



Diogo Miranda Amaral

Roteirização de Melhores Caminhos na
Malha Rodoviária do Triângulo Mineiro
(MG): um estudo sobre a utilização de
ferramentas de Geoprocessamento

XIII Curso de Especialização em
Geoprocessamento
2011



UFMG
Instituto de Geociências
Departamento de Cartografia
Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha
Belo Horizonte
cartog@igc.ufmg.br

DIOGO MIRANDA AMARAL

ROTEIRIZAÇÃO DE MELHORES CAMINHOS NA MALHA
RODOVIÁRIA DO TRIÂNGULO MINEIRO (MG): UM ESTUDO A
PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE FERRAMENTAS DE
GEOPROCESSAMENTO

Monografia apresentada como requisito parcial à
obtenção do grau de Especialista em
Geoprocessamento. Curso de Especialização em
Geoprocessamento. Departamento de Cartografia.
Instituto de Geociências. Universidade Federal de
Minas Gerais.

Orientador: Prof.. Christian Rezende Freitas

BELO HORIZONTE

2011

Diogo Miranda Amaral

Monografia defendida e aprovada em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do título de Especialista em Geoprocessamento, em 21 de novembro de 2011, pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof. Dr. Christian Rezende Freitas

Prof. Dra. Maria Márcia Magela Machado

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais pelo incentivo.

Agradeço à Álida, minha esposa, pelo apoio incondicional.

Agradeço aos colegas do DER/MG pela amizade e pelo grande auxílio nesta jornada.

Agradeço aos professores do Curso de Especialização pelos conhecimentos fornecidos.

Agradeço ao professor Christian Rezende pela orientação e ajuda.

RESUMO

O presente trabalho objetivou analisar a ferramenta Network Analyst e suas particularidades na roteirização de melhores caminhos na malha rodoviária da região do Triângulo Mineiro. Para a determinação de impedâncias, foi proposto um sistema de notas ponderadas a partir das variáveis: pavimento, perímetro urbano, situação de obras. As mesmas foram utilizadas na determinação de “velocidades_tempo” e tempos de viagem de cada trecho rodoviário estudado, para a posterior etapa de simulação de rotas. Os resultados obtidos foram comparados com rotas de menores caminhos para se analisar se a ferramenta Network Analyst era capaz de produzir bons resultados, compatíveis com a realidade. Também foi analisada a possibilidade de criação de barreiras restritivas relacionadas às dimensões de carga para ilustrar a criação de rotas alternativas em função do tipo de transporte. Tanto o aplicativo utilizado quanto o método de cálculo de impedâncias aplicado mostraram-se bastante eficazes na concepção de rotas inteligentes que determinam “melhores caminhos” de viagens dentro do recorte do Triângulo Mineiro.

Palavras-Chave: roteirização, impedância, rede rodoviária.

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO	9
Apresentação	9
Justificativa.....	10
Objetivos.....	11
2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 – Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS).....	12
2.1.1 – Arquitetura de STI.....	13
2.2 – Roteirização: definições e implicações	14
2.2.1 – Roteirização: a racionalização do transporte.....	15
2.2.2 Classificação dos problemas de roteirização.....	16
2.3 – Métodos de solução do VRP.....	17
2.4 – Sobre o conceito de espaço	18
2.5 – Elementos espaciais.....	19
3 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	21
3.1 – SRE/MG: Metodologia e descrição dos dados.....	21
3.2 – Caracterização da área de estudo.....	22
3.3 – Adequação dos Dados do Georreferenciamento Rodoviário do DER/MG.....	24
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	27
4.1 – Roteirização de Melhores Caminhos.....	27
4.1.1 Variável Pavimento	27
4.1.2 Variável Perímetro Urbano	30
4.1.3 Variável Situação de Obras	32
4.2 – Problemas Teóricos com aplicações de restrições físicas permanentes ou eventuais .	34
5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
ANEXOS	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Localização da área de estudo – Triângulo Mineiro (MG) e recorte rodoviário estudado.....	22
Figura 2 – Rota Ituiutaba – Uberaba considerando a menor distância linear através de trechos rodoviários pavimentados e não-pavimentados	28
Figura 3 – Rota Ituiutaba – Uberaba considerando o caminho proposto considerando a impedância calculada a partir da velocidade_tempo.....	28
Figura 4 – Rota Prata - Araguari considerando a menor distância linear (atravessando o perímetro urbano de Uberlândia).....	30
Figura 5 – Rota Prata - Araguari considerando a impedância. Note-se o desvio pelo contorno norte de Uberlândia.....	31
Figura 6 – Rota Uberlândia - Campo Florido, considerando a menor distância linear através de trechos rodoviários em obras.....	32
Figura 7 – Rota Uberlândia - Campo Florido, considerando o melhor distância linear através de trechos rodoviários pavimentados e não-pavimentados baseados no cálculo de impedância.....	33
Figura 8 – Mapa de Localização das Pontes e Viadutos da Área de Estudo sob conservação do DER/MG.....	35
Figura 9 – Rota União de Minas – Araxá, considerando o melhor caminho sem restrições (barreiras).....	36
Figura 10 – Rota União de Minas – Araxá, considerando o melhor caminho com as restrições de altura, largura e peso propostas.....	37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

DER/MG	- Departamento de Estradas de Rodagem de Minas Gerais
DNIT	- Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamento Global)
IGA/MG	- Instituto de Geografia Aplicada de Minas Gerais
ITS	- <i>Intelligent Transportation Systems</i> (Sistemas Inteligentes de Transportes)
SDO	- <i>Spatial Data ORACLE</i>
SIG/DER	- Sistema de Informação Geográfica – DER/MG
SRE/MG	- Sistema Rodoviário Estadual de Minas Gerais
VRP	- <i>Vehicle Routing Problem</i> (Problema de Roteirização de Veículos)

1 – INTRODUÇÃO

Apresentação

O estado de Minas Gerais contém o maior sistema rodoviário do Brasil. Conforme dados do DER/MG (Departamento Estradas de Rodagem de Minas Gerais), em novembro de 2010, o estado possuía mais de 35.500 km de rodovias estaduais e federais, entre pavimentadas e não pavimentadas. Tendo em vista tal dimensão, entre outros fatores, entre 2006-2010, o governo estadual investiu significativos recursos no ramo de geoprocessamento, sobretudo em equipamentos, treinamento de pessoal e verbas para trabalhos de campo. Tais investimentos visaram ao georreferenciamento toda a malha rodoviária estadual e federal de Minas Gerais a partir do levantamento dos eixos rodoviários e elementos notáveis de maior importância.

Diferente de outras experiências brasileiras similares, a escolha pela realização de toda esta experiência pelo próprio Departamento, inclusive a etapa de processamento e edição do material levantado, fez com que o mesmo, na figura de seu setor de Geoprocessamento, agregasse uma vasta gama de conhecimentos técnicos e práticos.

Atualmente, em função deste processo, o principal produto do trabalho desenvolvido no âmbito do referido setor consiste em um Sistema de Informações Geográficas (SIG/DER) formado por uma rede de aproximadamente 35 mil quilômetros de eixos rodoviários e respectivos elementos notáveis existentes nas faixas de domínio rodoviárias, a saber: pontes, viadutos, postos de combustíveis, postos de fiscalização, marcos quilométricos, entre outros.

Ressalta-se que, além de ser um grande cadastro de informações espaciais, este sistema já se apresenta como ferramenta de gestão governamental por ser o referencial de outros subsistemas do próprio DER/MG. Além disso, ele agrega todas as informações do Sistema Rodoviário Estadual (SRE), que informa as diretrizes rodoviárias, quilometragens e suas respectivas jurisdições, além das malhas rodoviárias estadual e federal presentes no Estado de Minas Gerais.

As demandas atuais do Departamento de Estradas de Rodagem do Estado para o SRE estão voltadas para a criação de um sistema de buscas que possa informar a distância entre duas localidades distintas no Estado, bem como durações de viagem, restrições ao

tráfego de veículos de carga, situações de restrições físicas da malha viária, entre outros. Mais especificamente, o Departamento tem em vista a criação de um sistema que inclua a roteirização de melhores caminhos na malha rodoviária de Minas Gerais no qual os dados coletados e armazenados pelo SRE sejam organizados de modo a possibilitar o fornecimento das referidas informações aos usuários interessados.

Justificativa

A escolha da temática, roteirização de melhores caminhos na malha rodoviária de Minas Gerais, tem como escopo a missão traçada pelo DER/MG (2011), a saber, assegurar soluções adequadas de transporte rodoviário de pessoas e bens, no âmbito do Estado. Um trabalho nestes moldes também está ancorado nos valores traçados pelo Departamento para a prestação de serviços: a) ética; b) comprometimento, que cria a necessidade de *“atuar com dedicação, empenho e envolvimento em suas atividades para atingir os objetivos do sistema de transportes e obras públicas”*; c) transparência, d) efetividade, que evolva a atuação *“com foco nos impactos desejados”* e, por fim, e) sustentabilidade, que significa *“atuar com responsabilidade social, econômica, cultural, ambiental e fiscal”*.

Enfatiza-se que a elaboração de melhores rotas, denominadas na literatura pertinente ao assunto como *“rotas inteligentes”*, proporcionam a otimização da circulação de pessoas, capitais, mercadorias e informações pelas rodovias presentes no estado, o que pode gerar benefícios nas atividades dos diversos setores da economia. Uma rota eficiente, por exemplo, significa rapidez na execução e redução de custos para empresas, comércios e para o consumidor final.

Espera-se que, após a validação dos testes aqui propostos, o plano de edição realizado neste estudo seja utilizado como base para dimensionamento de toda a malha viária estadual, federal e/ou municipal presentes em Minas Gerais. Tendo em vista que o DER/MG tem esboçado a intenção de implementar um aplicativo de consulta para acesso via internet, os resultados deste estudo podem servir, também, para esta finalidade.

