

# DIFERENÇAS NO CÁLCULO DE CAMINHOS MÍNIMOS EM SIG COM BASE NAS VARIÁVEIS DE DISTÂNCIA E TEMPO

**Fernando da Costa Pfitscher**  
**Lucas Lourenço de Queiroz**

Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia  
Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ

---

**Resumo:** Uma das metodologias mais utilizadas no planejamento de transportes e no processo de previsão de viagens é o modelo de quatro etapas. Com as muitas possibilidades de caminhos nas malhas viárias, os motoristas buscam uma relação de custo-benefício para sua tomada de decisão. Ferramentas tecnológicas como Sistemas de Informações Geográficas proporcionam a análise de dados em tempo real e simulações em cenários para maior assertividade do caminho escolhido. Desconsiderando os fatores comportamentais dos indivíduos, este trabalho buscou avaliar as diferenças resultantes quando o custo para o caminho mínimo entre um par origem e destino é ponderado pelo tempo de viagem ou distância percorrida. O estudo de caso foi aplicado com o *software* Transcad em 60 cidades do Rio Grande do Sul, sendo calculados 3 caminhos mínimos para cada par formado entre elas a partir de dados de geometria e velocidades máximas. Os resultados indicaram que em mais de 60% dos casos o caminho mais curto foi também o mais rápido, sendo um ponto de atenção a existência de vias não pavimentadas que reduzem as distâncias mas aumentam o tempo de viagem até o destino.

**Palavras-chave:** Caminho mínimo. GIS. Origem-destino. Planejamento. Simulação.

---

**Abstract:** One of the most used methodologies in transportation planning and in the travel forecasting process is the four-step model. With the many possibilities of paths in the road networks, drivers seek a cost-benefit relationship for their decision making. Technological tools such as Geographic Information Systems provide real-time data analysis and scenario simulations for greater assertiveness of the chosen path. Disregarding the behavioral factors of individuals, this work sought to evaluate the differences resulting when the cost for the shortest path between an origin and destination pair is weighted by the travel time or distance covered. The case study was applied with the Transcad software in 60 cities in Rio Grande do Sul, being calculated 3 shortest paths for each pair formed between them from geometry data and maximum speeds. The results indicated that in more than 60% of the cases, the shortest route was also the fastest, being a point of attention the existence of unpaved roads that reduce distances but increase travel time to the destination.

**Keywords:** Shortest path. GIS. Origin-destination. Planning. Simulation.

## 1. INTRODUÇÃO

As atividades que exercemos diariamente exigem que nos transportemos entre uma origem e um destino utilizando o modal disponível e o caminho que julgamos mais adequado. É sabido que o transporte rodoviário é predominante no Brasil frente a outros modais não só para

deslocamentos dentro das zonas urbanas, mas também entre cidades. Quando um sistema de transporte não é capaz de absorver a demanda, congestionamentos acabam ocorrendo com maior frequência e tornando-se um problema de longo prazo especialmente em economias com restrições de investimento (FAGHRI; HAMAD, 2002). Conforme Ciscal-Terry *et al.* (2016), as autoridades buscam formas de prever o comportamento dos motoristas e assim adotar medidas mais eficazes de gerenciamento do tráfego e melhoria da infraestrutura.

O planejamento de transportes tradicionalmente se baseou no modelo de quatro etapas para estimar a geração e distribuição de viagens, escolha modal e alocação na rede viária (PAPINSKI; SCOTT; DOHERTY, 2009). Por muitos anos, a última etapa tem sido intensamente estudada, com diferentes métodos baseados no menor caminho (SOMMER, 2014). O desenvolvimento de tecnologias para a coleta de grandes volumes de dados tem permitido análises mais abrangentes, rápidas e baratas. Pfitscher *et al.* (2020) apontam que a falta de conhecimento de técnicas de processamento acaba por subutilizar o potencial dessas informações para o planejamento.

O avanço e popularização de sistemas de posicionamento global (GPS) entre os motoristas permite o armazenamento cada vez maior e mais preciso de informações sobre os horários de viagens realizadas e seus itinerários (PAPINSKI; SCOTT; DOHERTY, 2009). A recomendação de trajetos é feita aos usuários dos aplicativos de navegação a partir dos níveis operacionais da rede viária, que são atualizados em tempo real principalmente com dados compartilhados pelos próprios motoristas. Apesar dos caminhos mais curtos sugeridos, as diversas exigências dos motoristas podem tornar algumas opções insatisfatórias (PAN *et al.*, 2022). Van Essen *et al.* (2020) alertam que informações personalizadas provocam escolhas egoístas de rotas ao se buscar benefícios individuais, tendendo ao aumento no tráfego em locais ora pouco congestionados. Segundo os autores, alguns órgãos de trânsito buscam intervir na demanda de certas vias ao impor cobranças pelo seu uso ou promover recomendações para o uso de caminhos que acarretem em menores prejuízos coletivos.

A coleta em massa desses dados desenvolveu um crescente interesse na compreensão dos fatores que influenciam a escolha de rotas com o uso de *softwares* de microssimulação (PAPINSKI; SCOTT, 2011). A depender da distância percorrida ou da quantidade de conexões existentes na rede viária, os motoristas possuem diversas possibilidades de vias para compor seus trajetos. Braess, Nagurney e Wakolbinger (2005) afirmam que, ao se considerar constante em modelos computacionais um parâmetro operacional como o volume de veículos, determinar o trajeto mais favorável corresponde a calcular o menor caminho. Para tornar mais intuitiva e eficiente a execução de modelos que exigem como dado de entrada as rotas escolhidas, muitos autores assumem que os veículos viajam pelo menor caminho disponível, desconsiderando as limitações e a heterogeneidade humana (ZHU; LEVINSON, 2015).

