



Bruno Alexandre Barreiros Rosa

**Uma Metodologia para Roteamento de
Veículos Escolares Utilizando Sistemas de
Informação Geográfica**

Dissertação de Mestrado (opção profissional)

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rafael Martinelli Pinto

Rio de Janeiro
abril de 2018



Bruno Alexandre Barreiros Rosa

**Uma Metodologia para Roteamento de
Veículos Escolares Utilizando Sistemas de
Informação Geográfica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Rafael Martinelli Pinto

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Antônio Márcio Tavares Thomé

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Hugo Miguel Varella Repolho

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Dr. Julia Figueiredo Goytacaz Sant'Anna

Secretaria de Estado de Educação – SEEDUC-RJ

Prof. Márcio da Silveira Carvalho

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 25 de abril de 2018

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Bruno Alexandre Barreiros Rosa

Graduou-se em Engenharia de Produção pela Universidade Salgado de Oliveira em 2012. Concluiu MBA em Auditoria Fiscal e Tributária em 2015 e Gestão Pública em 2016 pela Universidade Cândido Mendes.

Ficha Catalográfica

Rosa, Bruno Alexandre Barreiros

Uma Metodologia para Roteamento de Veículos Escolares Utilizando Sistemas de Informação Geográfica / Bruno Alexandre Barreiros Rosa; orientador: Rafael Martinelli Pinto. – Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Industrial , 2018.

v., 101 f: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial .

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Problema de Roteamento de Veículos Escolares;. 3. Transporte Escolar Rural;. 4. Sistema de Informação Geográfica;. 5. Problema de Roteamento de Veículos;. 6. Meta-Heurística.. I. Pinto, Rafael Martinelli. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial . III. Título.

CDD: 620.11

Dedico à minha família, aos meus amigos e aos meus professores.

Agradecimentos

A conclusão do mestrado não seria possível sem a ajuda de dezenas de pessoas, muitas delas foram fundamentais para o êxito desta dissertação.

Agradeço aos meus pais e irmãos que me fazem acreditar que o dia de amanhã pode ser melhor do que o de hoje. Sem vocês não chegaria neste momento.

Agradeço a Juliana Marciano e a Ana Almeida, pela força e paciência demonstrada nesse período. A energia de vocês foi fundamental e me fez acreditar que seria capaz de concluir.

Agradeço a Vania Machado, por estimular o meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço ao Reinaldo Ferreira, por ser um verdadeiro exemplo de como é importante aprimorar os conhecimentos em qualquer fase da vida.

Agradeço a Julia Sant'Anna, por apostar em meu potencial e abrir portas para este estudo.

Agradeço ao orientador Rafael Martinelli, pelos ensinamentos e incentivos prestados durante a execução deste trabalho.

Agradeço aos colegas da Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro por serem parceiros durante o período do mestrado, em especial ao Alessandro Jordão, Cibeli Ambrosio, Douglas Lima, Juliana Peixoto, Marcos Tadeu, Mônica Menezes, e todos os membros da equipe do transporte escolar, que em pouco tempo foram importantes para o êxito do estudo.

Por fim, agradeço à minha família e todos os amigos que de uma maneira ou outra contribuíram para este momento.

Resumo

Rosa, Bruno Alexandre Barreiros; Pinto, Rafael Martinelli. **Uma Metodologia para Roteamento de Veículos Escolares Utilizando Sistemas de Informação Geográfica**. Rio de Janeiro, 2018. 101p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O problema de roteamento de veículos escolares, do inglês *School Bus Routing Problem* (SBRP), trata de planejar as rotas de uma frota de veículos para locomover os alunos dos pontos de embarque até suas respectivas escolas. O SBRP é um caso especial do problema de roteamento de veículos, do inglês *Vehicle Routing Problem* (VRP) e é conhecido por ser um problema *NP-difícil*. A maior parte da literatura referente ao SBRP se concentra, principalmente, em modelos matemáticos para resolver o problema de roteamento aplicando restrições da vida real. Já em relação à geocodificação dos endereços das escolas e alunos, bem como a busca de distâncias e tempos de deslocamentos reais, estas também são pontos de vital importância, visto que as distâncias reais se diferem da euclidiana e geodésica principalmente em áreas rurais, região de estudo deste trabalho. Neste contexto, uma metodologia é proposta para o problema, junto com um protótipo para automatizar os procedimentos necessários para a obtenção de informações, cuja aplicação, a partir de um cenário real no contexto brasileiro, é apresentada e dividida em oito fases: definir abrangência, geocodificar o endereço de escolas, alunos e pontos de embarque, definir as características, calcular a distância e o tempo de percurso, montar o banco de dados georreferenciado e de veículos, aplicar uma ferramenta para a obtenção das rotas, geoespacilizar as rotas e elaborar diagnóstico. A proposta é testada aplicando uma ferramenta para a obtenção das rotas que utiliza a meta-heurística *Adaptative Large Neighborhood Search* (ALNS) para resolver instâncias do VRP. Desta forma, uma das contribuições do estudo consiste no georreferenciamento das unidades escolares estaduais, estando as informações presentes na plataforma do Google Maps para visualização do público. No estudo são localizados e roteados 150 alunos de 7 unidades escolares da cidade de Nova Friburgo. O resultado apresenta valores consistentes e satisfatórios, demonstrando economia média de 41,62% nos custos praticados nas rotas.