Objetivos

O objetivo geral deste estudo consiste em construir, utilizando ferramentas de Geoprocessamento, um plano de edição que seja capaz de roteirizar melhores caminhos entre duas localidades distintas dentro do Triângulo Mineiro de Minas Gerais. Para tanto, pretende-se organizar e testar uma rede de elementos e caracteres espaciais rodoviários presentes nos vetores georreferenciados de rodovias do Triângulo Mineiro que, atualmente, constam no Sistema Rodoviário Estadual (SRE/MG).

Um dos objetivos específicos da investigação consiste em identificar/mensurar fatores de impedância em todos os trechos da área de estudo mencionada, ou seja, avaliar cada trecho rodoviário da região no que diz respeito à relação entre a distância a ser percorrida, os obstáculos presentes no caminho e o tempo gasto para tal deslocamento. Outro objetivo específico reside na delimitação de perfis modais de viagem – passeio, carga, somente por vias asfaltadas e menor caminho – realizados em veículos de passeio (automóveis, ônibus e motos) e veículos de carga (caminhões). A partir do entrecruzamento destes dados, será possível criar uma hierarquização de melhores rotas de acordo com atributos positivos e/ou negativos da malha viária da região.

2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para discorrer sobre a temática em questão, dividimos a fundamentação teórica do estudo em três partes. Na primeira parte, recorremos a elaborações teóricas de autores que abordam a aplicação de ferramentas de geoprocessamento aos sistemas de transportes inteligentes (STI) (Bazzan e Klügl, 2007; Meirelles, 2011). De modo especial, apontamos os passos considerados necessários ao desenvolvimento da arquitetura do STI, bem como seus fundamentos e serviços previstos para sua edificação (US.DOT, 1996 *apud* Meirelles, 2011).

Na segunda parte, discorreremos sobre um tipo específico de serviço previsto na arquitetura de STI: a roteirização. Neste item, apresentamos à conceituação do termo (Martins, 2009), mencionamos uma classificação dos problemas que envolvem os processos de elaboração destes traçados (Bodin, 1983 *apud* Enomoto e Lima, 2007) e, por fim, apontamos alguns elementos que condicionam a aplicação da roteirização a contextos reais (Cunha, 2010).

Na terceira parte, tendo em vista que a roteirização é, em suma, um modo de organização da circulação espacial através de ferramentas de geoprocessamento, assinalamos alguns conceitos e métodos elaborados pelo geógrafo Milton Santos (2008) que, entrecruzados às ferramentas de geoprocessamento, tornam-se profícuos para o estudo aqui proposto.

2.1 – Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS)

A indústria automobilística foi um dos grandes motores da economia mundial no século XX. Entretanto, este sucesso tem se tornado um grande problema em muitas cidades brasileiras. As palavras engarrafamento e congestionamento popularizaram-se. Estes problemas de trânsito cada vez mais comuns prejudicam a atividade econômica pois encarecem o transporte de mercadorias e pessoas com o aumento do consumo de combustível, desconcertam o planejamento logístico empresarial com atraso da entrega de produtos, aumentam o tempo de deslocamento, reduzindo períodos de descanso e lazer da população, produzem poluição e intensificam o “estresse urbano”. Neste sentido, é evidente a necessidade de traçar novas estratégias para o planejamento e a gestão do trânsito.

Um destes rumos consiste no fornecimento de informações que auxiliem os usuários no planejamento de seus deslocamentos. Isto pode ser realizado através do uso de tecnologias diversas que, de modo geral, são chamadas Sistemas Inteligentes de Transportes (*Intelligent Transportation Systems, ITS*).

2.1.1 – Arquitetura de STI

Para que os Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS) possam fornecer informações efetivas e eficientes, os mesmos devem ser organizados de forma a garantir a economicidade, interoperabilidade e eficácia dos projetos. É necessário, pois, definir uma arquitetura para esses sistemas. O desenvolvimento da arquitetura de ITS necessita que vários passos sejam seguidos. Meirelles (2011) elenca sete passos. O primeiro envolve discussões públicas sobre os benefícios do referido sistema para seus usuários. O segundo diz respeito à descrição das metas a serem atingidas. O terceiro, por sua vez, abarca a definição do escopo básico do sistema, com descrição de suas funções, quais informações e componentes são necessários à implementação das trocas de informações. O quarto refere-se ao que o autor denomina como questões práticas inerentes à implantação do STI, ou seja, restrições institucionais e análises de custos. O quinto passo abarca projeções futuras e o sexto envolve o estabelecimento de programas de formação de pessoas para operacionalização do sistema.

Ainda nos termos de Meirelles (2011), a arquitetura de ITS depende da interação de três fatores, chamados de camadas de infra-estrutura, sendo elas: institucional, de transportes e de comunicações. A primeira é formada pelas organizações e regras sociais, além das funções desempenhadas pelas instituições e empresas privadas. A segunda é composta pela infra-estrutura física (usuários, veículos, centrais de controle e equipamentos viários). A terceira é aquela que proporciona a partilha de informações entre sistemas e usuários.

O autor enfatiza ainda que, de acordo com a arquitetura prevista pelo Departamento de Transportes dos Estados Unidos (US.DOT, 1996 *apud* Meirelles, 2010, p.05), é possível enumerar trinta tipos de serviços de ITS, que podem ser assim agrupados: a) Gerenciamento de viagens e tráfego; b) Operação de Veículos Comerciais (caminhões); c) Gerenciamento de transporte público; d) Pagamento eletrônico; e) Gerenciamento de serviços de emergência e f) Sistemas avançados de Segurança veicular.

Para Bazzan e Flügl (2007), os ITS envolvem a aplicação de modernas tecnologias de informação e podem ser classificados em duas grandes áreas: ATMS (*Advanced Travel Management Systems* ou sistemas avançados de gerenciamento de viagens) e ATIS (*Advanced Traveller Information System* ou sistemas avançados de informação ao motorista). A primeira refere-se à estrutura e à engenharia no que diz respeito ao controle e monitoramento de tráfego e segurança. A segunda está relacionada ao usuário do sistema de transporte no que diz respeito ao fornecimento de informações sobre o trânsito, etc. (*op.cit.*,p.03). Envolve os serviços de informação anterior à viagem (*pre-trip*), informações durante a viagem (*en-route*), orientações sobre rotas e trajetos, serviços de reservas e combinação de viagens, gerenciamento de incidentes (acidentes, eventos e obras), controle de tráfego. (*op.cit.*, pp.05-06)

Para as autoras, os ITS podem envolver desde avançados sistemas de informação ao motorista – difusão por meio de rádio, telefone e internet, por exemplo – até novas tecnologias que têm como objetivo a direção autônoma e a informatização de rodovias. Dentro da perspectiva atual de que os ITS correspondem a investimentos com melhor relação custo-benefício para a resolução de problemas relacionados aos deslocamentos no trânsito é uma das mais aceitas na atualidade, algumas das ferramentas mais utilizadas atualmente são os sistemas de roteirização, próximo assunto abordado neste estudo.

2.2 – Roteirização: definições e implicações

Tendo em vista o crescimento das cidades, o aumento da movimentação em determinadas regiões estaduais em função da dinâmica econômica local, o crescimento da comercialização de veículos, sistemas de roteirização têm sido considerados ferramentas essenciais para empresas, para o estado, para os usuários em geral, etc. Hoffman (*et. alli*, 2006) consideram que o referido serviço de ITS necessita de fontes confiáveis e rápidas de acesso à informações que otimizem a circulação no trânsito. Ghisi (*et. alli*, 2010) enfatizam que os custos com transportes têm representado a maior parte dos gastos logísticos das empresas, o que faz com que, visando à redução dos custos, sejam adotadas tecnologias da informação, especialmente uso e aperfeiçoamento de softwares de roteirização.

2.2.1 – Roteirização: a racionalização do transporte

Num mundo onde a palavra de ordem é racionalização, estoque zero, *just-in-time*, elevação da competitividade e exigência de qualidade elevada, o transporte representa um grande desafio de eficiência (Martins, 2009). O autor enfatiza que a roteirização pode ser caracterizada como a “racionalização dos transportes” perante as exigências do mundo atual. É neste contexto que a roteirização, ou seja, o processo de definição de roteiros, caminhos, itinerários marcados pela agilidade, eficiência e otimização tem ganhado relevância no campo da tecnologia da informação e geoprocessamento. Cunha (2010) aponta, citando Assad (1988), que a roteirização de veículos é uma das ferramentas que vêm apresentando elevado sucesso no ramo de Pesquisas Operacionais nas últimas décadas. Mas, qual a definição do termo? O autor destaca:

O termo roteirização de veículos, embora não encontrado nos dicionários de língua portuguesa, é a forma que vem sendo utilizada como equivalente ao inglês “*routing*” (ou “*routeing*”) para designar o processo para a determinação de um ou mais roteiros ou seqüências de paradas a serem cumpridos por veículos de uma frota, objetivando visitar um conjunto de pontos geograficamente dispersos, em locais pré-determinados, que necessitam de atendimento. (Cunha, 2010, p.02)

O termo “*roteamento*” também é utilizado pelo autor para definir o referido processo. O primeiro caso deste tipo a ser estudado foi chamado de “problema do caixeiro viajante” (“*traveling salesman problem*”, TSP). Nele, era necessário encontrar uma seqüência de cidades a serem percorridas pelo caixeiro viajante de modo que a distância total percorrida fosse minimizada e que cada local fosse visitado somente uma vez. A partir deste problema, novas restrições vêm sendo adicionadas a fim de melhor representar os distintos impasses nas rotas percorridas por pessoas e veículos, tais como: “restrições de horário de atendimento (janelas de tempo/horárias); capacidades dos veículos; frota de veículos de diferentes tamanhos; duração máxima dos roteiros dos veículos (tempo ou distância); restrições de tipos de veículos que podem atender determinados clientes.” (Cunha, 2010, p.03)

2.2.2 Classificação dos problemas de roteirização

Considerando Bodin *et al.* (1983), Assad (1991) e Laporte *et al.* (2000), observa-se que as principais características dos problemas de roteirização e programação são: tamanho da frota disponível, tipo de frota, garagem dos veículos, natureza da demanda, localização da demanda, características da rede, restrições de capacidade dos veículos, requisitos de pessoal, tempos máximos de rotas, operações envolvidas, custos, objetivos e outras restrições (variáveis do problema). Cunha (2010) considera que os problemas reais de roteirização podem ser classificados em dois grupos distintos. Um deles refere-se à “roteirização em meio urbano” em que tanto as rotas e a base estão localizadas na mesma área urbana. O outro diz respeito à “roteirização intermunicipal”, na qual os percursos são realizados entre pontos de municípios distintos da base e entre si. Neste caso, os percursos do roteiro são predominantemente rodoviários, sendo este o objeto de nossa pesquisa.