Pode-se perceber que os motoristas buscam minimizar os custos da viagem, que são compostos por diferentes fatores e ponderações intrínsecos a cada indivíduo. Entretanto, uma vez que modelos computacionais com grafos não consideram fatores comportamentais e a racionalidade limitada do ser humano ao tomar decisões, este trabalho tem por objetivo avaliar possíveis diferenças resultantes no cálculo do caminho mínimo entre dois pontos (par origem e destino) quando os custos são medidos em forma de distância percorrida ou tempo de viagem. Assim, espera-se que estudos que não disponham de dados precisos quanto à alocação de viagens possam avaliar a abordagem que melhor corresponda à situação real.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Caminho mínimo: distância x tempo

Sommer (2014) explica que o problema do menor caminho consiste em minimizar o somatório de pesos atribuídos a cada arco de uma rede viária entre a origem e o destino, tendo muitas aplicações em estudos de planejamento de rotas, sistemas de informações geográficas (SIG), logística, simulação de tráfego e até na informática com a busca de dados em bases extensas. O avanço da tecnologia e da coleta de dados tem permitido que avaliações cada vez mais precisas sejam realizadas com linguagens de programação e *softwares* robustos. Entretanto, a modelagem computacional de caminhos em grandes redes viárias não é trivial e pode se tornar impraticável (ABRAHAM *et al.*, 2010).

Um dos métodos mais utilizados para o cálculo do caminho mínimo entre dois pontos de uma rede é o algoritmo de Dijkstra (1959). Partindo do vértice inicial e uma estimativa de custo nula, o algoritmo seleciona a aresta menos onerosa para o custo final, adicionando-a ao caminho e assim avaliando sucessivamente as conexões vizinhas até chegar no destino. Já o algoritmo proposto por Yen (1971) pode ser utilizado nos casos em que se deseja verificar um número  $k$  de menores caminhos sem *loops* na rede. Além de outros algoritmos existentes, o cálculo de caminhos mínimos em grafos possui aplicações além da área de transportes, como no planejamento de infraestruturas de telecomunicações e genética (NOUROLLAH; PASHAEI; MEYBODI, 2012).

Estudos recentes na área de localização de facilidades em rodovias propuseram modelos que necessitam, entre outros dados de entrada, dos caminhos mínimos entre os pares origem-destino (O/D) na rede viária (ARSLAN; JABALI; LAPORTE, 2018; BOGYRBAYEVA; KWON, 2021; HOOSMAND; MIRHASSANI, 2018; MARKOVIĆ; RYZHOV; SCHONFELD, 2015). Os modelos do Problema de Captura do Fluxo Evasivo (EFCP, da sigla em inglês) avaliam todas as rotas possíveis entre os pares O/D cujas extensões estejam dentro de um limite de aumento em relação ao caminho mais curto existente. Com isso, é assumido que os fluxos irão escolher o trajeto de menor distância sem um dispositivo de fiscalização (pedágio, posto de pesagem, polícia), sendo buscado minimizar a quantidade de veículos que viajam sem ser interceptados.

Apesar dessa suposição, Wardrop (1952) explica em sua clássica publicação sobre pesquisas de tráfego que usualmente é assumido que os veículos viajam pela rota de menor tempo, porém fatores relacionados à infraestrutura ou ao comportamento dos motoristas exercem grande influência. Zhu e Levinson (2015) elencam alguns atributos comportamentais, como o valor do tempo do motorista, a disposição de adaptação para uma rota mais econômica e a experiência em viagens. Os autores complementam que, ao se adicionar a esses fatores as limitações de percepção e de racionalidade do ser humano, o caminho realizado pode diferir muito do trajeto mais curto ou rápido. Ao levantar 12 estudos de escolha de rotas publicados entre 1999 e 2007, Papinski e Scott (2011) identificam que, dentre diversas variáveis para explicação na escolha do caminho, 92% consideraram o tempo de viagem, enquanto que apenas metade inclui a distância percorrida.

### 2.2. Uso de SIG para escolha de caminho

Em uma época anterior à coleta em massa dos dados de GPS dos motoristas para avaliar o congestionamento das vias em tempo real e assim estimar os tempos com base nas velocidades operacionais, Faghri e Hamad (2002) afirmam que os aplicativos existentes apenas indicavam a menor distância até o destino. Atualmente, qualquer smartphone conectado à internet pode

informar o trajeto mais rápido de maneira dinâmica, fazendo com que os caminhos recomendados variem ao longo das horas. Ao permitir que os motoristas tomem facilmente novas decisões, os aplicativos de navegação vêm tornando os ajustes de rota quase perfeitos (VAN ESSEN *et al.*, 2020). Logo, tradicionalmente é assumido que os veículos se distribuem ao longo dos caminhos mais favoráveis em termos de custos, sendo esse o tempo de viagem (BRAESS; NAGURNEY; WAKOLBINGER, 2005).

Trabalhos como o de Ciscal-Terry *et al.* (2016), Papinski, Scott e Doherty (2009), Tang e Levinson (2018) e Zhu e Levinson (2015) demonstram com o uso de GPS que o principal objetivo dos motoristas é minimizar o tempo de viagem, não a distância. Embora ambas geralmente estejam relacionadas, principalmente em deslocamentos curtos, fatores operacionais como a velocidade regulamentar e o fluxo podem causar muitos atrasos no caminho mais curto. De fato, os autores identificam que grande parte dos motoristas que percorrem grandes distâncias dão preferência a vias nas quais velocidades maiores podem ser desenvolvidas, mesmo que isso implique no aumento da viagem em alguns quilômetros. Entretanto, mesmo com os dados de trânsito fornecidos, estimar corretamente que o caminho percorrido será o mais rápido pode depender de características de cada percurso (ABDEL-ATY; ABDALLA, 2006).