Palavras-chave

Problema de Roteamento de Veículos Escolares; Transporte Escolar Rural; Sistema de Informação Geográfica; Problema de Roteamento de Veículos; Meta-Heurística.

Abstract

Rosa, Bruno Alexandre Barreiros; Pinto, Rafael Martinelli (Advisor). **A Methodology for School Vehicles Routing Using Geographic Information Systems**. Rio de Janeiro, 2018. 101p. Dissertação de mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The School Bus Routing Problem (SBRP) deals with planning the routes of a fleet of vehicles to move the students from boarding points to their respective schools. The SBRP is a special case of Vehicle Routing Problem (VRP) and is known to be an *NP-hard* problem. Most of the SBRP literature focuses, mainly, on mathematical models to solve the routing problem by applying real-life restrictions. Regarding the geocoding of the addresses of schools and students, as well as the search for distances and times of real displacements, are also points of vital importance, since the actual distances differ from the euclidean and geodesic ones mainly in rural areas, study region this work. In this context, a methodology is proposed for the problem, along with a prototype to automate the procedures required to obtain information, whose application, based on a real scenario in the Brazilian context is presented, divided into eight phases: to define scope, to geocode the address of schools, student and boarding points, to define the characteristics, to calculate the distance and travel time, to set the georeferenced database and vehicles, to apply a tool to obtain the routes, to geospatialize the routes and elaborate diagnosis. The proposal is tested by applying a tool to obtain routes using the Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) meta-heuristic to solve VRP instances. Thus, one of the contributions of the study consists in the georeferencing of the state school units, with the information present in the Google Maps platform for public viewing. In the study, 150 students from 7 school units in the city of Nova Friburgo were located. The result presents consistent and satisfactory values, demonstrating savings of 41.62% in the costs practiced on the routes.

Keywords

School Vehicle Routing Problem; Rural School Transport; Geographic Information System; Vehicle Routing Problem; Metaheuristic.

Sumário

1	Introdução	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Problema de Pesquisa e Justificativa	15
1.3	Hipótese	17
1.4	Objetivos	17
1.4.1	Objetivo Geral	17
1.4.2	Objetivos Específicos	17
1.5	Metodologia da Pesquisa	18
1.6	Organização do Trabalho	19
2	Referencial Teórico	20
2.1	O Problema de Roteamento de Veículos Escolares	20
2.1.1	Planejamento do Sistema	20
2.1.2	Classificação do Problema	22
2.2	Métodos Computacionais para Resolução	29
2.2.1	Métodos Exatos	30
2.2.1.1	Branch-and-bound	31
2.2.1.2	Branch-and-cut	31
2.2.1.3	Branch-and-price	32
2.2.2	Métodos Heurísticos	32
2.2.2.1	Clarke e Wright	32
2.2.2.2	Mole e Jameson	33
2.2.2.3	Troca- λ	34
2.2.2.4	k -opt	34
2.2.2.5	Pétalas	35
2.2.2.6	Branch-and-bound Truncado	36
2.2.3	Meta-Heurísticas	36
2.2.3.1	Arrefecimento Simulado	36
2.2.3.2	Busca Tabu	37
2.2.3.3	Algoritmo Genético	37
2.2.3.4	Colônia de Formigas	39
2.2.3.5	Busca em uma Vizinhança Grande Adaptada	39
2.3	Sistemas de Informação Geográfica	41
3	Metodologia	43
3.1	Abrangência	43
3.2	Geocodificação	44
3.2.1	Busca Através do Navegador	45
3.2.2	Busca Através de Linguagem de Programação	45
3.3	Característica	47
3.4	Distância e Tempo	47
3.4.1	Distância Estimada	48
3.4.2	Distância Real	50
3.4.2.1	Busca Através do Navegador	50

3.4.2.2	Busca Através de Linguagem de Programação	51
3.5	Base de Dados	53
3.6	Solução	54
3.7	Geoespacilização	57
3.8	Diagnóstico	57
4	Aplicação	59
4.1	Transporte Escolar no Estado do Rio de Janeiro	59
4.2	Abrangência	60
4.3	Geocodificação	60
4.4	Característica	64
4.5	Distância e Tempo	65
4.6	Base de Dados	65
4.7	Solução	66
4.8	Geoespacialização	67
4.9	Diagnóstico	69
5	Conclusão	71
5.1	Futuros Desdobramentos	72
	Referências bibliográficas	74
A	Instrução para Obtenção de Coordenadas no Google Maps	82
B	Resultado da Geocodificação das Unidades Escolares	87
C	Resultado da Matriz de Distância e Tempo entre os Pontos	93