Enomoto e Lima (2007) apontam que os problemas de roteirização são mais complexos nas áreas urbanas. Já a roteirização intermunicipal ou rodoviária apresenta como característica o fato das distâncias serem longas, o que faz com que possam ser determinadas a partir de dados cujos atributos são a disponibilidade e a acessibilidade. Os autores ainda enfatizam que a densidade da malha rodoviária é baixa perante as distâncias a serem percorridas, além do fato de serem menores as incertezas quanto às restrições e condicionantes de tráfego. Destacamos que estes podem ser os motivos de terem sido menores os investimentos sobre a roteirização intermunicipal.

Autores como Enomoto e Lima (2007), Cunha (2010), entre outros, apontam que a classificação dos problemas de roteirização propostos por Bodin (*et. alli.* 1983) são fundamentais. Tais problemas são os seguintes: problemas de roteirização pura, problemas de programação de veículos e tripulações e problemas de roteirização e programação. Problemas de roteirização pura não consideram as variáveis temporais ou precedências entre as atividades para elaboração dos roteiros de coleta e/ou entrega. Problemas de programação de veículos e tripulações possuem restrições adicionais relacionadas ao tempo, quando várias atividades precisam ser executadas. Já problemas de roteirização e programação envolvem relações de precedência entre as atividades envolvidas e também restrições de janelas de tempo (horário de atendimento e outros).

Kaiser (2010), após realizar uma revisão de literatura (Bodin e Golden, 1981; Bodin *et al.*, 1983; Assad, 1988 e Ronen, 1988), destaca que os problemas de roteirização podem

apresentar diversas categorias de restrições: a) clientes (demanda, localização, prioridades de atendimento, tempo); b) tipo de frota; c) restrições dos veículos; d) funcionários/tripulação; e) tipo de operação; f) Tipo de carga transportada; g) estrutura da rede viária; h) tipo de rota. A estas categorias, o autor ainda indica que podem ser acrescentados aspectos referentes ao que ele designa por “*restrições viárias*”, ou seja, as características da rede viária, tais como: velocidade máxima permitida, proibição da circulação de determinados veículos; horários de maior circulação, entre outros.

Considerando a existência de um elevado número de parâmetros que podem compor um problema de roteirização, destaca-se que uma boa modelagem é de difícil realização, bem como a hierarquização destes parâmetros para elaboração de melhores caminhos.

2.3 – Métodos de solução do VRP

Os métodos de solução de problemas de roteirização de veículos (VRP) podem ser classificados em dois grupos gerais, conforme Kaiser (2010). Os métodos exatos sempre encontram uma solução ótima e ideal para o problema proposto. No entanto, seus custos operacionais podem ser inviáveis. Os métodos aproximativos não garantem uma solução ótima para o problema de roteirização. Consistem em bons métodos de aproximação que garantem uma boa aproximação da realidade. Adotaremos os métodos aproximativos na condução da investigação aqui proposta.

Os métodos aproximativos são muito discutidos na literatura pertinente ao assunto, podendo ser divididos em três grupos. O primeiro, dos métodos construtivos simples, são compostos através da inserção gradativa de pontos. O segundo, dos métodos construtivos de duas fases, têm duas estratégias: agrupamento de pontos e posterior roteirização ou vice-versa. Já o terceiro, dos métodos de melhorias, diz respeito à aplicação de melhorias nas soluções dadas para o problema utilizando os dois métodos mencionados anteriormente, de modo a produzir soluções finais que se aproximem de uma situação ótima. Na literatura, os últimos são também denominados de “*meta-heurística*”. Os avanços nas ferramentas de geoprocessamento e a criação de novos algoritmos, por exemplo, têm possibilitado tratar de um número maior de restrições de forma dinâmica através do uso do método de melhorias. Enomoto e Lima (2007, p.05), ao mencionarem Couto (2004), destacam que “as heurísticas existentes para resolver os problemas das rotas e entregas, nos softwares especializados no mercado, tendem a ser muito generalistas e não

costumam gerar resultados satisfatórios”. Cabe, pois, inserir novos elementos para que os resultados sejam, cada vez mais, próximos de uma situação real ótima.

2.4 – Sobre o conceito de espaço

Os problemas de roteirização têm como foco as noções de espaço e tempo, categorias relevantes nos estudos realizados no campo da Geografia. O problema de roteirização para o qual propomos tratamento neste estudo diz respeito, mais especificamente, aos modos como o espaço está presente nos roteiros e itinerários a serem percorridos entre dois pontos distintos.

O espaço, conforme Santos (2008), é, de um lado, um conjunto de objetos geográficos distribuídos sobre um território, sua “configuração geográfica ou espacial”. De outro lado, é também o que dá vida a estes objetos, os processos sociais envolvidos nestas configurações, funções e formas.

O espaço é resultado da junção indissolúvel de um “sistema de objetos” e um “sistema de ações” ou, em outras palavras, um conjunto inseparável de “fixos e fluxos” (Santos, 2008). Os fixos, também chamados sistemas de objetos técnicos pelo referido autor, são econômicos, sociais, culturais, religiosos, entre outros. Para exemplificá-los, podemos mencionar os pontos produtivos, as ruas, as estradas, as hidrelétricas, as casas de negócios, as fábricas, os bancos, as escolas, os *shoppings*, os hospitais, as lojas, as praças, os estádios, os restaurantes, os parques e outros locais destinados ao trabalho, às práticas culturais, ao lazer, entre outros. Os fixos definem-se pela qualidade, quantidade e densidade técnica que encerram (Santos, 1993).

Os fluxos, por sua vez, também denominados sistemas de ações, referem-se à movimentação, à circulação, à distribuição e ao consumo. Os fluxos podem ser de homens, produtos, mercadorias, ordens, informações, idéias. Sua diversidade advém dos volumes das movimentações, da intensidade das trocas, dos ritmos, cadências e durações dos acontecimentos. Os fluxos, ao atravessarem os espaços, não apenas os vivificam, mas produzem reflexos, facilitando e dificultando acumulações e empobrecimentos, concentrações de desconcentrações (Santos, 1993, 1994, 2008).

Fixos são objetos materiais localizados que, devido aos fluxos, tornam-se objetos sociais. Os fluxos dão sentido aos fixos. Eles ajudam a concretizar uma série de relações entre os objetos, sejam elas naturais ou artificiais. Objetos espacialmente fixados originam movimentos que dele saem e que a ele chegam. Fixos e fluxos são os grandes

estruturadores do espaço, processados por um jogo de relações dialéticas entre o externo e o interno, o antigo e o novo, o Estado e o mercado. Fixos e fluxos interagem, produzem-se, influenciam-se e alteram-se mutuamente (Santos, 2008).

O espaço é uma totalidade que inclui, pois, sua configuração e aquilo que o anima. No entanto, para se estudar o espaço, é preciso escolher um método que permita dividi-lo em partes para que o mesmo possa ser analisado. É neste sentido que o Santos (2008) propõe considerar que o espaço é formado por elementos que, embora dependentes entre si, contém algumas especificidades.

2.5 – Elementos espaciais

Para Santos (2008, p.16), os elementos do espaço são os homens, as firmas, as instituições, o meio ecológico e as infra-estruturas. Os homens são elementos na qualidade de fornecedores de trabalho. As firmas e as instituições são elementos que atendem a demanda pela produção exigida pelos homens, seja através da geração de bens, serviços, idéias, normas, ordens, etc. O meio ecológico compreende a base física do trabalho humano. As infra-estruturas, por sua vez, correspondem ao trabalho do homem materializado e espacialmente localizado tais como casas, prédios, plantações, rodovias, etc. Os elementos interagem entre si, sendo que há modificações constantes do meio ecológico por sistemas de engenharia e adaptações às condições exigidas pela produção de bens e serviços. As funções das empresas, especialmente as de grande porte, e das instituições como o Estado se confundem, se subjugam, trocam de papel.

Destaca-se que, em cada momento histórico, os elementos mudam seu papel e o valor que possui quando considerado em relação com os demais elementos e com o todo. Os elementos devem ter seus valores pensados em sua relação com as outras variáveis e como o todo ou contexto em que estão inseridas. Os elementos espaciais, para Santos (2008), estão submetidos a variações quantitativas e qualitativas. São, portanto, variáveis cujos valores diferenciam-se e mudam conforme o movimento histórico e as necessidades sociais.

Cada elemento do espaço tem um valor distinto de acordo com o lugar em que se encontra. Por exemplo, duas pistas de rolagem com o mesmo nível de conservação e trafegabilidade, mas localizadas em lugares diferentes atribuem aos seus usuários resultados distintos. Sua localização diversa constitui um dado que, conforme Santos (2008), leva à diferenciação de resultados. É preciso reconhecer o movimento do conjunto

ou contexto para poder corretamente valorizar cada elemento que o compõem e analisa-lo para, por fim, reconhecer concretamente este todo e propor soluções adequadas para problemas que nele se apresentem.

