

O CONCEITO DE MELHOR CAMINHO EM SISTEMAS VIÁRIOS PELA UTILIZAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* EM SIG CONVENCIONAIS

GABRIEL DA SILVA

Departamento de Informática, Centro Federal de Educação Tecnológica de Bambuí
Caixa Postal 05, 38900-000 Bambuí, MG, BRASIL
gabrielids@cefetbambui.edu.br

PAULO E. M. ALMEIDA

Laboratório de Sistemas Inteligentes, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais
Av. Amazonas, 7675, Nova Gameleira, 35510-000 Belo Horizonte, MG, BRASIL
pema@lsi.cefetmg.br

Abstract— This paper addresses the use of *fuzzy* logic to synthesize multiple numerical attributes on urban street networks, allowing conventional Geographic Information Systems – GIS to deal with the concept of a *fuzzy* “best path” instead of the classical “shortest path”. A new methodology to use *fuzzy* inference in GIS to implement *fuzzy* path planning inside an urban network model is proposed. A computational tool was developed to perform data acquisition, *fuzzy* inference and GIS database updating in real-time. Practical results of *fuzzy* path planning are presented and discussed.

Keywords— Fuzzy Logic, Best Path, Shortest Path, Geographic Information Systems.

Resumo— A abordagem explorada neste artigo é o uso da lógica *fuzzy* para sintetizar múltiplos critérios qualitativos em um sistema viário, permitindo que os Sistemas de Informação Geográfica – SIG utilizem o conceito de “melhor caminho” ao invés do conceito tradicional de “menor caminho”. São apresentadas a modelagem e implementação de uma ferramenta que realiza a aquisição de dados, a geração de atributos *fuzzy* e a atualização da base de dados automaticamente de modo integrado a um ambiente de SIG. Experimentos e resultados práticos são apresentados e discutidos.

Palavras-chave— Lógica *Fuzzy*, Melhor Caminho, Menor Caminho, Sistemas de Informação Geográfica.

1 Introdução

As técnicas utilizadas nos Sistemas de Informação Geográfica - SIG para análise de dados, em geral, desconsideram possíveis incertezas envolvidas nos processos de tomada de decisão. A introdução de rotinas de apoio à decisão no ambiente de SIG tem possibilitado um aumento na flexibilidade e na complexidade das análises efetuadas com essas ferramentas.

Este artigo apresenta um trabalho que está inserido no âmbito do projeto Geoprocessamento e Sistemas Inteligentes - GEOPROC do Grupo de Pesquisa em Sistemas Inteligentes - GPSI do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. Este projeto propõe o desenvolvimento de metodologias para a utilização de técnicas de Inteligência Computacional - IC em Sistemas de Informação Geográfica - SIG.

A abordagem, aqui explorada, é o uso combinado do modelo de redes geométricas e da lógica *fuzzy* para a escolha do melhor caminho em um sistema viário (VIANA JR., 2004).

Por “melhor caminho”, neste trabalho, entende-se o caminho que oferece a menor dificuldade de transposição, com base em múltiplos critérios qualitativos, sintetizados em um único atributo numérico por meio de inferência *fuzzy*. O método propõe a associação deste atributo aos arcos da rede geométrica no SIG e o emprego de algoritmos convencionais

para o problema do caminho de custo mínimo. Este atributo, denominado Impedância de Transposição de Trecho - ITT, mede a dificuldade para se transpor um trecho de via e é obtido por meio de um sistema de inferência *fuzzy*, cujas variáveis de entrada são atributos numéricos das vias considerados importantes para a definição de trajeto por meio de automóvel.

Este trabalho também apresenta a extensão da arquitetura de uma biblioteca para construção de SIG, de código-fonte aberto, a OpenJUMP (OPENJUMP, 2003), por meio do acoplamento de um mecanismo que permite a aquisição dos dados de entrada referentes ao sistema viário em estudo e a geração do atributo *fuzzy* de modo automático, além de um conjunto de funcionalidades de análise, permitindo a consulta do melhor caminho entre um ponto de origem e um de destino na rede geométrica representativa do sistema viário.

Uma estratégia para obtenção dos dados referentes ao sistema viário em tempo real é proposta.