Segundo Papinski e Scott (2011), as ferramentas para a determinação de rotas embarcadas em *softwares* de SIG como ArcGIS, ArcLogistics e TransCAD não permitem a avaliação de fatores comportamentais ao solucionar problemas de roteamento e caminho mínimo. Assim, tais *softwares* tradicionalmente se baseiam em dados de distância e velocidade para realizar suas análises. Braess, Nagurney e Wakolbinger (2005) atentam que modelos mais realísticos devem considerar a variância dos fluxos ao calcular os tempos de viagem em cada arco. Portanto, é possível perceber como a qualidade dos modelos construídos para simulação e estudos de tráfego sofrem forte influência do nível de detalhamento na modelagem da malha viária, bem como da interação entre o ser humano e o *software* (CORRÊA; DO NASCIMENTO, 2020).

Assim como demais autores supracitados, Davet e De Castro Neto (2020) utilizam dados de radares e GPS para calcular as velocidades médias dos veículos, verificando como os tempos de viagem se alteram ao longo das horas. Entretanto, quando equipamentos para a realização de estudos mais abrangentes não estão facilmente disponíveis, se faz necessário o cálculo de tais parâmetros com dados de capacidade das vias e de volume de tráfego. Apesar de diferentes métodos existentes, estimar os tempos de viagem não é uma tarefa simples e os resultados obtidos podem ser pouco precisos (SOMMER, 2014).

### **3. METODOLOGIA**

Para calcular o caminho mínimo entre dois pontos, primeiramente é necessária uma base de dados georreferenciada da malha viária. O *software* TransCAD foi utilizado neste trabalho para a visualização e extração dos dados obtidos, além da montagem de mapas ilustrativos nas sessões seguintes. Os trechos rodoviários são configurados como uma camada de linhas, conectadas às demais por pontos de interseção. Para cada trecho, o banco de dados contém diferentes informações qualitativas, como código de identificação, nome da rodovia, jurisdição e tipo de superfície, e quantitativas, como comprimento, velocidade operacional, capacidade e volume médio de veículos.

O programa permite gerar caminhos mínimos a partir do algoritmo de Dijkstra (1959) com base em custos inerentes aos trechos rodoviários, sendo a distância e o tempo os mais usuais. Apesar de também ser possível verificar os *k* menores caminhos entre dois nós da rede, essa atividade

se torna inviável quando o número de pares O/D é muito grande, como no presente trabalho. Logo, os dados relativos aos nós de início e fim de cada arco rodoviário, bem como o seu comprimento, foram extraídos e utilizados em um script do algoritmo de Yen (1971).

O resultado obtido é a sequência de nós percorridos entre cada par O/D nos  $k$  caminhos mais curtos e o comprimento total. Foi necessário construir um código em linguagem *Python* para transformar o arquivo em uma planilha *Excel* com os arcos utilizados e calcular o tempo de viagem a partir das velocidades regulamentares presentes na base de dados. Dessa forma, foi possível realizar análises gerais dos deslocamentos gerados, verificar os casos nos quais o caminho mais curto possui o menor tempo e ilustrar situações em que não foi observada essa correspondência. Nessas, os trajetos foram comparados com as sugestões dadas pelo *Google Maps* em horários nos quais geralmente é possível praticar velocidades de fluxo livre.

#### 4. ESTUDO DE CASO

O Sistema Nacional de Viação (SNV) engloba toda a infraestrutura física e operacional dos diferentes modais de transportes do Brasil. Segundo o Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem do Rio Grande do Sul (DAER-RS), o estado possui quase 17.253km de rodovias sob jurisdição federal ou estadual (DAER-RS, 2021). Dessas, 79,7% são pavimentadas e em sua maioria de pista simples (Figura 1). As rodovias federais (azul) funcionam como grandes corredores logísticos entre as principais cidades, enquanto que as estaduais (vermelho) realizam ligações com características locais ou turísticas. Por consequência, as BRs compõem quase a totalidade das rodovias duplicadas do Rio Grande do Sul e usualmente possuem maiores capacidades, velocidades operacionais e volumes de tráfego.