Neste trabalho, considera-se que os fatores de impedância ou “*restrições viárias*”, como já apontou Kaiser (2010), consistem nas condições dos elementos espaciais infra-estruturais que podem interferir no fluxo e circulação dos veículos, causando a redução da velocidade no deslocamento entre dois pontos distintos. Tais restrições de parada, circulação e velocidade são variações qualitativas e quantitativas dos elementos espaciais, também considerados variáveis às quais será possível atribuir um valor numérico para compor algoritmos que, aplicados ao software a ser utilizado, será capaz de gerar rotas que se caracterizem como melhores caminhos entre dois pontos distintos do território estudado.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – SRE/MG: Metodologia e descrição dos dados

Para a elaboração de um projeto de roteirização em trechos rodoviários compreendidos dentro do Estado de Minas Gerais, são utilizados dados vetoriais produzidos pelo DER/MG a partir dos levantamentos de campo que utilizaram GPS de precisão (L1) para o levantamento de toda a malha viária estadual e federal de Minas Gerais para o trabalho denominado Projeto SIG-DER. Atualmente, este trabalho encontra-se disponível no ambiente de intranet do referido órgão. Disponível nos formatos ESRI Shapefile e também no formato SDO (Spatial Data ORACLE), os arquivos serão trabalhados somente em ambiente de trabalho local visto que ainda existem restrições técnicas e administrativas para produção via web.

Dois tipos de informação espacial encontram-se disponíveis para a elaboração de um modelo conceitual de roteirização:

A – Vetores lineares segmentados por trechos que representam as rodovias estaduais e federais de Minas Gerais contendo atributos como:

- Código do Trecho (Chave Primária);
- Código da Rodovia;
- Descrição do Início do Trecho e Descrição do Fim do Trecho;
- Quilômetro Inicial do Trecho e Quilômetro Final do Trecho
- Extensão do Trecho;
- Categoria da Rodovia (pavimentada, duplicada, leito natural, em obras de pavimentação, entre outros);
- Classificação Hierárquica do Trecho (federal, estadual, ligação e acesso) e
- Volume de tráfego.

B – Informação pontual fixa ou dinâmica, que inclui os seguintes dados:

- Sedes municipais atendidas pelo recorte de rede rodoviária do Triângulo Mineiro;
- Obras de Artes especiais do tipo pontes e viadutos, com restrições especiais de peso e altura;

- Restrições de tráfego (queda de taludes, pontes, viadutos, etc), atualizado semanalmente;
- Nível de avaliação da qualidade do pavimento, atualizado semestralmente.

Após uma análise dos referidos dados e dos elementos que seriam de interesse do usuário da malha rodoviária, será possível elaborar e apontar um conjunto de características que possam hierarquizar e definir diferentes graus de impedâncias de todos os trechos rodoviários de Minas Gerais.

Realizada esta etapa, os dados serão manipulados através das ferramentas com as quais o DER/MG conta atualmente, quais sejam, o ESRI ArcInfo e extensões, *software* capaz de gerar uma avançada edição topológica para uma modelagem final feita pela extensão denominada Network Analyst.

O conjunto de pontos de interesse para a roteirização proposta está caracterizado pelo banco de dados espacial fornecido pelo Instituto de Geografia Aplicada de Minas Gerais – IGA/MG –, que apresenta pontualmente todos os municípios e distritos oficiais de Minas Gerais.

Cabe ressaltar que a roteirização analisará apenas os trajetos de viagem rodoviários entre localidades distintas sem considerar, portanto, rotas intra-urbanas, observada a inexistência de uma base de dados capaz de sustentar esse tipo de análise espacial.

Pretende-se utilizar algoritmos da ferramenta Network Analyst, atribuindo pesos e notas aos elementos espaciais estudados. A partir de tal procedimento, intenta-se obter valores que possam ser ordenados por grau de impacto no percurso a ser realizado nos trechos determinados.

3.2 – Caracterização da área de estudo

A área objeto dos testes para o presente estudo corresponde à Região do Triângulo Mineiro, cujos limites geográficos são dados pelas coordenadas (LatLong, SIRGAS2000) - $-51^{\circ}4'$ a $-46^{\circ}30'$ e $-17^{\circ}56'$ e $-20^{\circ}18'$. Está situada no extremo oeste do estado de Minas Gerais, na divisa com os seguintes estados: São Paulo (ao sul), Mato Grosso do sul (a oeste) e Goiás (ao norte). Sua localização pode ser vista na Figura 01.



Figura 01 - Localização da área de estudo – Triângulo Mineiro (MG) e recorte rodoviário estudado.

3.3 – Adequação dos Dados do Georreferenciamento Rodoviário do DER/MG

A partir do conhecimento do trabalho de georreferenciamento das malhas estadual e federal conservadas pela União e pelo Governo de Minas Gerais, organizadas segundo as premissas do Sistema Rodoviário Estadual (SRE), este estudo delimitou como área de pesquisa a macrorregião do Triângulo Mineiro para analisar possibilidades de roteirização de melhores caminhos.

A referida malha viária georreferenciada é composta por uma rede de vetores que representam os eixos rodoviários. Os mesmos estão associados a uma tabela de atributos com diversas informações subdivididas nos trechos oficiais previstos pelo DER/MG e DNIT (Departamento nacional de Infra-estrutura de Transportes), tais como: nomenclatura da origem e do destino (início e fim de trecho), quilometragem final e inicial, extensão, tipo de rodovia, classificação funcional da rodovia e jurisdição (Vide recorte da tabela de atributos no Anexo 1).

A escolha da ferramenta Network Analyst foi realizada com o objetivo de se manter a mesma plataforma do sistema de informações geográficas de onde foi feita a extração dos dados da referida área de estudo. Nos dados originais capturados, somente foram realizados pequenos ajustes exigidos pela ferramenta escolhida e ainda não exigidos para a consistência do referido SIG. Foram resolvidas questões rodoviárias urbanas através de ajustes topológicos, visto que tal malha digital já possuía grande maturidade e consistência topológica para suportar roteirizações.

Os arquivos recortados no formato ESRI Shapefile do SIG original foram importados para o formato ESRI Geodatabase para realização destes pequenos ajustes, bem como para a criação da malha de arcos e nós, que deve considerar tanto os vértices iniciais e finais de cada arco como outros dados pontuais que representam as sedes municipais e as obras de arte especiais (pontes e viadutos) presentes nesta malha.

3.4 – Cálculo de impedância de elementos rodoviários

Procedeu-se o cálculo das impedâncias a partir da melhor maneira de sistematização aplicável, realizada por meio da atribuição, às variáveis possíveis, de pesos quantitativos reais, capazes de descrever de forma fidedigna a ocorrência do fenômeno de deslocamentos em veículos automotores. Levou-se em consideração o princípio físico

elementar que analisa o tempo despendido (custo de tempo) em função do deslocamento a ser cumprido na velocidade média desempenhada.

Tal método foi aplicado com o objetivo de se obter uma rede de trechos classificada e hierarquizada conforme valores de impedância. Tais procedimentos determinaram rotas com menor custo de viagem e que, ao mesmo tempo, fossem capazes de representar o melhor caminho segundo o elenco de parâmetros apresentados.

Com base nos estudos de FREITAS (2003), foi aplicado o cálculo de “distância_tempo” para a determinação do campo de impedâncias relativo a cada trecho rodoviário do recorte espacial do Triângulo Mineiro. O conceito utilizado pelo autor refere-se ao tempo despendido para o deslocamento completo de um trecho baseado na distância deste segmento.

No entanto, cumpre ressaltar que o simples arbitramento de velocidades médias para o cálculo de tempos médios despendidos não é suficiente para explicar a complexidade do fenômeno de transportes atual, regido por grande variedade de parâmetros responsáveis por maiores ou menores “rugosidades” do deslocamento com veículos automotores.

Sendo assim, para não trabalhar com o arbitramento de velocidades médias baseadas nos limites oficiais estabelecidos, bem como para não arbitrar com total subjetividade valores de velocidade em função de conhecimentos gerais desta malha viária, primou-se por utilizar os seguintes parâmetros: qualidade do pavimento, situações de interseção com tráfego urbano e desacelerações oriundas de intervenções (obras).

Uma vez que o SIG de origem trazia tais informações em diferentes campos de sua tabela de atributos, coube ao pesquisador atribuir pesos com o intuito de melhor representar as preferências de tráfego do usuário comum das vias rodoviárias do Estado em função das citadas características em cada trecho. As notas atribuídas a cada uma das características e o peso de cada variável estão descritos nos quadros a seguir:

Peso 50%	
Pavimento	
Classificação	Nota
Bom	01
Regular	03
Mau	05
Terra	10
Cascalho	07

Peso 25%	
Perímetro Urbano	
Classificação	Nota
Sim	06
Não	01

Peso 25%	
Trecho em Obras	
Classificação	Nota
Sim	08
Não	03

O cálculo da velocidade média desenvolvida a partir das notas ponderadas de cada trecho foi desenvolvido levando-se em consideração as velocidades mínimas e máximas estabelecidas pelas limitações de velocidade do Código de Trânsito Brasileiro e pelos conhecimentos prévios do pesquisador sobre as reais condições da malha em questão, com o objetivo geral de se obter tempos finais de viagem mais próximos à realidade.

A velocidade desenvolvida (Km/h) foi calculada para cada um dos trechos rodoviários com a partir da seguinte fórmula¹:

$$\frac{\Delta N}{N_{m\acute{a}x} - n} = \frac{\Delta V}{v - V_{\min}}$$

$$\Downarrow$$

$$v = \frac{\Delta V (N_{m\acute{a}x} - n)}{\Delta N} + V_{\min}$$

Após tal procedimento, os resultados destas equações foram divididos pela distância nominal (em Km) de cada um dos trechos rodoviários. Com isto, desejava-se obter o tempo médio de viagem de cada um dos segmentos (em horas) para, posteriormente, calcular o custo de viagem em unidades de tempo.

Tal base, trabalhada no formato Shapefile, foi importada para o formato do banco de dados do tipo Personal Geodatabase para a posterior criação de uma Network Dataset. Tais transformações foram necessárias para a configuração da rede com parâmetros de impedância e restrições, bem como para aplicação de rotas e problemas teóricos apresentados nos resultados da pesquisa.

A malha foi criada em função de um único campo de impedância o qual, em seguida, foi associado aos tempos de viagem de cada trecho rodoviário calculados na etapa anterior (Vide telas de configuração nos anexos).