Baseada na funcionalidade para sugestão do melhor caminho, também é apresentada uma ferramenta para interdição e desinterdição de trechos de via em tempo de execução.

A seguir, é apresentada a caracterização do problema. As demais seções detalham a metodologia e o desenvolvimento do SIG Inteligente. Por fim, os resultados são apresentados e discutidos.

2 Caracterização do Problema

Segundo Câmara *et al.* (2000), existem várias técnicas de análise geográfica, cada uma produzindo um formato de resultado distinto. O método Booleano gera dados em formato Temático sendo a potencialidade expressa espacialmente em forma de polígonos que representam classes. Os outros métodos de inferência, Média Ponderada, *Fuzzy*, Bayesiano e Redes Neurais, geram dados em formato numérico sendo a potencialidade expressa de forma numérica.

Na teoria dos grafos clássica existem algoritmos que encontram o caminho de menor custo (ou comprimento) de forma bastante eficiente. Entretanto, em alguns casos, as variáveis envolvidas nos problemas modelados podem ser relacionadas com grandezas subjetivas. Em certos casos, até a estrutura do grafo pode apresentar incertezas.

Por exemplo, em um roteiro de viagem, o tempo de traslado de uma cidade de origem a uma cidade de destino pode ser considerado um parâmetro sujeito a incertezas: congestionamento, condições da rodovia, condições climáticas, disposição do motorista, etc.

A lógica *fuzzy* tem se mostrado uma importante ferramenta para solução de problemas nos quais apenas o uso da lógica clássica não é adequado ou interessante. Sistemas *fuzzy* vêm sendo utilizados em diversas áreas, podendo-se destacar o seu uso em sistemas de apoio à decisão, algoritmos para aproximação de funções e sistemas de controle (ALMEIDA e EVSUKOFF, 2003).

2.1 Problema do Caminho Mínimo

Na teoria de grafos, o problema do caminho mínimo consiste na minimização do custo de travessia de um grafo entre dois nós. Este custo é dado pela soma dos pesos de cada arco de um grafo valorado, percorrida entre um vértice de origem e um vértice de destino (BONDY e MURTY, 1976).

Os valores associados às arestas do grafo variam de acordo com o tipo de problema ou aplicação modelado. Por exemplo, em problemas nos quais o grafo representa um sistema viário, os vértices podem representar as cidades e as arestas que conectam estas cidades, possuem como valores associados à distância entre as cidades. Outro exemplo, em grafos que modelam sistemas de comunicação, os pesos associados às arestas podem significar o custo de manutenção ou construção dos *links* de comunicação.

O algoritmo de Dijkstra (DIJKSTRA, 1959) é o mais utilizado para resolver este problema quando $G:(N,A)$ é um grafo com m nós e n arcos, e C_{ij} é um custo simples, maior ou igual a zero, associado ao arco (i,j) . Neste caso, este algoritmo tem uma performance muito boa, como apresentado na literatura técnica (CORMEN *et al.*, 2002).

Outros algoritmos foram propostos para encontrar o caminho mínimo entre dois nós do grafo quan-

do são associados mais de um custo aos seus arcos, mas geralmente, elevam muito o esforço computacional para a solução do problema.

2.2 Modelo de Rede

Segundo Câmara (2005), no geoprocessamento, uma rede pode ser definida como uma estrutura geográfica que tem como suporte um grafo $G: (N, A)$, cujo conceito rede refere-se a informações associadas a:

- Serviços de utilidade pública, como água, luz e telefone;
- Redes de drenagem (bacias hidrográficas);
- Rodovias.

Os objetos geográficos que compõem as redes são abstrações de entidades existentes no espaço e possuem uma localização geográfica exata e estão associados a atributos alfanuméricos armazenados em banco de dados que os descrevem. Exemplos destes objetos são, por exemplo, trechos de ruas, canos de água, cabos telefônicos ou elétricos, postes, edificações, entre outros, de acordo com a natureza do sistema modelado.

A partir da topologia da rede, é possível se obter um grafo que armazena informações sobre recursos que fluem entre localizações geográficas distintas. Desta forma, a principal motivação para o uso do modelo de redes é o amplo suporte matemático encontrado na literatura referente à Teoria dos Grafos para solucionar problemas passíveis de representação em rede.

