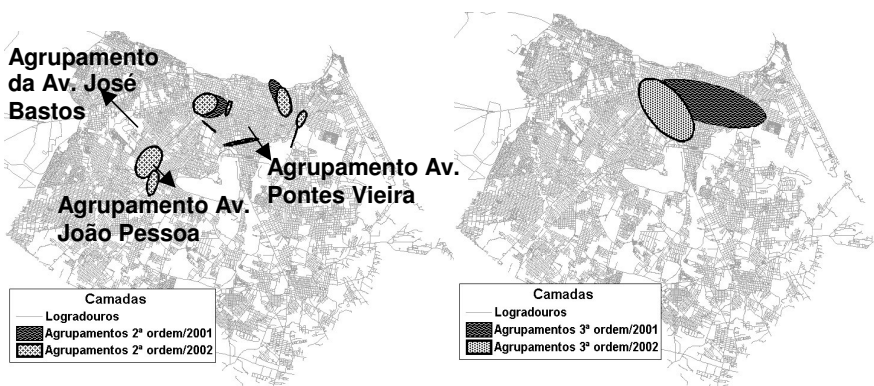
**Figura 5:** Agrupamentos de 1ª ordem do total de acidentes em 2001 e em 2002.

A Figura 6 à esquerda apresenta os agrupamentos de 2ª ordem dos acidentes ocorridos em 2001 que são locais com possibilidade de aplicação de medidas táticas de engenharia, tais como mudança de velocidade na via, instalação de fotosensores e fechamento de canteiros centrais. Como exemplo, pode-se citar o agrupamento da Av. Eng. Santana Júnior, destacado na Figura 6 à direita, que possui um trecho de aproximadamente um quilômetro, entre a Av. Pe. Antonio Tomás e a R. Israel Bezerra, no qual ocorreram aproximadamente 200 acidentes.



**Figura 6:** Agrupamentos de 2ª ordem do total de acidentes em 2001 (à esquerda) e visualização de um destes agrupamentos (à direita).

Uma maior dispersão, assim como uma maior quantidade de agrupamentos de acidentes em 2002, pode ser verificada na Figura 7 à esquerda, que apresenta os agrupamentos de 2ª ordem de 2001 e 2002, destacando os agrupamentos da Av. José Bastos e da Av. João Pessoa, que só aparecem em 2002. Pode-se observar também a sobreposição do agrupamento da Av. Pontes Vieira nos dois anos, o que destaca esta avenida como corredor crítico de acidentes da cidade. Já a Figura 7 à direita apresenta os agrupamentos de 3ª ordem dos acidentes em 2001 e 2002, cujos locais podem ser alvo de medidas estratégicas de engenharia, as quais exigiriam pesquisas e investimentos para efetivar um diagnóstico abrangente e propor soluções, tais como políticas de controle de circulação de tráfego. Pode-se concluir também que os acidentes estão concentrados na região central e que apresentam a tendência de crescimento para a região oeste, como já tinha sido diagnosticado na análise exploratória em áreas (Queiroz e Loureiro, 2003).