¹ Onde: N = Nota Máxima, n = Nota do trecho, V = Velocidade e v = Velocidade desenvolvida

4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises de deslocamentos na malha viária do Triângulo Mineiro serão apresentadas em dois itens, relativos à análise de simulação de rotas de melhores caminhos e à resolução de problemas teóricos de transporte modal. Na primeira delas, não serão abordadas restrições de tráfego do tipo “barreira”. Na segunda análise, serão apresentados tipos de restrição de tráfego segundo a modalidade de veículo ou perfil de usuário.

4.1 – Roteirização de Melhores Caminhos

Frente à grande facilidade de informações disponíveis atualmente, os usuários de rodovias normalmente não consideram a distância linear como o único parâmetro de análise de um trajeto entre dois ou mais pontos a ser percorrido em uma rede rodoviária. Normalmente, usuários de rodovia utilizam algumas informações como subsídios para planejar e determinar qual rota de viagem pode ser mais vantajosa do ponto de vista espacial (menor caminho) ou temporal (melhor caminho).

Nos últimos anos, as condições relativas ao pavimento tem se apresentado como um importante elemento de interesse dos usuários/planejadores de rotas. O índice de qualidade de pavimentos avaliado semestralmente pela Diretoria de Operações do DER/MG reflete justamente a qualidade do trecho a partir do ponto de vista de um engenheiro civil com amplo conhecimento de engenharia rodoviária. Nesta pesquisa, a distinção entre trecho pavimentado e trecho não-pavimentado foi essencial para a definição de velocidades diretrizes (máximas e mínimas), importantes para o cálculo de impedâncias.

Com base em tais parâmetros, alguns ensaios de rota foram realizados, conforme apresentado a seguir.

4.1.1 Variável Pavimento

Para a análise da variável pavimento, foi estudada a rota Ituiutaba – Uberaba, que pode ser realizada por dois caminhos distintos: pelos trechos pavimentados ou duplicados das BRs 365 e 050, que totalizam extensão de 233 Km; ou por outros trechos pavimentados ou não-pavimentados, que totalizam 172 Km.

Tal trecho foi escolhido porque, ao analisar os resultados obtidos a partir da simulação com a ferramenta Network Analyst para diferentes trechos, o mesmo apresentou

o maior contraste de condições de todo o recorte do Triângulo Mineiro em função da dualidade de rodovias de terra sem qualquer tratamento plani-altimétrico (rodovias planejadas) e de rodovias pavimentadas, inclusive com trechos duplicados.

Os resultados apresentados a seguir foram obtidos a partir de duas simulações diferentes. A primeira simulação refere-se à referida rota sem a consideração de impedâncias e a segunda diz respeito ao deslocamento entre os mesmos pontos, porém após a aplicação do roteirizador calibrado pelas impedâncias propostas neste estudo. Os tempos de viagem somados pelo software na exibição de resultados apresentaram justamente o somatório do custo dos tempos (calculados na etapa anterior) dos trechos necessários para a realização do trajeto. As figuras XX e XX ilustram a roteirização simulada nas duas situações.

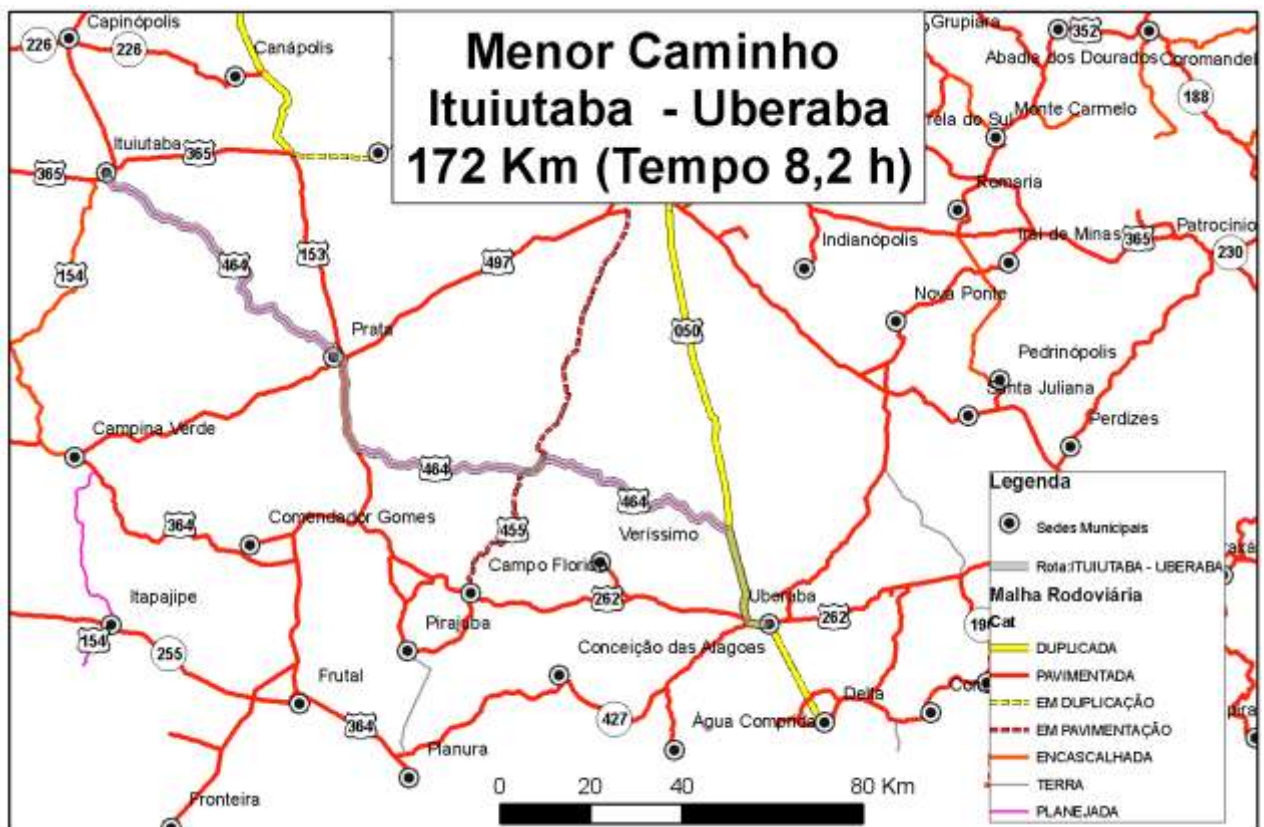


Figura 2 – Rota Ituiutaba – Uberaba considerando a menor distância linear através de trechos rodoviários pavimentados e não-pavimentados.



Figura 03 – Rota Ituiutaba – Uberaba considerando o caminho proposto considerando a impedância calculada a partir da velocidade/tempo.

Na primeira simulação, pode parecer exagerado o tempo de 8,2 horas para se cumprir um trecho de 173 Km. No entanto, cumpre ressaltar que nesta rota existem trechos cuja velocidade desenvolvida é de 25 Km/h, totalmente condizentes com a situação da via, que contém segmentos de terra, com ausência de tratamento superficial (encascalhamento) e sem tratamento geométrico de plani-altimetria.

Concomitantemente, ressalta-se que o tempo de viagem de 2,8 horas apresentado na segunda simulação para o trecho proposto entre as duas cidades é totalmente associável com a realidade segundo conhecimentos prévios do pesquisador, variando somente em função do tráfego.

Quanto ao método, destaca-se que a adoção de médias ponderadas em função da qualidade do pavimento analisada, tanto no caso apresentado como em outros casos da rede do Triângulo Mineiro, não representou a produção de rotas alternativas quando comparadas rotas geradas em redes sem impedâncias. No entanto, o sistema de notas relativo à qualidade dos pavimentos serviu como parâmetro de refinamento dos tempos médios de viagem, sobretudo em deslocamentos maiores do que 100 quilômetros, conforme apurado em testes realizados.

Inicialmente, havia a proposta de se criar modalidades de viagem de passeio com a possibilidade de filtro para se evitar o tráfego em segmentos não pavimentados enquanto barreiras de tráfego. Todas as simulações realizadas pelo pesquisador, não apresentadas graficamente neste trabalho, demonstraram que o sistema de notas ponderadas adotado para o cálculo de velocidades desenvolvidas e respectivas impedâncias foi capaz de criar um filtro natural, evitando o tráfego em segmentos não pavimentados.

4.1.2 Variável Perímetro Urbano

A utilização de ponderações no que tange à influência da interseção entre trechos rodoviários rurais e trechos rodoviários urbanos determinou a preferência de caminhos com menor tráfego urbano, portanto, com maiores possibilidades de velocidades mais elevadas. Normalmente, os usuários de rodovias têm conhecimento de que a entrada em perímetros urbanos das grandes e médias cidades deve ser evitada, visto que em geral a combinação com trânsitos locais tende a aumentar os tempos de viagem em função de diminuição da velocidade média de trânsito.

No Estado de Minas Gerais, há grande quantidade de situações de interseção rodoviária com grandes perímetros urbanos, tratados com contornos ou alças que tendem a diminuir o contato rodovia-cidade. No recorte rodoviário trabalhado, a simulação de rotas considerou um trajeto que depende da abordagem do perímetro urbano de Uberlândia, maior centro urbano em questão e que possui alternativas de tráfego (contornos). Os resultados estão apresentados a seguir:



Figura 4 – Rota Prata - Araguari considerando a menor distância linear (atravessando o perímetro urbano de Uberlândia).