Lista de figuras

Figura 2.1	Gráfico de quantidades de estudos por característica	25
Figura 2.2	Métodos de solução do VRP	30
Figura 2.3	Combinações para melhoria de rota utilizando 3-opt	35
Figura 2.4	Fluxograma do funcionamento de um algoritmo genético.	38
Figura 3.1	Fases da metodologia	43
Figura 3.2	Região de aplicação do SBRP	44
Figura 3.3	Resultado da pesquisa do Google Maps Geocoding API	45
Figura 3.4	Resultado da pesquisa manual no Google Maps	51
Figura 3.5	Resultado da pesquisa no Google Maps Distance Matrix API	51
Figura 3.6	Estrutura do <i>VRP Spreadsheet Solver</i>	53
Figura 3.7	Percurso do transporte escolar	57
Figura 4.1	Rede viária do estado do Rio de Janeiro	61
Figura 4.2	Unidades Escolares Estaduais do estado do Rio de Janeiro no QGIS	61
Figura 4.3	Unidades Escolares Estaduais do Rio de Janeiro no Google Maps	62
Figura 4.4	Pontos de Embarque dos Alunos que utilizam o TER	62
Figura 4.5	Município de Nova Friburgo, UEs e pontos de embarque	63
Figura 4.6	Rotas do Transporte Escolar Rural de Nova Friburgo	67
Figura 4.7	Comparação de custos atuais e otimizados por escola	69
Figura A.1	Resultado da pesquisa no Google Maps	82
Figura A.2	Resultado da pesquisa no Google Maps	83
Figura A.3	Resultado da pesquisa no Google Maps	84
Figura A.4	Resultado da pesquisa no Google Maps	85
Figura A.5	Resultado da pesquisa no Google Maps	85
Figura A.6	Resultado da pesquisa no Google Maps	86
Figura A.7	Resultado da pesquisa no Google Maps	86

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Classificação dos problemas baseada em suas características	22
Tabela 2.2	Revisão da literatura baseada nas características do SBRP	26
Tabela 3.2	Etapas do diagnóstico da metodologia proposta	58
Tabela 4.1	Características identificadas	64
Tabela 4.2	Comparativo entre os cálculos de distâncias	65
Tabela 4.3	Veículos disponíveis	66
Tabela 4.4	Resultado do SBRP	68
Tabela B.1	Coordenadas geográficas das unidades escolares	87
Tabela C.1	Matriz de Origens e Destinos	93

Lista de Abreviaturas

- AC – Todos os alunos são considerados
- AG – Somente alunos gerais são considerados
- ALNS – *Adaptive Large Neighborhood Search* (Busca Adaptativa de Grande Vizinhança)
- API – *Application Programmer Interface* (Interface de Programação de Aplicação)
- C – Capacidade do veículo
- EPT – Tempo de recolhimento mais tarde
- FNDE – Fundo Nacional do Desenvolvimento da Educação
- Geipot – Grupo Executivo de Integração da Política de Transportes
- GIS – *Geographic Information System* (Sistema de Informação Geográfica)
- HO – Homogênea
- HT – Heterogênea
- JSON – *JavaScript Object Notation* (Notação de Objetos JavaScript)
- LB – Balancear a alocação de aluno
- M – Manhã
- ML – Múltipla
- MNP – Não é permitido (Problema de carga única)
- MP – É permitido
- MRL – Comprimento máximo de rota
- MRT – Tempo máximo de percurso
- MSN – Número mínimo de alunos para criar uma rota
- MWT – Tempo ou distância de caminhada máxima
- N – Noite
- N – Número de veículos utilizados
- OD – Origem e Destino
- OVRP – *Open Vehicle Routing Problem* (Problema de Roteamento de Veículos Aberto)
- PO – Pesquisa Operacional
- R – Rural
- SEEDUC-RJ – Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro
- SBL – Eliminação de sub-turnos

- SBRP – *School Bus Routing Problem* (Problema de Roteamento de Veículos Escolares)
- SWD – Distância a pé do aluno
- T – Tarde
- TBD – Tempo ou distância total de viagem do veículo
- TER – Transporte Escolar Rural
- TCC – Compatibilidade de viagem
- TL – Perda de tempo do aluno
- TSD – Tempo ou distância total de deslocamento do aluno
- TSF – Transbordo de alunos
- TW – Janela de tempo da escola
- U – Urbana
- UE – Unidade Escolar
- UN – Única
- VRP – *Vehicle Routing Problem* (Problema de Roteamento de Veículos)

1 Introdução

1.1 Considerações Iniciais

No Brasil, apesar do montante de recursos a ser aplicado nos serviços públicos não ser irrisório, os valores não são suficientes para atender todas as necessidades que os diversos setores apresentam, como é o caso do setor de transportes. É possível justificar tal fato, quando se leva em consideração que a elevada rigidez orçamentária gerada pelo crescimento das despesas obrigatórias reduz a capacidade do governo de fazer adequações dos gastos públicos em função das circunstâncias conjunturais na economia. Esse cenário requer do gestor uma reavaliação das políticas públicas e dos instrumentos de gestão para que sejam mais efetivos de forma que utilize os recursos de maneira sustentável (FAZENDA, 2016).