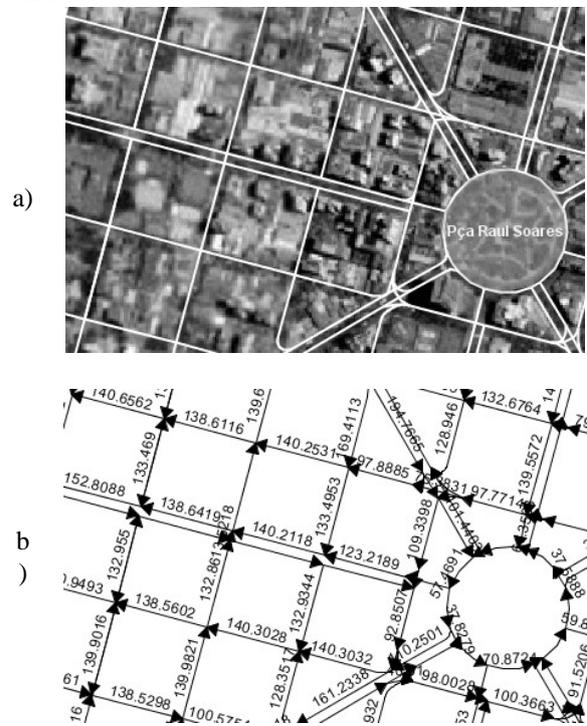


Figura 1. a) Rede Geométrica e b) Respectivo grafo obtido.

A Figura 1 ilustra a representação de uma rede e o respectivo grafo obtido a partir da mesma. A rede se refere ao sistema viário de uma região da área de estudo deste trabalho, o hipercentro de Belo Hori-

zonte-MG. Seus componentes são os trechos das vias, representados topologicamente como arcos e os cruzamentos das vias, representados topologicamente como nós (implicitamente representados pelos encontros dos arcos).

2.3 Combinação do Modelo de Rede e da Lógica Fuzzy em SIG

Viana Jr. (2004) apresentou uma proposta de metodologia para a sugestão de trajetos em um centro urbano, utilizando-se o modelo de rede e a lógica *fuzzy* em SIG. A solução proposta foi a definição do conceito de uma Impedância de Transposição do Trecho - ITT. Este atributo mede a dificuldade de transposição de um trecho e é obtido pela síntese de três atributos das vias, considerados importantes para a definição de trajetos por meio de automóvel. Estes dados, disponibilizados pela Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte - BHTrans, são: o Comprimento - COMP das vias, a Quantidade de Veículos - QV que trafegam sobre as vias e o Número de Faixas - NF de cada via. Os dois últimos foram previamente sintetizados algebricamente no atributo Quantidade de Veículos por Faixa - QVF.

A ITT é obtida através da inferência *fuzzy*, tendo como entrada os atributos COMP e QVF. Após a geração da ITT, esse novo atributo é associado à sua respectiva linha no modelo de rede. Dessa forma, os SIG comerciais disponíveis atualmente não precisam sofrer nenhuma mudança para considerar dois atributos simultaneamente na escolha de trajeto.

2.4 Sistema de Inferência Fuzzy

A geração do atributo *fuzzy* ITT é realizada por meio um sistema de inferência *fuzzy* que tem como entradas os dados referentes a cada trecho de via - comprimento e QVF - obtidos a partir da BHTrans, e como a saída, a respectiva ITT.

Para a definição dos universos de discurso de cada variável de entrada, foi observado o intervalo real em que estão contidos todos os seus dados levantados. Para a variável de saída, foi definido um intervalo de 0 a 10, obedecendo ao seguinte critério: valores pequenos indicam um trecho de fácil transposição e valores grandes, trechos de difícil transposição.

As regras que compõem o banco de regras *fuzzy* definido possuem nos seus antecedentes todas as combinações possíveis dos conjuntos *fuzzy* das variáveis de entrada e no conseqüente, um dos conjuntos *fuzzy* da variável de saída, ITT, como apresentado na Figura 2.

O sistema de inferência construído utiliza o método de inferência Máx-Min e o método do centróide para a conversão *fuzzy*-escalar (ALMEIDA & EV-SUKOFF, 2003).