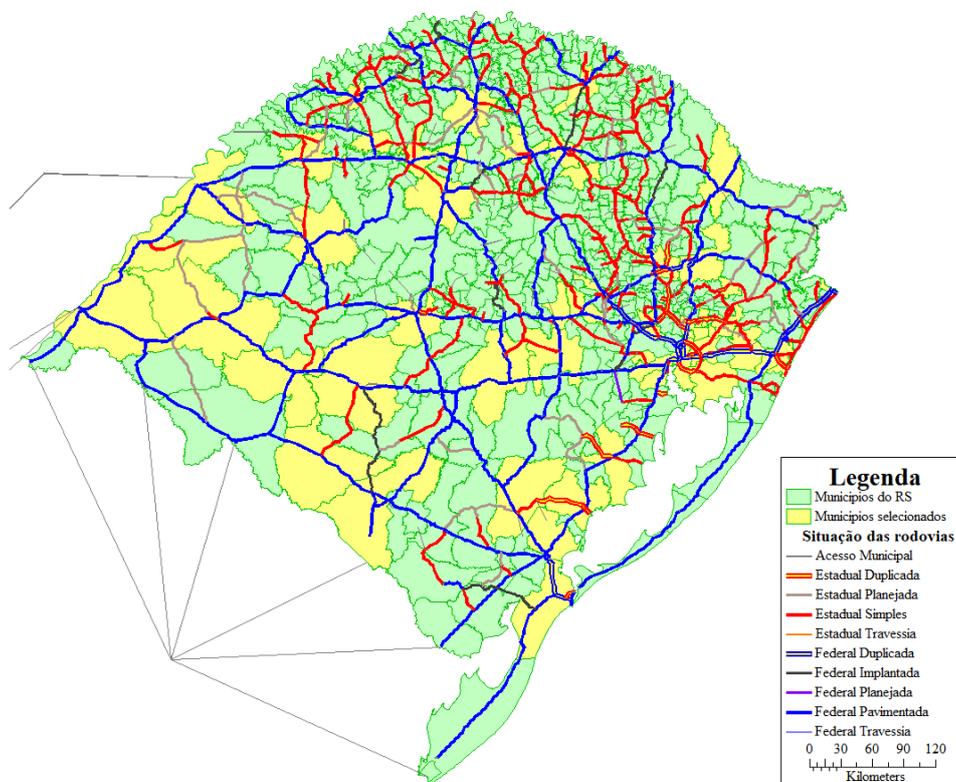


Figura 1 – Rodovias do RS conforme situação e municípios selecionados

Fonte: Elaboração própria

Estima-se que o estado possua aproximadamente 11.467.000 habitantes, distribuídos em 497 municípios (IBGE, 2021). Uma vez que o número de pares O/D cresce na ordem de  $n^2-n$ , o estudo foi limitado aos 60 municípios mais populosos do Rio Grande do Sul (amarelo), resultando em 3.540 pares OD. Para cada um desses pares, foram gerados os 3 caminhos mínimos com base na distância (C1, C2 e C3) e, posteriormente, os respectivos tempos de viagem foram calculados. Dessa forma, a seção seguinte apresenta os resultados das análises realizadas com os 10.620 caminhos mínimos determinados com o algoritmo de Yen (1971) a partir da base de dados exportada do *software* TransCAD.

## 5. ESTUDO DE CASO

Da amostra de 10.620 caminhos gerados, a Tabela 1 apresenta o resumo dos valores máximos e mínimos calculados para a distância, tempo de viagem e velocidade média de C1, C2 e C3. Uma vez que os trechos de acesso municipal, que conectam os centróides dos municípios à malha viária, são arcos fictícios, os comprimentos e tempos relativos a eles foram subtraídos de todos os caminhos para evitar resultados não condizentes com a realidade. O menor trajeto observado foi de 2,53km entre Esteio e Sapucaia do Sul, sendo também o mais rápido com menos de 2 minutos de duração. Por outro lado, o par O/D mais distante (Torres e Uruguaiana) é separado por mais de 800 km. Porém, o maior tempo de viagem, cerca 13h40, foi observado para cruzar os 682 km do C2 entre Itaqui e Camaquã. Esse valor elevado resulta da escolha do algoritmo por arcos rodoviários não pavimentados, que apesar de encurtar o trajeto, não permitem o desenvolvimento de altas velocidades.

Tabela 1 - Resumo de variáveis observadas entre todos os caminhos mínimos gerados.

Valor	Distância (km)			Tempo (min)			Velocidade média (km/h)		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Mínimo	2,53	9,84	29,73	1,38	6,82	16,62	33,56	29,30	32,06
Máximo	810,28	812,18	812,92	796,31	819,17	818,64	110,00	110,00	110,00
Médio	290,07	296,52	302,87	248,87	255,99	263,82	75,04	73,88	73,39

Fonte: Elaboração própria

Para aproximar os resultados da situação operacional das rodovias, procurou-se calcular velocidades médias de acordo com os dados de capacidade e volume de veículos, porém notou-se a necessidade de coletar outras informações não disponíveis. Logo, as velocidades utilizadas representam o fluxo livre, sendo indicado na Tabela 1 o cálculo dos seus valores médios nos caminhos com os dados disponíveis. Velocidades médias abaixo dos 35km/h são justamente observadas em trajetos com rodovias sem pavimentação, que não foram restringidas neste trabalho. Nos três caminhos foram calculadas velocidades médias máximas de 110km/h, pois percorrem apenas uma rodovia expressa entre os nós de entrada e saída do par O/D. Como os acessos municipais possuem velocidades fictícias de 999km/h para não influenciar negativamente nos tempos de viagem, seriam encontradas velocidades médias acima dos 200km/h caso não esses trechos fossem retirados da análise.

Dos resultados obtidos, constatou-se que a menor distância não corresponde necessariamente ao menor tempo de viagem para todos os pares O/D. A Figura 2 indica o ranking dos caminhos C1, C2 e C3 com relação ao tempo, sendo em azul as vezes em que ele foi o mais rápido (1º), em vermelho o intermediário (2º) e em verde o mais demorado (3º). É possível notar que C1 foi a viagem de menor tempo em 63% dos casos, enquanto que C3 é a viagem mais lenta em 60% das vezes. As diferenças observadas podem estar relacionadas ao fato de que a passagem por rodovias não pavimentadas não foi restrita na análise ou ainda que pequenos desvios por rodovias de maior velocidade fazem com que a viagem tenha seu tempo reduzido.