Quando se refere especificamente ao estado do Rio de Janeiro, a situação torna-se ainda mais gravosa, visto que nos últimos anos o governo passa por uma grande crise econômica, tornando a tomada de decisão sobre as despesas obrigatórias uma importante etapa para melhor aplicação de recursos.

É importante salientar que o setor de transporte é uma área chave de decisão dentro da logística e a precariedade de um sistema tem um custo a ser pago (NOVAES et al., 2016). Este custo é uma das maiores preocupações para as organizações e quando se trata de uma organização pública, isso toma uma proporção maior, dada a responsabilidade de usar os recursos não só de maneira eficaz, mas de maneira eficiente.

Um caso especial deste setor é o Transporte Escolar Rural (TER), que é fortemente afetado por uma série de fatores como: demografia, distância até a escola, condições muitíssimo precárias de circulação das rodovias, péssimo estado de conservação dos veículos, segurança inadequada no transporte e capacidade excedida, sendo notável a falta de planejamento e gestão capacitada do processo (CARVALHO et al., 2010).

A Geipot (1995) define TER como uma modalidade do Transporte Rural oferecido pelo poder público (terceirizado ou não) para transportar alunos entre a área rural e urbana, ou dentro da área rural, de modo a garantir o

acesso do aluno à escola.

A transferência de alunos de suas residências às escolas em uma base diária é uma importante e cara tarefa. Melhorar a eficiência da logística de transportes do aluno pode render uma economia significativa (SHAFABI et al., 2017). Dessa forma, para reduzir os custos de operação dos sistemas e melhorar a qualidade dos serviços prestados, se aplicam as técnicas da Pesquisa Operacional (PO) (SIQUEIRA; SOUZA, 2012). A PO é uma ciência que objetiva fornecer ferramentas quantitativas ao processo de tomada de decisão (ARENALES et al., 2015).

Embora as decisões de transporte se expressem em uma variedade de formas, as principais são a seleção do modal, a roteirização do transportador, a programação de veículos e a consolidação do embarque (BOWERSOX; CLOSS, 1997). Assim, o roteamento é considerado o braço operacional da atividade logística, cuja característica é determinar percursos ótimos para uma frota de veículos de forma a atender um conjunto de clientes geograficamente dispersos, respeitando as restrições estabelecidas (BEZERRA; NETO, 2011).

Dessa forma, conceitua-se o problema de roteamento do veículos escolares, do inglês *School Bus Routing Problem* (SBRP), como um problema que visa encontrar um conjunto de rotas que otimize objetivos específicos (por exemplo, custo total) na operação de uma frota de veículos escolares que busca alunos no ponto de embarque e os entregam às escolas nos respectivos turnos, observando limitações físicas e temporais predefinidas (BOWERMAN et al., 1995).

1.2

Problema de Pesquisa e Justificativa

O sistema de transporte escolar rural, na maioria dos municípios brasileiros, é deficiente e as despesas finais são altas, porque há falta de trabalhadores qualificados para gerenciar a rede de transporte, que inclui: estabelecer rotas, selecionar estudantes, designar e atribuir os veículos às rotas, considerando o custo, a segurança, o horário de início da aula, o tempo de deslocamento e a capacidade dos veículos (LIMA, 2015).

A Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro (SEEDUC-RJ), em 2017, gerenciou 1.253 unidades escolares e, aproximadamente, 600 mil alunos, sendo o 4º maior estado em quantidade de escolas estaduais. O escopo do problema desta pesquisa consiste no TER de 15.788 alunos de 173 unidades escolares do ano de 2017. A problemática do SBRP tem sido constantemente estudada desde a primeira publicação de Newton e Thomas (1969). A atenção dada a este problema é, em grande parte, motivada pela necessidade constante de redução de gastos na prestação de serviços à população (ALVES, 2015).

No estado do Rio de Janeiro, atualmente, as definições das rotas do transporte escolar rural são realizadas de forma manual, feitas por servidores que conhecem ou não a localidade de residência dos alunos. Zamboni (1997) salienta que a principal problemática desta modalidade de transporte é o estabelecimento dos roteiros com a menor distância total percorrida e não pode ser feita de modo intuitivo e manual.