A seguir é ilustrado o cálculo da ITT pela aplicação de uma máquina de inferência simplificada. Ela é dita simplificada, pois as variáveis, tanto de

entrada quanto de saída, são particionadas em um número menor de conjuntos *fuzzy* do que o modelo real utilizado neste trabalho, apenas com propósito didático. Para os valores de entrada: Comprimento = 299 e QVF = 875, a ITT resultante foi 4,49. Pela figura é possível verificar a interseção dos conjuntos *fuzzy* nas variáveis de entrada, bem como as regras disparadas: 4, 5, 7 e 8, destacadas pelos retângulos.

Após a inferência *fuzzy*, o valor da ITT = 4,49 é então associado ao arco do grafo correspondente ao respectivo trecho de via.

1.	Se Comprimento é Pequeno e	QVF é Baixa	então ITT é Baixa
2.	Se Comprimento é Pequeno e	QVF é Média	então ITT é Média
3.	Se Comprimento é Pequeno e	QVF é Alta	então ITT é Alta
4.	Se Comprimento é Médio e	QVF é Baixa	então ITT é Baixa
5.	Se Comprimento é Médio e	QVF é Média	então ITT é Média
6.	Se Comprimento é Médio e	QVF é Alta	então ITT é Alta
7.	Se Comprimento é Grande e	QVF é Baixa	então ITT é Baixa
8.	Se Comprimento é Grande e	QVF é Média	então ITT é Média
9.	Se Comprimento é Grande e	QVF é Alta	então ITT é Alta

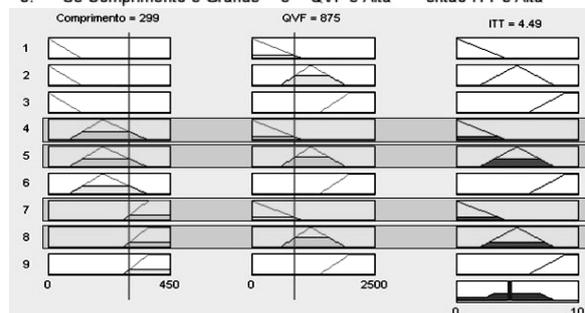


Figura 2. Exemplo do cálculo da ITT por uma máquina de inferência simplificada

3 Modelagem e Desenvolvimento do SIG Inteligente

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um SIG Inteligente para sugestão do melhor caminho, o *Real Time Intelligent Geographic Information System - RTIGIS4OpenJUMP* (SILVA, 2006).

Foi utilizada como base para o desenvolvimento uma biblioteca para construção de SIG, a OpenJUMP (OPENJUMP, 2003), distribuída sob a licença GPL - *General Public License*, a qual rege uma grande parte dos softwares livres.

Em sua versão básica, o OpenJUMP pode ser utilizado como ambiente de ferramentas básicas de análise em SIG ou, devido à sua característica de código-aberto, como uma poderosa biblioteca para a geração de novas ferramentas ou até de outro ambiente SIG personalizado. Sua capacidade de extensão é percebida na medida em que novos módulos ou *plugins* podem ser acoplados a qualquer momento visando o melhoramento de suas funcionalidades.

O software *RTIGIS4OpenJUMP* é constituído, basicamente, por um mecanismo de aquisição de dados referentes aos trechos de vias e por uma Máquina de Inferência *Fuzzy*, acoplados ao ambiente de SIG OpenJUMP.

Tanto a ferramenta desenvolvida neste trabalho quanto as demais funcionalidades agregadas ao OpenJUMP pelos seus desenvolvedores são denominadas extensões. Uma extensão é um conjunto de

classes e recursos suportados que fornecem funcionalidades adicionais ao OpenJUMP. Uma extensão pode adicionar *plugins* (itens de menu) e *cursor tools* (botões de ação) na área de trabalho do OpenJUMP.

Novos *plugins* e *cursor tools* foram desenvolvidos a fim de realizar o acoplamento destes subsistemas ao OpenJUMP e permitir a sugestão do melhor caminho, utilizando-se o sistema de inferência *fuzzy* proposto. Para tal, outros frameworks e bibliotecas também foram utilizados, como ilustrado na Figura 3.