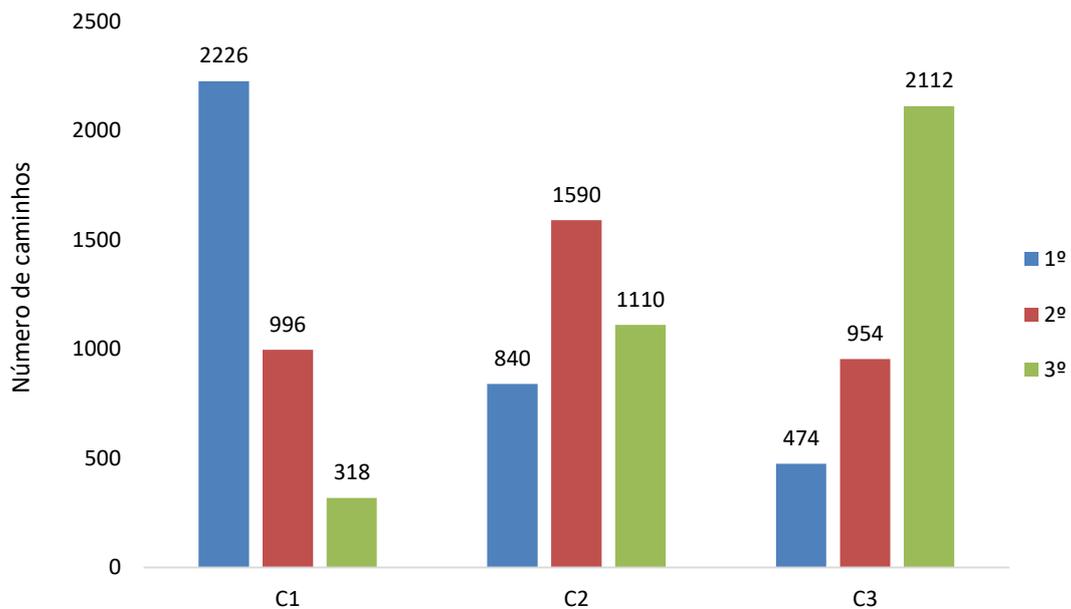


Figura 2 – Correspondência entre caminhos mais curtos e rápidos

Fonte: Elaboração própria

A Figura 3 ilustra os 3 caminhos mínimos entre Uruguaiana e Santiago, gerados com a ferramenta nativa do TransCAD *k shortest paths* com base na distância (esquerda) e no tempo (direita). Em ambos os cenários, as linhas vermelhas representam C1, enquanto que C2 e C3 estão em azul e preto, respectivamente. É possível notar que o caminho mais rápido corresponde ao terceiro mais curto (C3), não estando o trajeto de menor distância (C1) incluído no conjunto de menor tempo pois ele é composto por um trecho não pavimentado. Ao consultar as recomendações do aplicativo *Google Maps* para essa viagem às 15h de uma quinta-feira (Figura 4), a rota mais favorável é a segunda menor (C2) tanto no cálculo com distâncias, quanto com tempos. Segundo o navegador, a viagem por C2 tem duração reduzida em quase 50 minutos quando comparado ao cálculo do TransCAD. Isso pode indicar que a base de dados está desatualizada, com velocidades superiores às praticadas.

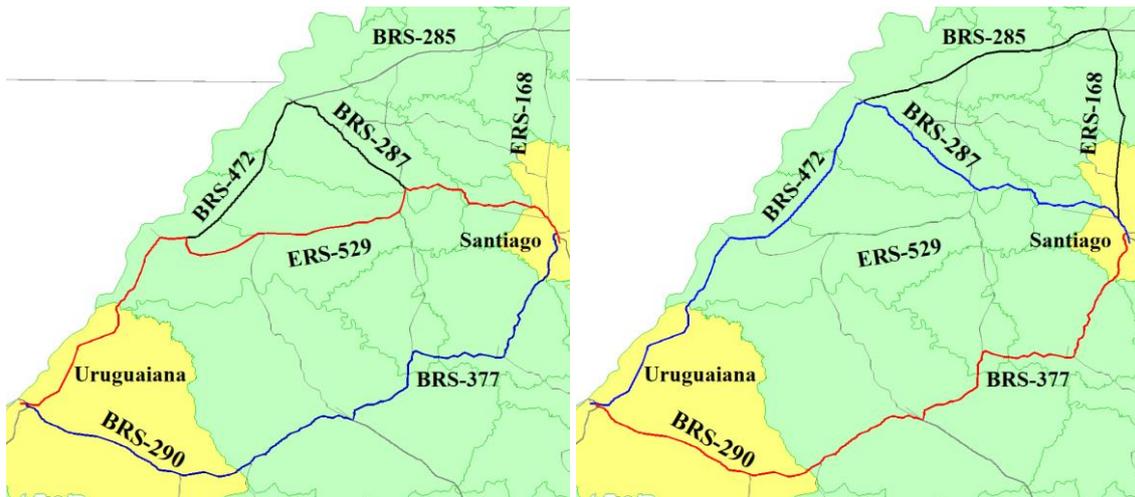


Figura 3 – C1, C2 e C3 em azul, vermelho e preto (respectivamente) conforme a distância (esquerda) e o tempo (direita) entre Uruguaiiana e Santiago

Fonte: Elaboração própria

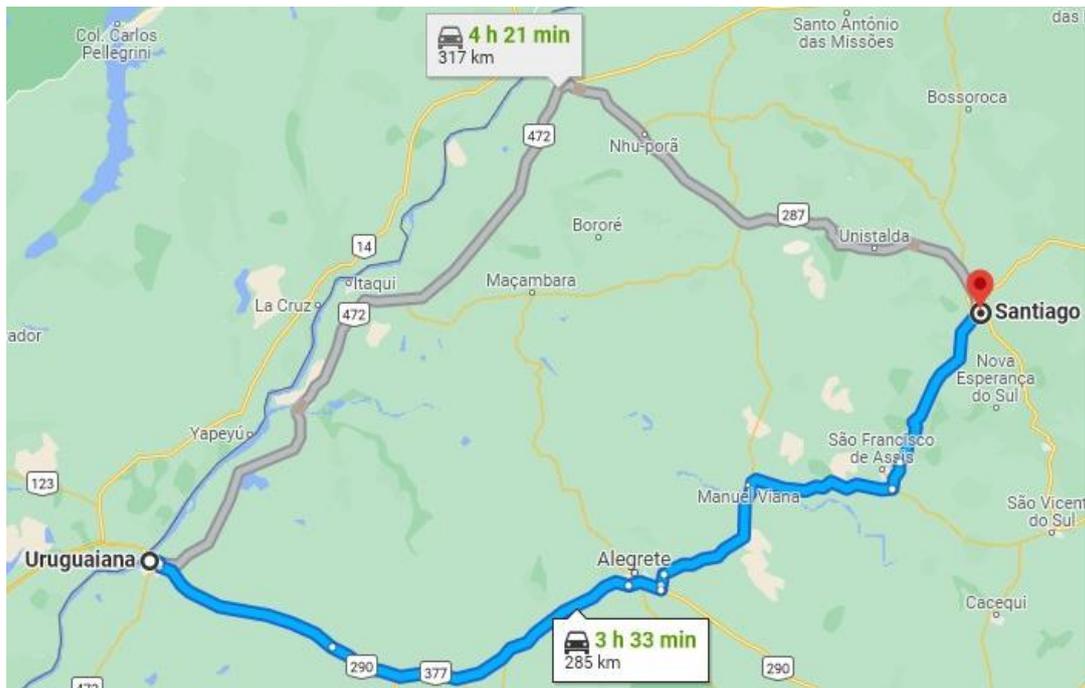


Figura 4 – Sugestões de trajetos entre Uruguaiiana e Santiago em aplicativo de navegação