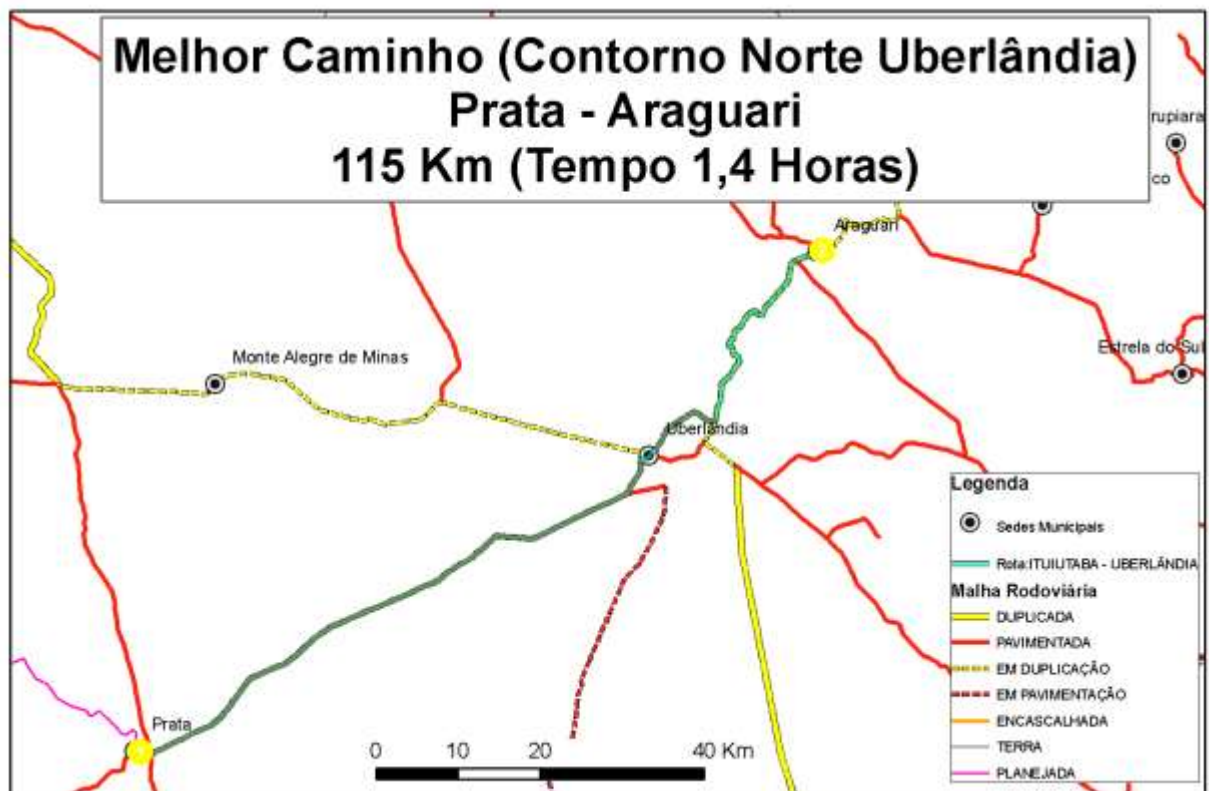


Figura 5 – Rota Prata - Araguari considerando a impedância. Note-se o desvio pelo contorno norte de Uberlândia.

Conforme apresentado, a variação de notas de distinção aos segmentos relativos a perímetros urbanos não representa em si grandes valores quantitativos referentes ao tempo total de viagem, visto que tais segmentos não são de elevada extensão frente a grandes trajetos rodoviários. No entanto, sua distinção apresenta-se como importante parâmetro para a elaboração de rotas que sejam capazes de optar por contornos e anéis rodoviários nas localidades que disponham de mecanismos de facilitação do tráfego rodoviário. Neste sentido, a avaliação da variável perímetro urbano torna-se indispensável para uma boa prática de roteirização rodoviária de âmbito estadual, capaz de apresentar tempos de viagem e rotas condizentes com a realidade.

4.1.3 Variável Situação de Obras

A análise da condição da malha no tocante à sua condição temporária de obras de pavimentação, restauração ou duplicação mostra-se relevante para a análise de tempos de viagem a serem computados, uma vez que tais intervenções, normalmente, ocasionam variações de velocidade e restrições de tráfego significativas para o contexto da utilização de determinada malha rodoviária.

Em geral, as obras de intervenção rodoviária causam situações de tráfego em meia pista ou redução de faixas de rolamento, que podem reduzir a velocidade média de operação ou paralisar alternadamente sentidos de tráfego. O usuário de via nem sempre possui amplo conhecimento de todo o contexto de obras que acontecem em âmbito regional ou estadual e, por tal motivo, uma ferramenta capaz de informar e apresentar alternativas de tráfego é uma solução de gestão de grande utilidade para a coordenação de operação de tráfego, especialmente em escala regional.

Os resultados obtidos pela simulação de tráfego nos locais com presença de obras do Triângulo Mineiro estão apresentados a seguir.



Figura 6 – Rota Uberlândia - Campo Florido, considerando a menor distância linear através de trechos rodoviários em obras.



Figura 7 – Rota Uberlândia - Campo Florido, considerando o melhor distância linear através de trechos rodoviários pavimentados e não-pavimentados baseados no cálculo de impedância.

Conforme apresentado neste exemplo (Trecho Campo Florido – Uberlândia), novamente ficou constatado que a simples distância linear não pode ser utilizada como único fator de determinação de roteirização entre dois pontos. Analisando-se grandes segmentos em obras, cumpre ressaltar que os mesmos possuem praticamente o mesmo comportamento de uma rodovia de terra, sendo que, gradativamente, têm seu fator de impedância reduzido de acordo com a execução de seu cronograma.

Neste trabalho, os trechos em obras somente foram distintos no que tange à principal classificação, isto é, a respeito da tipologia de obras de pavimentação ou obras de duplicação, assumindo os mesmos pesos para ambos os casos, uma vez que não foi possível implementar as variáveis de tráfego médio para melhor abordar esta questão. A classificação de obras deveria ser mais precisa, englobando toda a tipologia de obras de implantação e manutenção. No entanto, no recorte de rede rodoviária estudado, não foi possível levantar todas as pequenas e pontuais intervenções.

4.2 – Problemas Teóricos com aplicações de restrições físicas permanentes ou eventuais

Neste item, pretende-se entender como as restrições físicas eventuais ou fixas podem ser abordadas na simulação de roteirizações de diferente tipos de viagem, baseados em categorias modais de transporte. Tendo em vista que a área de estudo escolhida apresenta grande particularidade relativa ao transporte de cargas entre a região Sul e as regiões Centro-Oeste e Norte do país, além do próprio tráfego estadual, decidiu-se abordar a questão dos transportes pesados.

Inicialmente, a simulação de rota proposta buscou analisar modalidades de tráfego de cargas com restrições das dimensões (altura x largura) e peso (em toneladas). Conhecidamente, os pontos de restrição são localizados nas pontes ou viadutos onde a plataforma rodoviária tende a apresentar estreitamentos e limitação de peso por eixos.

A ferramenta Network Analyst apresenta funcionalidade de carregar restrições a partir de uma camada (layer) de atributos de pontos, que tem como finalidade tornar os valores de impedância infinitos naquele segmento para que, obrigatoriamente, a rota proposta seja desviada para a alternativa mais viável.

Salienta-se que, ao estudar rotas baseadas em barreiras restritivas de altura, largura e peso de obras de arte especiais, somente viadutos e pontes pertencentes à conservação do DER/MG foram analisados para a elaboração de rotas, visto que não existe um

levantamento técnico específico das mesmas estruturas federais, conservadas pelo DNIT. Portanto, neste esforço acadêmico, restou prejudicada a análise totalmente fiel à realidade em relação a todas as possíveis barreiras de peso, largura e altura.

O mapa a seguir apresenta a distribuição de 117 pontos referentes a pontes ou viadutos que possuem, em suas tabelas de atributos, informações relativas à extensão, largura, altura de gabarito e tonelagem limite de seu trem-tipo. Tais informações foram obtidas recentemente por levantamento técnico em todas as pontes de conservação do DER/MG e apresenta total confiabilidade para este estudo.

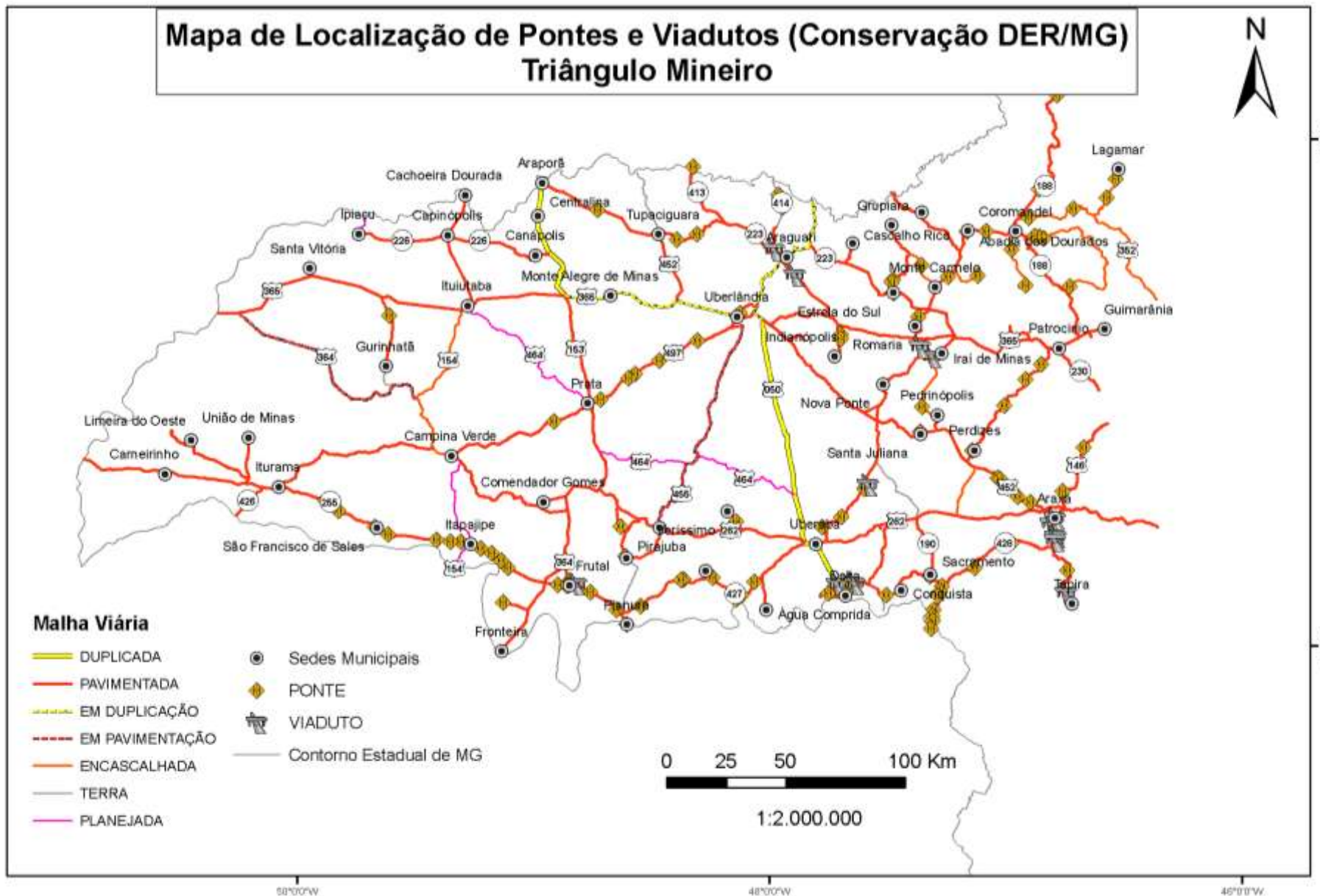


Figura 8 – Mapa de Localização das Pontes e Viadutos da Área de Estudo sob conservação do DER/MG.