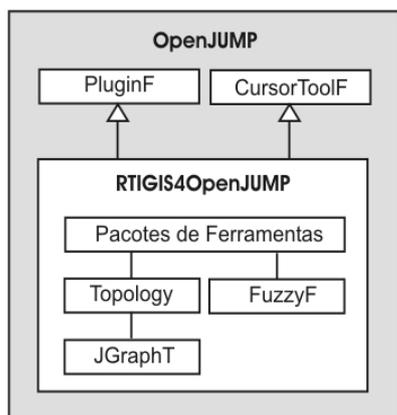


Figura 3. Acoplamento do RTIGIS4OpenJUMP ao OpenJUMP.

Foi utilizado um framework para geração de atributos *fuzzy*, o FuzzyF (BITTENCOURT, 2002). Para a geração do grafo representativo da rede viária em estudo e das operações sobre o mesmo, foram utilizadas as bibliotecas Topology (MICHAUD, 2006) e JGraphT (NAVEH, 2003), respectivamente.

Conceitos de modelagem orientada a objetos e de padrões de projeto (GAMMA *et al.*, 2000) foram aplicados a fim de permitir o desenvolvimento de modelos que, além de acoplar as funcionalidades aqui desenvolvidas a outros SIG, também facilitem a extensão destes modelos de modo a abranger outras técnicas da inteligência computacional sem um grande esforço de modelagem.

Destaca-se a aplicação do padrão Fachada na modelagem do acoplamento da máquina de inferência *fuzzy* ao SIG. Com a aplicação deste padrão, a manipulação dos dados de entrada e posterior atualização da base de dados alfanumérica do SIG ocorrem separadas da geração do atributo ITT. Assim, acredita-se que seja possível substituir a máquina de inferência *fuzzy*, utilizada atualmente, por uma outra técnica da inteligência computacional cuja saída também seja um escalar, como ilustrado na Figura 4.

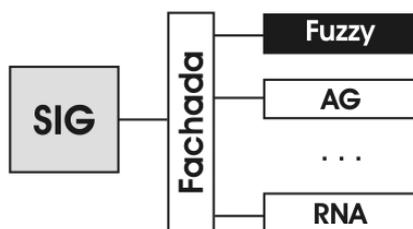


Figura 4. Aplicação do Padrão Fachada

3.1 Aquisição e atualização automática de dados

Uma parceria entre o CEFET-MG e a BHTrans foi realizada para permitir a aplicação prática da solução proposta.

Recentemente, em Belo Horizonte, a BHTrans adquiriu e implantou uma nova tecnologia para gestão do trânsito, o Controle Inteligente de Tráfego - CIT. O CIT concentra o fluxo de informações referentes ao trânsito de veículos na área central de Belo Horizonte, em tempo real, por meio da coleta de dados através de detectores instalados nos principais cruzamentos semafóricos.

Estes dados coletados são enviados ao Centro Controle Operacional - CCO da BHTrans. Várias ações podem ser realizadas com base nestes dados coletados, dentre elas, a reprogramação semafórica, além de servirem como parâmetros para tomadas de decisão dos engenheiros de trânsito. A utilização destes dados para a geração da ITT em tempo real permite um grande avanço na qualidade do serviço oferecido pelo SIG Inteligente que utiliza o modelo de rede e a lógica *fuzzy* para sugestão de trajetos.

A estratégia proposta pode ser observada na Figura 5. Os dados coletados e enviados pelo CIT ao CCO são armazenados em uma base de dados centralizada - BD CIT. Uma consulta é realizada nesta base a partir de um outro computador, denominado no esquema como Extrator RTIGIS, a fim de se obter os dados de entrada do sistema de inferência *fuzzy*. Estes dados são escritos em um arquivo de texto plano, o qual é transferido, via Internet, lido pelo RTIGIS4OpenJUMP e utilizado como entrada da máquina de inferência *fuzzy* para a geração e atualização das ITT.