Fonte: Google Maps

As Figuras 5 e 6 exemplificam outras diferenças encontradas no estudo para caminhos com origem em 3 municípios distintos que se conectam a Porto Alegre e a Canela, respectivamente. As conexões analisadas para Porto Alegre partem dos municípios de Caxias do Sul, Santo Antônio da Patrulha e Torres (Figura 5), enquanto que para Canela, partem de Santa Cruz do Sul, Passo Fundo e Vacaria (Figura 6). A geração desses traçados foi feita com a função *shortest path* do TransCAD, sendo notado, em alguns casos, diferenças no comprimento de C1 com relação aos resultados do algoritmo de Yen (1971). Isso pode ser explicado pelo fato de que o *software* faz uso de método de Dijkstra (1959) para calcular os caminhos. Nas figuras, os traçados em

vermelho representam o trajeto mais curto, enquanto que o mais rápido está em azul. Já as linhas pretas simbolizam o trecho compartilhado entre esses caminhos.

Da Figura 5 pode-se destacar que ambas as rotas de menor tempo até Santo Antônio da Patrulha e Torres utilizam majoritariamente rodovias duplicadas (BRS-290 e BRS-101), enquanto que a viagem encurta em poucos quilômetros ao se utilizar rodovias de pista simples (ERS-030 e ERS-389). Apesar de possuírem apenas uma faixa por sentido, essas rodovias se localizam em regiões planas, o que permite altas velocidades regulamentares. Além disso, a presença de pedágios apenas nos trechos federais pode influenciar na escolha de alguns motoristas pelas vias estaduais. Por outro lado, todo o trecho compartilhado até Caxias do Sul é composto por vias duplicadas e pedagiadas em regiões onduladas (BRS-116, ERS-240 e ERS-122). O trajeto montanhoso é feito apenas em pista simples, tanto no caminho mais curto (ERS-452 e BRS-116) quanto no mais rápido (ERS-122). Apesar de um pouco mais extensa, a ERS-122 tem curvas mais suaves e possui terceira faixa em toda a subida, permitindo maior velocidade e fluidez.

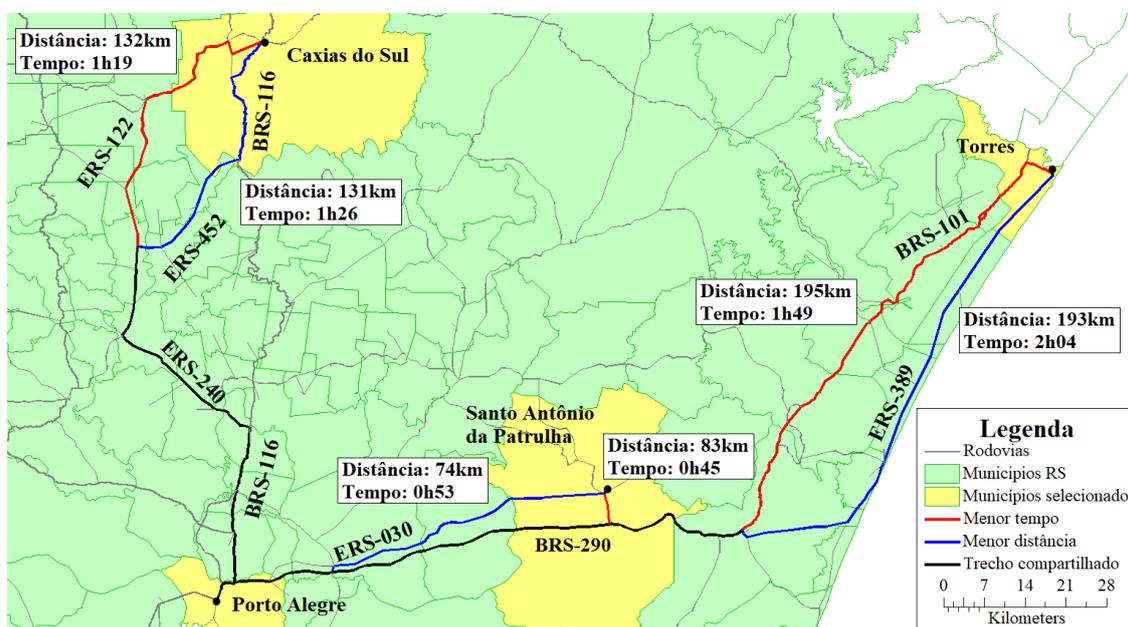


Figura 5 - Diferenças entre caminhos mais curtos e mais rápidos com origem em Porto Alegre

Fonte: Elaboração própria

Canela é um município localizado no planalto gaúcho, obrigando os motoristas oriundos de regiões baixas, como Santa Cruz do Sul, a cruzar trechos montanhosos (Figura 6). Apesar de ambos os caminhos entre essas cidades utilizarem trechos distintos de pista simples e com curvas de raios pequenos da BRS-116, o menor tempo é observado na ERS-235, que possui greides mais suaves. Já a ERS-373, além de possuir rampas íngremes, não é pavimentada ao longo de 10km, aumentando assim o tempo de viagem. Rodovias sem pavimentação também fazem parte dos menores caminhos até Passo Fundo e Vacaria (ERS-473 e ERS-476), sendo importante pontuar no último caso que percorrer mais 17 km reduz a viagem em quase 1h20.