Para definir as rotas de cada unidade escolar é necessário conceituar o problema de roteamento de veículos, do inglês *Vehicle Routing Problem* (VRP), uma vez que o SBRP é uma variante do VRP. No VRP tradicional, uma rota começa a partir de um depósito ou de uma garagem, atravessa vários clientes e, finalmente, retorna ao seu local inicial. No entanto, no SBRP, a garagem é diferente da escola e os tempos de viagem (ou distâncias) da garagem para o primeiro ponto de embarque e da escola para a garagem inicial do veículo são insignificantes.

Dessa forma, podemos caracterizar que a estrutura de rotas dos veículos do SBRP é similar à estrutura do *Open Vehicle Routing Problem* (OVRP) (FU et al., 2005). A característica importante do OVRP é que o veículo não retorna ao seu depósito inicial depois de visitar o último cliente em uma rota (LI et al., 2007; CHEN et al., 2015).

Tais problemas aqui apresentados podem ser resolvidos por métodos computacionais exatos, heurísticos ou meta-heurísticos. Neste trabalho, por exemplo, é utilizada a ferramenta *VRP Spreadsheet Solver* proposta por Erdogan (2017) para resolver o problema separadamente de cada unidade escolar através da meta-heurística de busca em uma vizinhança grande adaptada, do inglês *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS).

A visualização da resolução do problema de roteamento de veículos em mapas e/ou em imagens de satélites é possível através de Sistemas de Informação Geográfica, do inglês *Geographic Information System* (GIS). Os GISs foram criados para tratar dados referenciados espacialmente e através de técnicas de análise e manipulação permitem a integração dos algoritmos de roteamento de veículos às bases geográficas.

Tendo em vista os esforços necessários para transportar os alunos residentes no campo da região do estado do Rio de Janeiro, a SEEDUC-RJ designou recursos financeiros na ordem de aproximadamente R\$ 38 e R\$ 36 milhões nos anos de 2016 e 2017, respectivamente. Portanto, a complexidade de considerar os critérios quantitativos combinados aos qualitativos neste trabalho se justifica devido ao seu impacto econômico e social.

Por todo o exposto, o problema que emerge deste estudo é: *"Como assessorar os estados e municípios brasileiros a sistematizar o roteamento*

do transporte escolar rural prestado à sociedade no menor custo possível, garantindo o direito de acesso dos alunos às escolas?"

1.3

Hipótese

Pensando em automatizar o processo de tomada de decisão e obter soluções de custo mínimo, foi elaborada a seguinte hipótese para a pesquisa: *"Assimilando as características do SBRP, juntamente com o uso dos métodos computacionais e sistemas de informação geográfica é possível encontrar uma solução que possibilite a redução dos custos do transporte escolar rural garantindo o acesso dos alunos às escolas"*

Tal hipótese é sustentada no decorrer do desenvolvimento teórico e metodológico da pesquisa ao serem abordadas as questões referentes ao SBRP, especificamente no estado do Rio de Janeiro. Apesar de toda a base teórica, que é fundamental para a estrutura desta pesquisa, o trabalho possui enfoque no desenvolvimento prático, sendo mais abordadas as questões que dizem respeito às soluções propostas para a problemática do tema.

1.4

Objetivos

1.4.1

Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho consiste em propor uma metodologia para encontrar as rotas do transporte escolar rural, por escola e turno, que minimize o custo da viagem do veículo contratado, respeitando as restrições de capacidade e tempo de condução.

1.4.2

Objetivos Específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Formular um protótipo para automatizar a geocodificação de endereços e/ou locais;
- Formular um protótipo para automatizar a busca da distância e tempo real entre os locais geocodificados;
- Apresentar um texto introdutório dos principais métodos de roteirização de veículos;
- Aplicar e validar o modelo desenvolvido, por meio de método computacional, em um problema real;

- Demonstrar os roteiros através de um Sistema de Informação Geográfica (GIS);
- Formular um diagnóstico que auxilie os gestores públicos na tomada de decisão.

1.5

Metodologia da Pesquisa

Esta pesquisa se utiliza de uma abordagem hipotético-dedutiva para atingir os objetivos anteriormente propostos. Neste sentido, busca-se evidência empírica para a hipótese. A natureza deste trabalho é classificada como pesquisa aplicada, dado que a finalidade é gerar conhecimentos para aplicação prática dirigida à solução de problemas específicos e os objetivos são classificados em pesquisa descritiva, visto que pretende descrever as características de um determinado fato (MATIAS-PEREIRA, 2016).

Como estratégia de pesquisa, é realizada uma aplicação com dados reais, por representar uma maneira de investigar a efetividade do conjunto de procedimentos pré-especificados pela metodologia proposta durante a pesquisa. Esta aplicação representa uma análise empírica do problema em questão (MATIAS-PEREIRA, 2016). Para tanto, a metodologia abrange as etapas a seguir:

Etapa 1 - Estruturação do Problema

Nesta etapa, foi estruturado o tema discorrido neste trabalho de dissertação. A estruturação considera a contextualização, a identificação do problema, a justificativa, a estruturação da hipótese, a definição dos objetivos e a estruturação das etapas para o desenvolvimento da metodologia proposta.