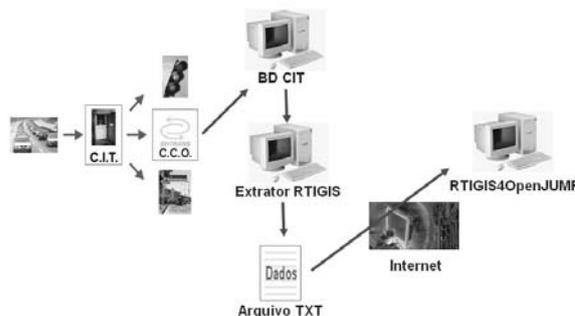


Figura 5. Estratégia para aquisição automática de dados

A contagem de veículos por faixa é atualizada a cada 15 minutos no intervalo compreendido entre as 6:15hs e 19:15hs, gerando 53 QVF para cada trecho de via ao longo deste período. Assim, para cada linha também são geradas 53 ITT, correspondentes aos intervalos de 15 minutos. Deste modo, é possível realizar a consulta do melhor caminho para 53 horários diferentes do dia.

3.2 Novas funcionalidades oferecidas pelo RTIGIS4OpenJUMP

O ambiente de SIG OpenJUMP oferece algumas ferramentas básicas para análises de geoprocessamento. Assim, praticamente todas as funcionalidades oferecidas pelo SIG desenvolvido neste trabalho

tiveram que ser modeladas, implementadas e acopladas a este ambiente.

Estas funcionalidades foram inseridas no OpenJUMP como opções de menu e/ou botões de ação e são resultantes da utilização da biblioteca do OpenJUMP em conjunto com os *frameworks* e bibliotecas apresentados na Figura 3.

4 Experimentos e Resultados

Este artigo apresenta dois experimentos: o primeiro é a comparação dos melhores caminhos sugeridos pela utilização da lógica *fuzzy* com o menor caminho, sugerido pela maioria dos SIG convencionais; o segundo refere-se à validação da funcionalidade de interdição/desinterdição de trechos.

Para a avaliação do RTIGIS4OpenJUMP, foi construída uma tarefa no OpenJUMP utilizando a mesma rede geométrica e dados de entrada referentes ao hipercentro de Belo Horizonte-MG utilizados em Viana Jr. (2004).

4.1 Menor Caminho x Melhor Caminho: comparação dos caminhos sugeridos

Na Figura 6 são apresentados os resultados obtidos para as consultas realizadas com origem no cruzamento da Avenida do Contorno com Rua Ouro Preto e destino no cruzamento das ruas Bahia e Guaicurus.

A linha simples representa a sugestão do menor caminho (clássico), considerando-se apenas o comprimento do trecho e também as sugestões dos melhores caminhos (*fuzzy*), considerando-se os valores das ITT para as faixas de horário de 15:15 às 15:45 e de 17:00 às 18:30 horas. A linha preta e pontilhada representa o melhor caminho sugerido na maioria das faixas de horários do dia. A linha cinza e tracejada apresenta a sugestão do melhor caminho para os horários entre as 8:15 às 13:15 e das 14:30 às 15:00 horas. Para este par de pontos de origem e de desti-

no, há uma grande variação do fluxo de veículos da região por onde passam os trajetos sugeridos, e conseqüentemente, das ITT. Entretanto, com a utilização da abordagem aqui proposta, o SIG foi capaz de evitar a região onde tais variações são maiores ao longo do dia. Em apenas 10 faixas de horários das 53 totais foram sugeridos trajetos que passavam pelos estes trechos. Também é importante ressaltar que o caminho sugerido quando utilizado o atributo de Comprimento do trecho, o que geralmente é feito nos SIG convencionais, passa pelos trechos que apresentam maior variação de fluxo, o que não pode ser considerada uma boa sugestão.

Em Viana Jr. (2004), a eficiência do uso da lógica *fuzzy* com o modelo de rede foi validado por meio de uma pesquisa realizada com taxistas, na qual, setenta e cinco por cento dos caminhos sugeridos por aqueles profissionais coincidiram com os melhores caminhos obtidos pelo uso da ITT.

4.2 Melhor caminho com Interdição/Desinterdição de trechos

Foi desenvolvida uma outra funcionalidade que permite realizar a interdição e desinterdição de trechos de vias em tempo de execução. Assim, quando consultado o melhor caminho entre um ponto de origem e um ponto de destino, não serão considerados os trechos que estejam interditados. A interdição destes trechos pode ser causada devido a vários motivos, como por exemplo, a realização de obras, acidentes, ou alguma outra alteração na via que impeça a sua transposição. Seguindo a proposta do SIG que adquire os dados a partir do CCO da BHTrans, o(s) trecho(s) interditado(s) pode(m) ser informado(s) no arquivo transmitido ao computador onde o RTIGIS4OpenJUMP é executado.