A simulação de tráfego em função de restrições trabalhou com uma situação hipotética de um transporte com carga de 35 toneladas (P), de largura (L) de 8 metros e altura de 5 metros (H), compatível com transportes especiais de turbinas, silos, caldeiras e grandes maquinários, que demanda autorização especial de tráfego.

Foi determinada uma extensa rota ligando as cidades de União de Minas a Araxá, a fim de demonstrar quais seriam os desvios propostos pela ferramenta Network Analyst em função das barreiras existentes.

Através da seleção por atributos utilizando o comando “[GABARITO] < 5 OR [LARGURA] < 8 OR [CAPACIDADE] < 35”, foram selecionadas todas as obras de arte com as restrições propostas na situação hipotética acima descrita. Depois deste passo, foi criada uma camada (*layer*) temporária através do comando “*Create Layer from Selected Features*” utilizado para a determinação de todas as barreiras (*barriers*) através da ferramenta Network Analyst. Os resultados estão apresentados nos mapas a seguir.



Figura 9 – Rota União de Minas – Araxá, considerando o melhor caminho sem restrições (barreiras).



Figura 10 – Rota União de Minas – Araxá, considerando o melhor caminho com as restrições de altura, largura e peso propostas.

Observadas as alternativas de rotas propostas e os respectivos aumentos de tempo de viagem e deslocamento, conclui-se que a utilização de camadas (layers) para a geração de barreiras é totalmente viável para se conhecer o contexto de rotas temáticas, segundo quaisquer que sejam os elementos referentes às restrições de tráfego para a caracterização de impedimento de passagem. Outros ensaios previstos nos objetivos não foram realizados, visto que, no cenário atual, não existem pontes danificadas ou taludes desmoronados sob plataformas rodoviárias no recorte da área de estudo. Portanto, não faria sentido simular tais eventos negativos.

Foi verificada uma restrição técnica da ferramenta Network Analyst relacionada à criação dos pontos de barreiras. Para uma modelagem completa, há necessidade de se manter todos os pontos de restrição em uma única camada. Portanto, se houver temas diferentes tais como pontes, viadutos, quedas de taludes, acidentes com interrupção total de via e alagamentos, todos estes elementos demandam estar associados em uma única camada para serem indexados como barreiras.

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises de deslocamentos na malha viária do Triângulo Mineiro nos resultados da pesquisa objetivaram analisar essencialmente as rotas propostas pela ferramenta Network Analyst. O objetivo deste trabalho não era definir um modelo totalmente capaz de estabelecer indiscutivelmente os melhores traçados a serem percorridos nos menores tempos possíveis com total precisão, mas sim o de discutir se a utilização da ferramenta de geoprocessamento escolhida era capaz de apresentar simulações comparáveis com a realidade.

A partir das análises de comportamento das rotas propostas em função das variáveis abordadas (tipologia de pavimento, da ocorrência de perímetros urbanos e da existência de obras), ficou constatado que a determinação de impedâncias em função do cálculo de velocidade desenvolvida (*velocidade_tempo*) é uma boa forma de orientar a ferramenta adotada para produzir rotas associáveis com as práticas de deslocamento do usuário de rodovias. Este sistema de notas ponderadas atendeu plenamente ao recorte rodoviário estudado – Triângulo Mineiro – que apresenta densidade média de rodovias e que em outros recortes, possivelmente, poderiam existir inadequações a serem resolvidas com outras análises.

A utilização destas variáveis com notas e ponderações através do cálculo de *velocidade_tempo*, especialmente em relação à abordagem de qualidade de pavimentos, mostrou-se totalmente adequada à concepção de rotas calibradas, que podem ser associáveis a “melhores caminhos”. Pode-se compreender, pois, que a possibilidade de incorporar novos dados rodoviários ao cálculo de impedâncias seria bastante proveitosa para uma nova calibração do sistema em termos de tempos de viagem.

Em relação à simulação de restrições de trânsito, ressalta-se que o exemplo dos impedimentos gerados por larguras, alturas e pesos de carga assume, sem dúvida, elevada importância na elaboração de rotas inteligentes para determinados tipos de transportes modais. No entanto, a análise de ocorrências emergenciais (quedas de taludes e estruturas danificadas) não foi abordada, visto que, durante a pesquisa, não aconteceram na área pesquisada e por opção do pesquisador não foram hipoteticamente abordadas. A única restrição observada se deu em relação à necessidade de uma modelagem mais avançada para se mesclar todos os elementos a fim de alcançar uma roteirização efetivamente capaz de criar rotas alternativas a todas as restrições impostas simultaneamente.

Este trabalho não objetivou a criação de uma modelagem traduzida em ferramenta ou script capaz de criar rotas de melhores caminhos que pudessem resolver todos os problemas de roteirização de veículos de forma integrada, incluindo características dos trechos rodoviários e elementos eventuais ou intermitentes associáveis a malha rodoviária do Triângulo Mineiro. De fato, tal processo demandaria grande esforço em desenvolvimento de scripts e modelos ainda não existentes na plataforma ESRI Network Analyst, os quais o pesquisador deste trabalho não possuía prazo suficiente para elaborar, mas não ficando descartada tal idéia para trabalhos futuros.

Cumprido destacar que a ferramenta *Network Analyst* apresentou-se capaz de atender aos objetivos de roteirização esperados, superando as expectativas por ser mais maleável quanto a formatação topológica dos dados de entrada. Diferentemente de outros aplicativos que exigem um maior rigor topológico de segmentação, a ferramenta possibilitou que os dados do DER/MG pudessem ser trabalhados sem grandes alterações em sua estrutura física e alfanumérica de atributos.

Esta pesquisa contribuiu para a formulação de um arcabouço metodológico para orientar o desenvolvimento de um aplicativo web, a ser administrado pelo próprio ArcGIS Server, também utilizado pelo DER/MG, que tenha a capacidade de nortear a formulação de quaisquer roteiros de melhores caminhos rodoviários no Estado de Minas Gerais, inclusive como ferramenta administrativa aos gestores do planejamento governamental e a todos os usuários de rodovias do Estado de Minas Gerais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAZZAN, A.L.C., KLÜGL, F. *Sistemas Inteligentes de Transporte e Tráfego: uma Abordagem de Tecnologia da Informação* (2007). Disponível em: <http://www.de9.ime.eb.br/~sousam/af/cd/pdf/arq0239.pdf>, Acesso em: 01/10/2011

CUNHA, C. B. *Aspectos Práticos da Aplicação de Modelos De Roteirização De Veículos A Problemas Reais* (2010) . Disponível em: http://www.ptr.usp.br/docentes/cbcunha/files/roteirizacao_aspectos_praticos_CBC.pdf. Acesso em: 01/10/2011

ENOMOTO, L. M.; LIMA, R. S. *Análise da Distribuição Física e Roteirização em um atacadista*. Produção, v.17, n.1, PP.094-108, 2007.

FREITAS, Christian Rezende. Construção e aplicação de modelo de rede em Ouro Preto: utilização de fatores ambientais e logísticos no cálculo de impedâncias.

HOFFMAN, E. H., AEBI, K. W. Z. e BORTOLETO, S. *Sistema de Roteirização Urbana* (2006). Disponível em: <http://conged.deinfo.uepg.br/artigos.htm>, Acesso em: 01/10/2011

KAISER, M.S., *Uma contribuição a modelagem dos problemas de roteirização de veículos* (2010) Disponível em: http://www.riodetransportes.org.br/index.php?option=com_docman&task=doc_details&gid=151&Itemid=219, Acesso em: 01/10/2011

MARTINS, M. *Roteirização: a racionalização do transporte*. (2009). Disponível em: <http://www.administradores.com.br/informe-se/artigos/roteirizacao-a-racionalizacao-do-transporte/29542/>, Acesso em: 01/10/2011

MEIRELLES, A. A. C. *Sistemas de Transportes Inteligentes: aplicação da telemática na gestão do trânsito urbano* (2011). Disponível em: http://www.ip.pbh.gov.br/ANO1_N1_PDF/ip01_01meirelles.pdf , Acesso em: 01/10/2011

SANTOS, M. *A urbanização brasileira*. São Paulo: Hucitec, 1993.

SANTOS, M. *Espaço e método*. 5. ed., São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2008, 120 p.

SANTOS, M. *Por uma economia política da cidade*. SP: Hucitec /Educ, 1994.