Etapa 2 - Revisão bibliográfica

A revisão da literatura do presente trabalho consiste em um levantamento de trabalhos científicos, no âmbito nacional e internacional, que abordem conceitos relacionados as palavras chaves em estudo: "*SBRP*", "*School Bus Routing Problem*", "*Rural School Transport*", "*Problema de Roteamento de Veículos Escolares*", "*Geographic Information System*", "*Vehicle Routing Problem*", "*Metaheuristic*" e "*Transporte Escolar Rural*". Desta forma, são realizadas consultas às bases de dados eletrônicas disponíveis no sistema integrado da PUC-Rio, incluindo artigos disponíveis em *journals* e relatórios técnicos indexados através das bases *Scopus* e *Web of Science*. Neste sentido, foram considerados artigos observando o título, resumo e palavras chave.

Etapa 3 - Estruturação da metodologia proposta

Nesta etapa, é estruturada a metodologia considerando a caracterização do objeto, a definição dos elementos e seus respectivos métodos, a representação dos componentes e a estruturação das etapas de preparação, execução e tratamento dos dados.

Etapa 4 - Aplicação

Nesta etapa, a metodologia proposta é uma aplicação de dados reais, como forma de avaliar e validar sua aplicabilidade. Sendo assim, são definidos os parâmetros, a abrangência do estudo e coletados os dados necessários.

Etapa 5 - Análise e avaliação da metodologia

Nesta etapa, é analisada a aplicabilidade e verificada a eficácia da metodologia proposta bem como os desdobramentos futuros de sua utilização.

1.6

Organização do Trabalho

A estrutura desta dissertação está organizada em cinco capítulos, incluindo este introdutório.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura do SBRP, alguns Métodos Computacionais de resolução e os conceitos de Sistemas de Informação Geográfica. O entendimento das bases conceituais é importante para a compreensão da metodologia deste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia proposta dividida em oito fases. Em cada fase são abordadas as técnicas e os procedimentos utilizados em cada método.

Na sequência, o Capítulo 4 apresenta a aplicação abordada em um contexto real utilizando a metodologia proposta.

Por último, o Capítulo 5 versa sobre as principais conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

2

Referencial Teórico

A revisão da literatura diz respeito à fundamentação teórica que será adotada para tratar do tema e do problema da pesquisa (MATIAS-PEREIRA, 2016). Para este trabalho são considerados periódicos no âmbito nacional e internacional.

Neste capítulo, é traçado um quadro teórico desde a década de sessenta até o presente trabalho sobre o problema de roteamento do transporte escolar com base nas características descritas por Park e Kim (2010). Na sequência, é descrita uma revisão dos principais métodos computacionais utilizados para resolver problemas de roteamento de veículos são descritos. Por fim, os conceitos de sistemas de informações geográficas são referenciados.

Ao final deste capítulo, o leitor terá uma visão apurada dos conceitos fundamentais dos principais autores para a evolução da proposta de metodologia desenvolvida no Capítulo 3.

2.1

O Problema de Roteamento de Veículos Escolares

O transporte escolar tem por finalidade transportar alunos de um determinado ponto próximo a sua residência até à escola onde estuda (CORBERÁN et al., 2002). Esse setor é abrangente e absorve a maior parte dos custos de determinadas organizações (NOVAES et al., 2016).

O SBRP procura planejar um cronograma eficiente para uma frota de ônibus escolares, em que cada ônibus busca alunos em várias paradas e os deixa em suas escolas designadas ao mesmo tempo que satisfaz várias restrições, tais como a capacidade máxima de um ônibus, o tempo máximo de viagem de um aluno no ônibus e a janela de tempo de uma escola (PARK; KIM, 2010).

2.1.1

Planejamento do Sistema

O SBRP não é considerado um problema único e nem dominante, consiste em diferentes sub-problemas, envolvendo preparação de dados, seleção de pontos de embarque, geração de rota, ajuste do horário escolar e cronograma da rota (PARK; KIM, 2010), conforme detalhado a seguir:

Preparação de dados: nesta fase, a rede viária é especificada e quatro conjunto de dados são preparados: alunos, escolas, veículos e matriz de origens e destinos (OD). Os dados dos alunos incluem a localização de suas residências, o ponto de embarque, a escola de destino e tipo de aluno. Os dados das escolas contêm a localização, a hora de início e término para as chegadas dos veículos e o tempo máximo de condução de um aluno. Os dados dos veículos incluem a localização de origem, capacidade e tipo. A matriz OD armazena os tempos de viagem mais curtos e distâncias entre pares de nós (PARK; KIM, 2010).

Seleção de pontos de embarque: este sub-problema busca selecionar um conjunto de pontos de embarque e atribuir alunos a essas paradas. No geral, para alunos residentes no meio rural, os pontos de embarques são suas residências. No entanto, nas áreas urbanas os alunos caminham até um ponto de ônibus mais próximo de sua residência (PARK; KIM, 2010). Na maioria dos estudos de casos, os pontos de embarque são fixos e o sub-problema se resume a alocar, de forma eficiente, alunos a estes respectivos locais (JÚNIOR et al., 2017).