Na versão atual, a interdição dos trechos ocorre de modo manual. Entretanto, isso não inviabiliza que o mesmo seja utilizado como uma ferramenta que auxilie os engenheiros de tráfego no planejamento de

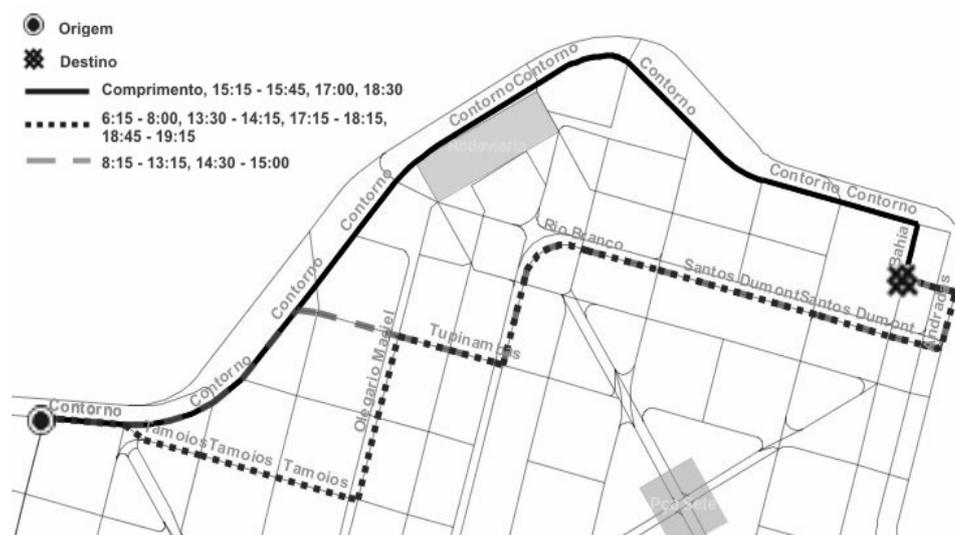


Figura 6. Comparação de trajetos sugeridos

manutenções no trânsito de uma determinada região.

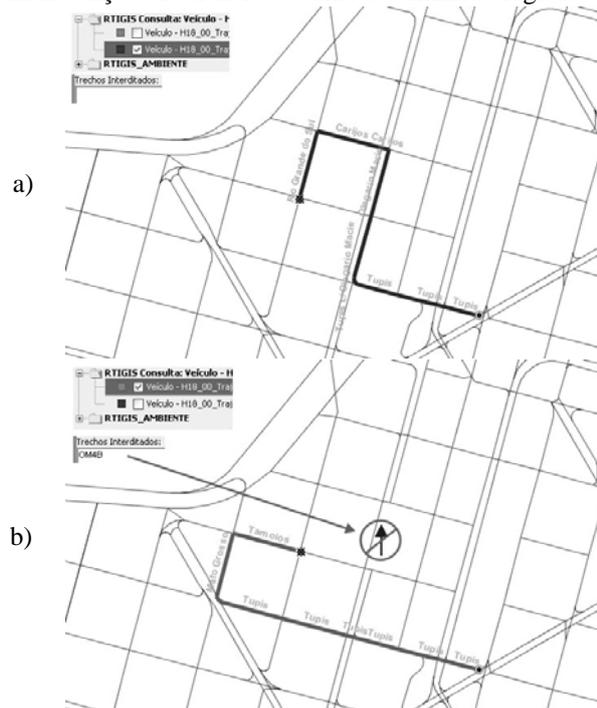


Figura 7. Melhor caminho: a) antes; b) após interdição de trecho.

Pelo uso combinado das ferramentas de análise do melhor caminho e de interdição de trechos, podem ser realizadas várias consultas de melhores caminhos entre origens e destinos e a interdição e desinterdição manual dos trechos, permitindo a observação dos caminhos alternativos sugeridos com base nos critérios qualitativos utilizados na geração das ITT.