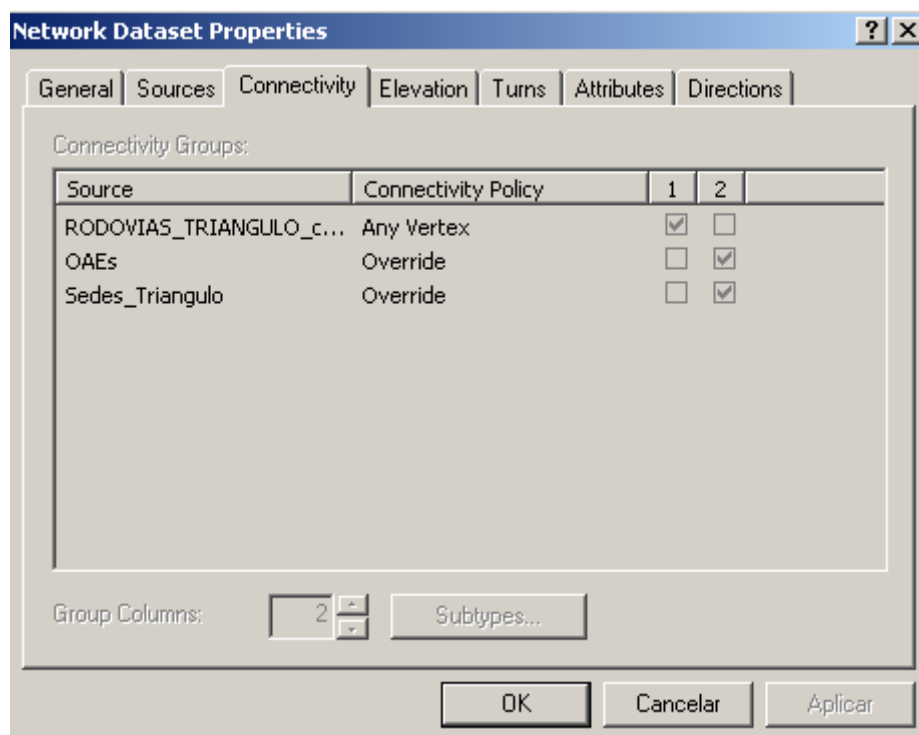
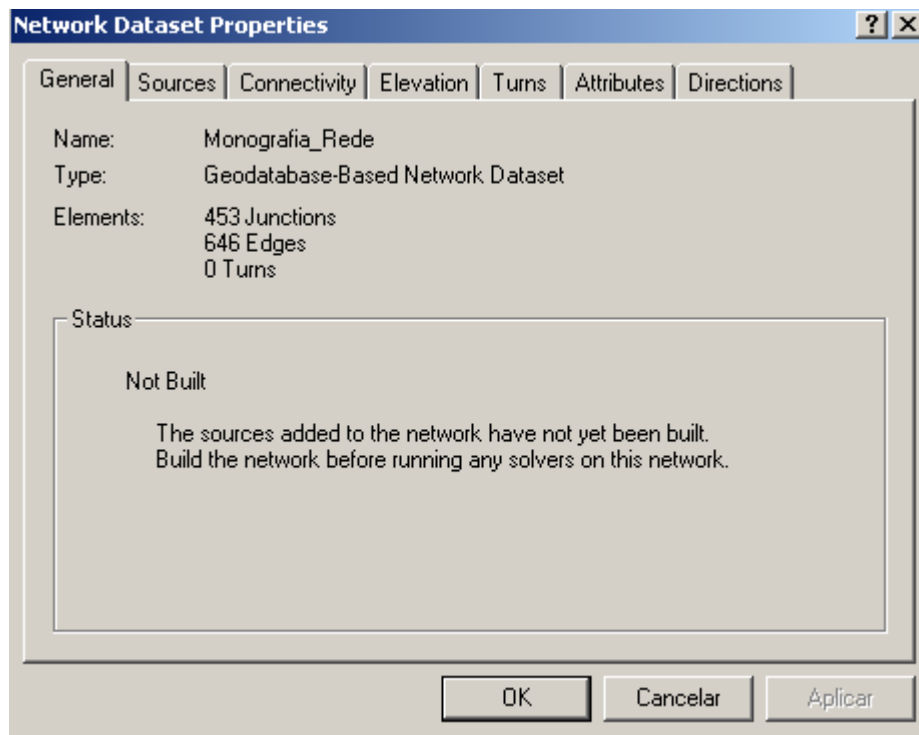
Sites da internet

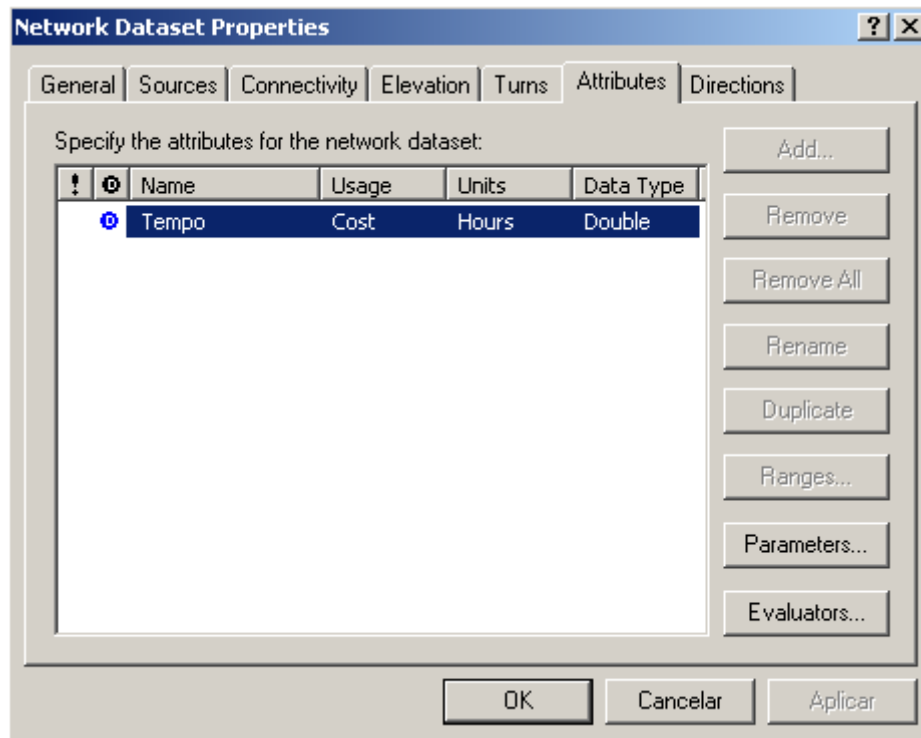
<http://www.synoptikasolutions.com/sig.html>, Acesso em: 01/10/2011

<http://www.der.mg.gov.br>, Acesso em: 01/08/2011

ANEXOS

Telas captadas durante a criação da rede de roteirização





Recorte da Tabela de Atributos da camada de eixos rodoviários com destaque aos campos utilizados no cálculo de impedâncias.

SGPRE																	
SGPRE	cod	Exprs	Sigla	Sup	Histori	pista	Purbano	EM OBRAS	Vel Max	Vel min	Nota traf	Nota pista	Nota Purb	Nota Obras	Nota pond	Vel desenv	TEMPO
352BMG0173	BR	352	BR352	NPV		ENCASCALHAD	NÃO	NÃO	60	30	7	7	1	1	4	50	0,83
352BMG0180	BR	352	BR352	NPV		ENCASCALHAD	NÃO	NÃO	60	30	7	7	1	1	4	50	1,17
146CMG0090	MGC	146	MGC146	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,08
146CMG0100	MGC	146	MGC146	PAV		B	SIM	NÃO	80	40	1	1	8	1	2,75	72,222221	0,03
146CMG0110	MGC	146	MGC146	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,14
146CMG0112	MGC	146	MGC146	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,3
146CMG0114	MGC	146	MGC146	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,2
154CMG0086	MGC	154	MGC154	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,13
154CMG0060	MGC	154	MGC154	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,27
154CMG0050	MGC	154	MGC154	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,04
154CMG0056	MGC	154	MGC154	PAV		B	SIM	NÃO	80	40	1	1	8	1	2,75	72,222221	0,02
154CMG0065	MGC	154	MGC154	PAV		R	SIM	NÃO	80	40	1	1	8	1	2,75	72,222221	0,02
154CMG0070	MGC	154	MGC154	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,04
154CMG0074	MGC	154	MGC154	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,04
154CMG0078	MGC	154	MGC154	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,12
154CMG0082	MGC	154	MGC154	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,06
452CMG0113	MGC	452	MGC452	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,01
452CMG0115	MGC	452	MGC452	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,25
452CMG0118	MGC	452	MGC452	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,14
452CMG0120	MGC	452	MGC452	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,06
452CMG0123	MGC	452	MGC452	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,29
455CMG0040	MGC	455	MGC455	PAV	PLA(20	B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,31
455CMG0050	MGC	455	MGC455	NPV		TERRA	NÃO	NÃO	40	20	9	10	1	1	5,5	30	0,93
455CMG0060	MGC	455	MGC455	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,11
461CMG0025	MGC	461	MGC461	NPV		TERRA	NÃO	NÃO	40	20	9	10	1	1	5,5	30	0,22
461CMG0022	MGC	461	MGC461	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,07
461CMG0019	MGC	461	MGC461	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,11
461CMG0016	MGC	461	MGC461	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,09
461CMG0010	MGC	461	MGC461	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,05
461CMG0013	MGC	461	MGC461	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,06
461CMG0028	MGC	461	MGC461	NPV		TERRA	NÃO	NÃO	40	20	9	10	1	1	5,5	30	0,2
464CMG0060	MGC	464	MGC464	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,41
464CMG0090	MGC	464	MGC464	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,12
464CMG0070	MGC	464	MGC464	PAV		B	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,25
497CMG0080	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,31
497CMG0030	MGC	497	MGC497	PAV		R	SIM	NÃO	80	40	1	1	8	1	2,75	72,222221	0,06
497CMG0033	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,02
497CMG0036	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,34
497CMG0039	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,05
497CMG0042	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,22
497CMG0046	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,22
497CMG0052	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,07
497CMG0054	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,07
497CMG0056	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,08
497CMG0058	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,13
497CMG0060	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,2
497CMG0062	MGC	497	MGC497	PAV		R	NÃO	NÃO	80	40	1	1	1	1	1	80	0,1
497CMG0064	MGC	497	MGC497	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,04
497CMG0066	MGC	497	MGC497	PAV		M	NÃO	NÃO	80	40	5	5	1	1	3	71,111115	0,25