Geração de rota: este sub-problema é o mais relevante do SBRP (FARRAJ et al., 2014). O intuito é planejar o caminho a ser percorrido por cada veículo até os respectivos pontos de embarque. Os algoritmos especializados para resolver este sub-problema são detalhados na Seção 2.2, e podem ser classificados como Exato, Heurístico ou Meta-Heurístico.

Ajuste do horário escolar: em sua maioria, neste sub-problema, o horário de início e término das aulas é determinado pelas unidades escolares e tratado como restrição. No entanto, diversos trabalhos consideram os horários como variáveis de decisão, no que implica encontrar os melhores tempos de início e término, a fim de maximizar os quantitativos de rotas que podem ser atendidas pelo mesmo veículo (DESROSIERS et al., 1981; DESROSIERS et al., 1986; FÜGENSCHUH, 2009).

Cronograma da rota: é um sub-problema que especifica o tempo exato de início e término de cada rota e forma uma cadeia de rotas, as quais podem ser executadas sucessivamente pelo mesmo veículo (PARK; KIM, 2010).

A maior parte da literatura especializada em SBRP trata os sub-problemas separadamente e em sequência. As fases são amplamente correlacionadas, no entanto, precisam ser solucionadas por etapas, devido à sua

complexidade (PARK; KIM, 2010). Apesar da complexidade existente na fase de programação das rotas, uma combinação de peculiaridades do SBRP pode ser considerada como uma variante do problema de otimização no planejamento (LIMA, 2015). Um dos obstáculos para classificar o SBRP de forma eficiente encontra-se no que se basear. O questionamento se refere aos requisitos de solução do SBRP ou no desenvolvimento a partir das técnicas de solução computacionais (ASSAD, 1988).

2.1.2

Classificação do Problema

Para não se restringir no campo das teorias e se aproximar da realidade, a Tabela 2.1 foca nos aspectos práticos dos problemas com base no trabalho de Park e Kim (2010) complementado com estudos mais recentes elencados na Tabela 2.2. Na sequência é detalhado cada critério.

Tabela 2.1: Classificação dos problemas baseada em suas características

Critérios	Descrição
Número de unidades escolares	A. Única (UN) B. Múltipla (ML)
Localidade	A. Urbana (U) B. Rural (R)
Escopo do problema	A. Manhã (M) B. Tarde (T) C. Noite (N)
Carregamento Misto	A. É permitido (MP) B. Não é permitido (Problema de carga única) (MNP)
Aluno com necessidade educacional especial	A. Todos os alunos são considerados (AC) B. Somente alunos gerais são considerados (AG)
Frota	A. Homogênea (HO) B. Heterogênea (HT)
Objetivo	A. Número de veículos utilizados (N) B. Tempo ou distância total de viagem do veículo (TBD) C. Tempo ou distância total de deslocamento do aluno (TSD) D. Distância a pé do aluno (SWD) E. Balancear a alocação de aluno (LB) F. Comprimento máximo de rota (MRL) G. Perda de tempo do aluno (TL)
Restrição	A. Capacidade do veículo (C) B. Tempo máximo de percurso (MRT) C. Janela de tempo da escola (TW) D. Tempo ou distância de caminhada máxima (MWT) E. Tempo de recolhimento mais tarde (EPT) F. Número mínimo de alunos para criar uma rota (MSN) G. Transbordo de alunos (TSF) H. Compatibilidade de viagem (TCC) I. Eliminação de sub-turnos (SBL)

Fonte: Autor, 2018.

Número de unidade escolar: a abordagem pode trabalhar com uma única escola ou múltiplas. Problemas reais geralmente lidam com uma rede composta por várias escolas. No entanto, é comum na literatura a abordagem do SBRP para solucionar o problema único de cada unidade (PARK; KIM, 2010).

Localidade: a abordagem do SBRP de escola rural é diferente da escola

urbana. A diferença se deve aos seguintes fatos: menor densidade populacional, maior distância percorrida por rota, menor número de estudantes por pontos de ônibus, maior número de pontos de ônibus por rota, poucas ou praticamente nenhuma rua de sentido único, menor número de estradas alternativas, entre outros (CHEN et al., 2015).

Escopo do problema: essa definição consiste em classificar as abordagens quanto ao turno em que deve ocorrer o transporte escolar, se no período da manhã, tarde e/ou noite (PARK; KIM, 2010). É importante atentar para esse escopo devido ao fato de associar o turno ao regime de estudo do aluno que pode ser parcial (manhã, tarde ou noite) ou integral (manhã e tarde).