5 Conclusão

O uso combinado do modelo de rede e da lógica *fuzzy* para a sugestão do melhor caminho permitiu um considerável aumento na qualidade das sugestões de trajetos se comparado com o menor caminho.

O desenvolvimento do RTIGIS4OpenJUMP permitiu que a geração da ITT acontecesse de modo automático, utilizando dados recentes sobre o sistema viário em estudo. Esta é uma importante característica para o desenvolvimento de um SIG que, além de inteligente, opere também em tempo real. O modelo computacional desenvolvido prevê a utilização de outras técnicas da inteligência computacional para a geração da ITT. Assim, novos experimentos podem ser realizados, na busca da mais adequada para a sugestão de melhores caminhos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Laboratório de Sistemas Inteligentes do CEFET-MG pela infra-estrutura e a BHTrans, pela cessão de dados operacionais e descrição de técnicas e procedimentos de medição de

trânsito. O autor Gabriel da Silva agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq o apoio individual concedido.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, Paulo Eduardo Maciel de; EVSUKOFF, Alexandre Gonçalves. Sistemas *fuzzy*. In: REZENDE, Solange Oliveira. Sistemas Inteligentes: fundamentos e aplicações. Barueri, SP: Manole, Cap.7, p. 169-201, 2003.
- BITTENCOURT, J. R.; OSÓRIO, F. S. FuzzyF. *fuzzy* Logic Framework: Uma Solução Software Livre para o Desenvolvimento, Ensino e Pesquisa de Aplicações de Inteligência Artificial Multiplataforma. In: III Workshop Sobre Software Livre, 2002, Porto Alegre. Anais do III Workshop sobre Software Livre. 2002.
- BONDY, J.A. and MURTY, U.S.R. Graph Theory with Applications. Macmillan., London, 1976.
- CÂMARA, Gilberto; MOREIRA, Fábio Roque; BARBOSA, Cláudio; ALMEIDA FILHO, Raimundo; BÖNISCH, Simone. Técnicas de Inferência Geográfica. In: Introdução à Ciência da Geoinformação. Cap. 9. Livro on-line, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2000. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>. Visitado em Abr./2007.
- CÂMARA, Gilberto. Representação computacional de dados geográficos. In: CASANOVA, Marco Antônio; CÂMARA, Gilberto; DAVIS JR., Clodoveu A.; VINHAS, Lúbia e QUEIROZ, Gilberto Ribeiro. Bancos de Dados Geográficos. Cap. 1. Curitiba: MundoGEO, 2005.
- CORMEN, Thomas H.; LEISERSON, Charles E.; RIVEST, Ronald L.; STEIN, Clifford. Algoritmos: Teoria e Prática. Ed. Campus. 2002.
- DIJKSTRA, E.W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. Numer. Math., 1, 269-71.
- GAMMA, Erich; HELM, Richard; JOHNSON, Ralph; VLISSIDES, John. Padrões de projeto: soluções reutilizáveis de software orientado a objetos. Luiz A. Meirelles Salgado (Trad.). Porto Alegre: Bookman, 2002. 364 p.
- MICHAUD, Michael. Site: Home Page Pessoal. Disponível em: <http://michael.michaud.free.fr/>. Visitado em 01/08/2006.
- NAVEH, Barak and Contributors. JGraphT: a free Java graph library. 2003. Disponível em: <http://jgrapht.sourceforge.net/>. Visitado em Abr/2007.
- OpenJUMP. OpenJUMP Project. 2003-2006. Disponível em: <http://openjump.org>. Visitado em: Fev./2007.
- SILVA, Gabriel. Modelagem e Implementação de uma ferramenta Inteligente e de Código Aberto para Inserção Automática de Inferência *Fuzzy* em SIG convencionais. Dissertação. Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional, CEFET-MG/DPPG. Belo Horizonte, 2006.
- VIANA JR., Gentil Félix. Um Sistema de Informação Geográfico inteligente para escolha de trajetos: uso do modelo de rede e da lógica *fuzzy*. Dissertação. Curso de Mestrado em Tecnologia, CEFET-MG – Belo Horizonte, 2004.