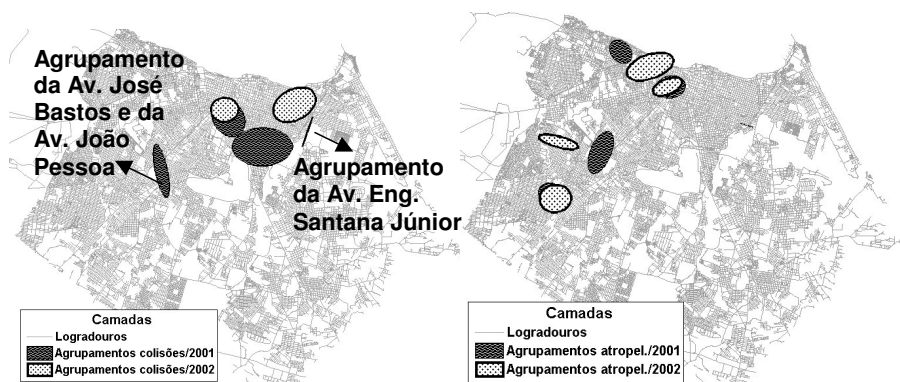


**Figura 7:** Agrupamentos de 2ª ordem (à esquerda) e de 3ª ordem (à direita) do total de acidentes em 2001 e 2002.

#### 4.3.5. Identificação dos agrupamentos de acidentes considerando suas tipologias

Com o objetivo de identificar agrupamentos de acidentes do tipo colisões e atropelamentos, foram usados os mesmos critérios aplicados na seção anterior, sendo modificado apenas o valor da quantidade mínima de acidentes. As colisões foram agrupadas considerando uma quantidade mínima de 30 acidentes e os atropelamentos com mínimo de 5 ocorrências. A geração dos agrupamentos de 1ª ordem de colisões

possibilitou a identificação de trechos críticos, como por exemplo, o trecho incluindo as interseções da Av. Barão de Studart com a Av. Monsenhor Tabosa e com a Av. Hist. Raimundo Girão, distantes 30 metros, com 21 acidentes georeferenciados na primeira interseção e com 14 acidentes na segunda. Portanto, a análise espacial permitiu identificar duas interseções próximas, com número elevado de acidentes de mesma tipologia, sendo passíveis das mesmas medidas de tratamento. Ao analisar os agrupamentos de 2ª ordem, mostrados na Figura 8, percebe-se que as colisões estão concentradas na região central, enquanto os atropelamentos estão mais localizados na região oeste, com forte semelhança nos agrupamentos de 2001 e 2002. A definição de agrupamentos de 2ª ordem de colisões também possibilitou a identificação de corredores críticos, como os da Av. Eng. Santana Jr. e das Av. José Bastos.



**Figura 8:** Agrupamentos de 2ª ordem com no mínimo 30 colisões (à esquerda) e com no mínimo 5 atropelamentos (à direita) em 2001 e 2002.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação das ferramentas exploratórias de análise de padrões pontuais possibilitou entender melhor o fenômeno da distribuição espacial dos acidentes de trânsito em Fortaleza, permitindo identificar locais com concentrações significativas, sejam eles interseções, trechos, corredores ou áreas. Dentre as caracterizações apresentadas, a que utilizou a técnica de agrupamento mostrou-se uma ferramenta eficiente e com enorme potencial de contribuição para estudos de identificação de locais críticos, podendo também auxiliar na programação de medidas de fiscalização, de engenharia e de educação em várias escalas nos órgãos de trânsito. Ademais, os resultados obtidos demonstraram que as metodologias elaboradas atualmente no Brasil precisam ser revisadas para considerar o pressuposto da dependência espacial dos acidentes.