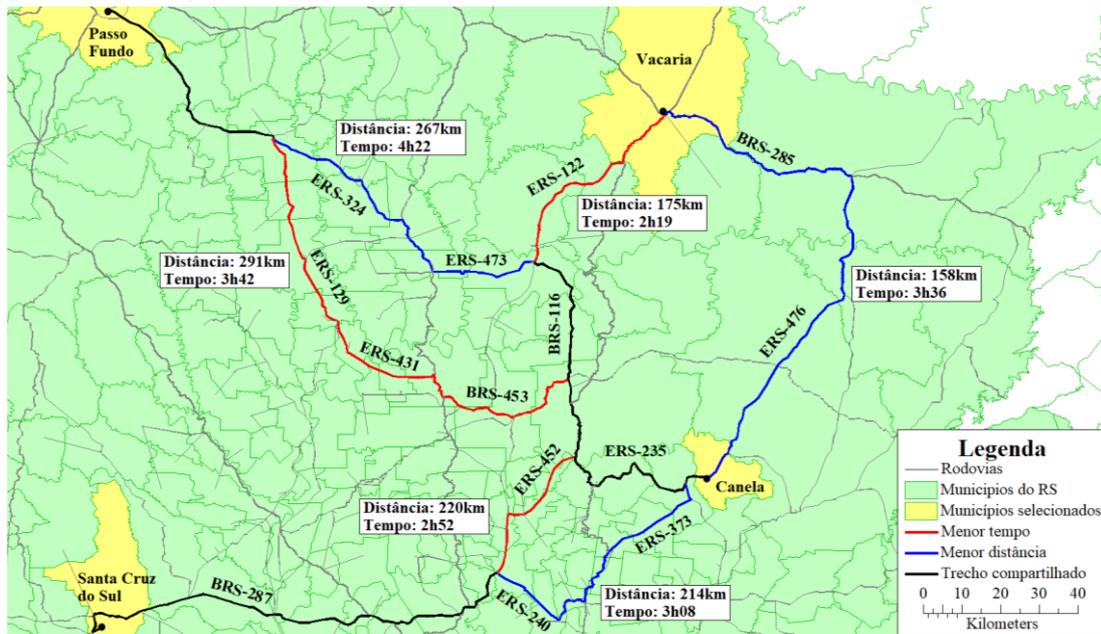


Figura 6 - Diferenças entre caminhos mais curtos e mais rápidos com origem em Canela

Fonte: Elaboração própria

Destaca-se também o grande número de diferentes rodovias utilizadas no trajeto mais rápido para Passo Fundo. Isso porque o caminho é composto majoritariamente por vias de pista simples, cujas interseções em nível exigem que o motorista pare o veículo e prossiga com segurança, aumentando assim o tempo de viagem. O TransCAD permite que sejam aplicadas penalidades para 4 diferentes movimentos de conversão, aumentando o custo de caminhos com muitas trocas de vias. Uma vez que o tempo de espera depende do nível de serviço de cada dispositivo de interseção, tais penalidades não foram incluídas neste estudo.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Estimar corretamente a alocação de viagens em uma rede viária não é uma atividade trivial. Fatores individuais além da distância e do tempo podem influenciar o processo de escolha de cada motorista, sendo recomendada a inclusão de variáveis comportamentais para tornar os resultados mais próximos da realidade. Entretanto, ao se avaliar os 3 caminhos mais curtos entre 60 cidades do Rio Grande do Sul, observou-se que o menor comprimento (C1) correspondeu ao trajeto mais rápido em 63% dos 3.540 pares O/D. Por outro lado, as rotas mais longas (C3) foram também as mais lentas em 60% das vezes. Foram calculados caminhos com distâncias superiores a 800km e tempos de viagens se aproximando de 14h.

Em alguns casos, o aumento de poucos quilômetros em C2 ou C3 reduziu os tempos de viagem quase 2h. Essas diferenças resultaram da existência de rodovias sem pavimentação que não foram retiradas deste estudo, devendo servir de alerta para pesquisadores que venham a trabalhar com a geração prévia de caminhos mínimos para modelos computacionais.

Foram observadas situações em que o percurso se torna mais rápido quando feito em rodovias de maior capacidade e com geometria suave, resultando em velocidades de fluxo livre elevadas. Como demonstrado em estudos comportamentais, grande parte dos motoristas procuram reduzir o tempo de viagem, mesmo que isso implique em um trajeto maior. Tentou-se calcular

as velocidades operacionais das rodovias com base nos fluxos existentes, porém a falta dos dados necessários não permitiu tal análise. Dessa forma, recomenda-se que sejam utilizadas velocidades correspondentes ao nível de serviço das rodovias e assim aproximar os tempos de viagem à situação real.

Ao comparar-se alguns resultados com sugestões de aplicativos de navegação, percebeu-se a diminuição nos tempos estimados de viagens em virtude da possibilidade de modificações rápidas, tanto geográficas (vias e trajetos já percorridos) quanto temporais (conforme as velocidades praticadas). Isso porque eles permitem atualizações geográficas em tempo real a partir da tecnologia GTFS (*The General Transit Feed Specification*) para o compartilhamento de dados e da extensão GTFS *Real Time*. Visto a intensificação no uso de aplicativos como *Google Maps* e *Waze*, que recomendam por padrão a rota mais rápida, e a sua forte influência no processo de decisão dos motoristas, conclui-se que o tempo de viagem é um fator de impedância superior à distância. Apesar de mais condizente com o comportamento humano, o caminho mais rápido pode sofrer variações ao longo das horas conforme as condições de tráfego, principalmente em regiões urbanizadas e com alta densidade de rodovias.

## Referências

ABDEL-ATY, Mohamed A.; ABDALLA, Mohamed F. Examination of multiple mode / route-choice paradigms under ATIS. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, [s. l.], v. 7, n. 3, p. 332–348, 2006.