Recomenda-se aplicar outras técnicas de agrupamento aos estudos de acidentes. Como exemplo, pode-se citar a aplicação da técnica de agrupamento do vizinho mais próximo ao índice de severidade, considerando um fator de ponderação por tipo de vítima. Os resultados obtidos com a aplicação das ferramentas de análise espacial fazem com que elas sejam recomendadas para a elaboração de novas metodologias de estudos de acidentes de trânsito e de novos sistemas de apoio à tomada de decisão na área da segurança viária. Como exemplo, recomenda-se o desenvolvimento de um sistema de informações e de análises espaciais de acidentes, contendo rotinas ou procedimentos automatizados que facilitem o intercâmbio de dados entre um banco de dados informatizado de acidentes e os pacotes comerciais de SIG e de estatística espacial.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido com o apoio financeiro do CNPq, entidade governamental brasileira promotora do desenvolvimento científico e tecnológico. Os autores também agradecem à Autarquia Municipal de Trânsito, Cidadania e Serviços Públicos (AMC) de Fortaleza pela cooperação em todas as etapas da pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMC (2004) *Estatísticas de acidentes de trânsito 2003*. Autarquia Municipal de Trânsito, Serviços Públicos e Cidadania, Prefeitura Municipal de Fortaleza, CE.
- Bailey, T. C. e A. C. Gatrell (1995) *Interactive spatial data analysis*. Longman, Londres, Inglaterra.
- Caliper (1996) *User's Guide*. Version 3.0. Caliper Corporation, Newton, Massachusetts, EUA.
- Câmara, G. e M. S. Carvalho (2000) Análise de eventos pontuais. In: Fuks, S. D.; M. S. Carvalho; G. Câmara; A. M. V. Monteiro (eds.), *Análise espacial de dados geográficos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens, São José dos Campos, SP. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>>. Acesso em: 18 de out. 2002.
- Câmara, G.; A. G. Monteiro; M. S. Carvalho (2000) Análise espacial e geoprocessamento. In: Fuks, S. D.; M. S. Carvalho; G. Câmara; A. M. V. Monteiro (eds.), *Análise espacial de dados geográficos*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – Divisão de Processamento de Imagens, São José dos Campos, SP. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/>>. Acesso em: 18 de out. 2002.
- Chou, Y. H. (1996) *Exploring spatial analysis in Geographic Information Systems*, On Word Press, Santa Fe, EUA.
- Cressie, N. (1993) *Statistics for spatial data*. Chichester, John Wiley.
- ESRI (1996) *User's Guide*. Environmental Systems Research Institute. Redlands, New York, EUA.
- Grubestic, T. H. e A. T. Murray (2003) Detecting hot spots using clusters analysis and GIS, Ohio, EUA. Disponível em: <<http://www.ojp.usdoj.gov/nij/maps/Conferences/01conf/Grubestic.doc>>. Acesso em: 19 ago. 2003.
- IHT (1996) *Guidelines for the safety audit of highways*. Institute of Highways and Transportation. International Edition. Londres, Inglaterra.
- Kim, K.; J. Boski e E. Yamashita (2002) A tipologia of motorcycle crashes: rider characteristics, environmental factors and spatial patterns. *72<sup>nd</sup> Transportation Research Board Annual Meeting (CD-ROM)*, Washington, D. C., EUA.
- Kim, K.; J. e E. Yamashita (2002) Motor Vehicle Crashes and Land Use: an Empirical Analysis from Hawaii. *72<sup>nd</sup> Transportation Research Board Annual Meeting (CD-ROM)*, Washington, EUA.
- Levine, N.; K. E. Kim e L. H. Nitz (1995) Spatial analysis of Honolulu motor vehicle crashes spatial patterns. *Accident Analysis and Prevention*, v. 27, p. 663-674, EUA.
- Ministério dos Transportes (2002) *Procedimentos para o tratamento de locais críticos de acidentes de trânsito*. Ministérios dos Transportes, Brasília, DF.
- NIJ (2002) *CrimeStat: User's Guide* National Institute of Justice. National Institute of Justice. Ned Levine & Associates, Washington, EUA. Disponível em: <<http://www.icpsr.umich.edu/NACJD/crimestat.html>>. Acesso em: 14 de mai. 2002.
- Nicholson, A. (1998) Analysis of spatial distributions of accidents. *Safety Science*, v. 31, p. 71-91.
- Queiroz, M. P. (2003). Análise espacial dos acidentes de trânsito do município de Fortaleza. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 124 fl.
- Queiroz, M. P. e Loureiro, C. F. G. (2003) Análise espacial exploratória dos acidentes de trânsito agregados nas zonas de tráfego de Fortaleza. *Anais do XVI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, RJ.
- Queiroz, M. P.; C. F. G. Loureiro; F. J. C. Cunto e L. C. Lima (2003) Georeferenciamento do Sistema de Informações de Acidentes de Trânsito de Fortaleza (SIAT-FOR): resultados iniciais. *Anais do XVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET*, Rio de Janeiro, RJ.
- Ripley, (1981) *Spatial Statistics*. Wiley & Sons., Ltda. Inglaterra.

Universidade Federal do Ceará  
Departamento de Engenharia de Transportes  
Campus do Pici – Bloco 703 – CP 12.144  
Fortaleza - CE - 60.455-760

Fone/Fax: (0xx85) 288-9488  
E-mail: [marcelo@det.ufc.br](mailto:marcelo@det.ufc.br)  
[felipe@det.ufc.br](mailto:felipe@det.ufc.br)  
[yacko@unb.br](mailto:yacko@unb.br)

## Capítulo 5

### *Aplicações de Modelos de Tráfego*