ABRAHAM, Ittai *et al.* Highway dimension , shortest paths, and provably efficient algorithms. In: Twenty-first annual ACM-SIAM symposium on Discrete Algorithms, 2010, Austin, Estados Unidos. **Anais**. Austin, Estados Unidos. Disponível em: <https://epubs.siam.org/doi/pdf/10.1137/1.9781611973075.64>. Acesso em: 16 fev. 2022.

ARSLAN, Okan; JABALI, Ola; LAPORTE, Gilbert. Exact solution of the evasive flow capturing problem. **Operations Research**, [s. l.], v. 66, n. 6, p. 1625–1640, 2018.

BOGYRBAYEVA, Aigerim; KWON, Changhyun. Pessimistic evasive flow capturing problems. **European Journal of Operational Research**, v. 293, n. 1, p. 133-148, 2021.

BRAESS, Dietrich; NAGURNEY, Anna; WAKOLBINGER, Tina. On a Paradox of Traffic Planning. **Transportation Science**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 446–450, 2005.

CISCAL-TERRY, Wilner *et al.* An analysis of drivers route choice behaviour using GPS data and optimal alternatives. **Journal of Transport Geography**, [s. l.], v. 51, p. 119–129, 2016.

CORRÊA, André P.; DO NASCIMENTO, Hugo A. D. Estudo da usabilidade de quatro sistemas de modelagem de tráfego urbano usando KML. In: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2020, [S. l.]. **Anais**. [s. l.]. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano/5\\_422\\_AC.pdf](http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano/5_422_AC.pdf). Acesso em: 10 fev. 2022.

DAER-RS. **Composição da malha**. Disponível em: <https://www.daer.rs.gov.br/composicao-da-malha>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2022.

DAVET, Fernando G.; DE CASTRO NETO, Manoel M. Influência do uso solo, infraestrutura viária e demanda de tráfego na variação diária da velocidade média de automóveis e de ônibus. In: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2020, [S. l.]. **Anais**. [s. l.]. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano/7\\_402\\_RT.pdf](http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Tr%C3%A1fego%20Urbano%20e%20Rodovi%C3%A1rio/Tr%C3%A1fego%20Urbano/7_402_RT.pdf). Acesso em: 10 fev. 2022.

DIJKSTRA, Edsger W. A note on two problems in connexion with graphs. **Numerische Mathematik**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 269–271, 1959.

FAGHRI, Ardeshir; HAMAD, Khaled. Application of GPS in Traffic Management Systems. **GPS Solutions**, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 52–60, 2002.

HOOSHMAND, Farnaz; MIRHASSANI, S. A. An Effective Bilevel Programming Approach for the Evasive Flow Capturing Location Problem. **Networks and Spatial Economics**, [s. l.], v. 18, n. 4, p. 909–935, 2018.

IBGE. **Panorama do Rio Grande do Sul**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/panorama>. Acesso em: 14 fev. 2022.

MARKOVIĆ, Nikola; RYZHOV, Ilya O.; SCHONFELD, Paul. Evasive flow capture: Optimal location of weigh-in-motion systems, tollbooths, and security checkpoints. **Networks**, [s. l.], v. 65, n. 1, p. 22–42, 2015.

NOUROLLAH, Ali; PASHAEI, Elnaz; MEYBODI, Mohammad R. Improved minimum spanning tree heuristics for Steiner tree problem in graph. In: International Conference on Foundations of Computer Science (FCS), 2012, Las Vegas, Estados Unidos. **Anais**. Las Vegas, Estados Unidos. Disponível em: <http://worldcomp-proceedings.com/proc/p2012/FCS2058.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2022.

PAN, Xiao *et al.* Exploiting user behavior learning for personalized trajectory recommendations. **Frontiers of Computer Science**, [s. l.], v. 16, n. 3, p. 1–12, 2022.

PAPINSKI, Dominik; SCOTT, Darren M. A GIS-based toolkit for route choice analysis. **Journal of Transport Geography**, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 434–442, 2011.

PAPINSKI, Dominik; SCOTT, Darren M.; DOHERTY, Sean T. Exploring the route choice decision-making process : A comparison of planned and observed routes obtained using person-based GPS. **Transportation Research Part F: Psychology and Behaviour**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 347–358, 2009.

PFITSCHER, Fernando da C. *et al.* Criação de matrizes Origem-Destino para o sistema de ônibus de Guaíba com dados de bilhetagem eletrônica. In: 34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2020, [s. l.]. **Anais**. [s. l.]. Disponível em: [http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Gest%C3%A3o%20de%20Transportes/Sistemas%20Inteligentes%20Aplicados%20ao%20Transporte/5\\_472\\_AC.pdf](http://www.anpet.org.br/anais34/documentos/2020/Gest%C3%A3o%20de%20Transportes/Sistemas%20Inteligentes%20Aplicados%20ao%20Transporte/5_472_AC.pdf). Acesso em: 15 fev. 2022.

SOMMER, Christian. Shortest-Path Queries in Static Networks. **ACM Computing Surveys**, [s. l.], v. 46, n. 4, p. 1–31, 2014.

TANG, Wenyun; LEVINSON, David M. Deviation between actual and shortest travel time paths for commuters. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, [s. l.], v. 144, n. 8, p. 1–13, 2018.

VAN ESSEN, Mariska *et al.* Travelers' compliance with social routing advice : evidence from SP and RP experiments. **Transportation**, [s. l.], v. 47, n. 3, p. 1047–1070, 2020.

WARDROP, John G. Some theoretical aspects of road traffic research. **Proceedings of the institution of civil engineers**, [s. l.], v. 1, n. 3, p. 325–362, 1952.

YEN, Jin Y. Finding the k shortest loopless paths in a network. **Management Science**, [s. l.], v. 17, n. 11, p. 712–716, 1971.

ZHU, Shanjiang; LEVINSON, David. Do people use the shortest path? An empirical test of wardrop's first principle. **PLoS ONE**, [s. l.], v. 10, n. 8, p. 1–18, 2015.