Carregamento misto: esta característica abrange a possibilidade de os alunos de diferentes unidades escolares viajarem no mesmo veículo ou não. Quando são permitidos embarques misturados, alunos de diferentes escolas podem ser colocados no mesmo ônibus ao mesmo tempo. Ao contrário, torna-se um problema de carga única em que o veículo pode retirar ou deixar os alunos em uma única escola (BODIN et al., 1983).

Aluno com necessidade educacional especial: o problema do roteamento de alunos com necessidade educacional especial é fundamentalmente diferente, em muitos aspectos, do roteamento de alunos em geral. Primeiro, estudantes de educação especial são retirados e deixados diretamente em suas residências e não nos pontos de embarque. Em segundo lugar, há uma restrição mais rígida sobre o tempo máximo de condução para um aluno especial em um veículo do que para um estudante em geral. Em terceiro lugar, cada aluno deve ser atendido de forma diferente, dependendo das restrições de mobilidade de sua deficiência específica, uma vez que alguns alunos precisam de equipamentos especiais e/ou auxílio de cuidadores no deslocamento do trajeto residência-escola-residência. Em tais casos, deve ser designado um veículo adaptado que possa transportar esses alunos com conforto e segurança. A elegibilidade do aluno e do veículo compõe a complexidade do problema.

Frota: pode-se assumir o uso de uma frota de veículos heterogênea ou homogênea. O problema abordado em uma frota heterogênea refere-se ao fato de que cada veículo pode ser diferente um dos outros. Cada veículo terá declarado sua capacidade, tempo máximo de condução, custo fixo e custo variável por unidade de distância. A frota homogênea corresponde a um conjunto de veículos exatamente com as mesmas características.

Objetivo: a maioria das abordagens do SBRP objetiva reduzir a distância total do percurso. Savas (1978) aborda três medidas para avaliar o desempenho dos serviços públicos. São elas: eficiência, eficácia e equidade. Esses critérios foram classificados com base nos objetivos por Bowerman et al. (1995) e Li e Fu (2002) como segue:

- A **eficiência** é definida como a razão entre o nível de serviço e o custo dos recursos necessários para fornecer esse serviço. Para uma determinada qualidade prestada no serviço, a eficiência é determinada pelo seu custo. Portanto, uma solução que requer menos veículos e tem menor tempo de viagem é preferida sob a perspectiva da eficiência.
- A **eficácia** de um serviço é medida pelo tempo total gasto na viagem e pela distância do percurso até o ponto de embarque, o que resulta na melhor maneira de atendimento à demanda. Desta forma, um veículo escolar deve estar disponível para todos os alunos elegíveis dentro de um nível de serviço aceitável.
- As considerações sobre a **equidade** avaliam a imparcialidade da prestação do serviço. Uma solução com uma boa medida de equidade no atendimento aos alunos é atingida quando se obtém o equilíbrio entre a demanda e o tempo de viagem dos veículos. Em linhas gerais, a equidade deve ser observada ao definir a eficiência e eficácia de um serviço.

Restrição: várias restrições podem ser consideradas no SBRP. A revisão realizada e descrita na Tabela 2.1 abrange a totalidade das restrições. As mais observadas, postuladas por Braça et al. (1997) e Spada et al. (2005) se referem a:

- Restrição da capacidade do veículo para transportar um determinado número de alunos;
- Tempo máximo de descolamento do veículo da unidade escolar até o último ponto de desembarque;
- Distância máxima permitida do aluno a partir da sua residência até o ponto de embarque;
- Janela de tempo do início e do final da hora de chegada de um veículo à escola.

O SBRP tem sido estudado constantemente desde o surgimento da primeira publicação por Newton e Thomas (1969). Park e Kim (2010) realizaram uma revisão bibliográfica dos principais artigos sobre o tema. Shafahi et al.

(2017) complementaram com alguns estudos em seu trabalho. Na Tabela 2.2, é estendida as duas revisões bibliográficas classificando as abordagens utilizadas pelos critérios da Tabela 2.1.

As características de turno e alunos com necessidades especiais não estavam evidentes nos textos analisados. Sendo assim, sem causar prejuízo à investigação, não foram levados em consideração para a montagem da tabela resumo. Os estudos analisados podem ser contabilizados e resumidos graficamente de acordo com os critérios e descrições. A Figura 2.1 ilustra este resultado.

PUC-Rio - Certificação Digital N° 1613372/CA



Figura 2.1: Gráfico de quantidades de estudos por característica
 Fonte: Autor, 2018.

Tabela 2.2: Revisão da literatura baseada nas características do SBRP

Referência	Escola	Localidade	Carregamento	Frota	Objetivos	Restrições	Tamanho	Local
Newton e Thomas (1969)	UN	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	50–80 pontos de embarque	Artificial
Angel et al. (1972)	ML	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	1.500 alunos	Tippecanoe, Indiana, USA
Bennett e Gazis (1972)	UN	U	MNP	HO	TBD, TSD	C	256 pontos de embarque	Toms River, Nova Jersey, USA
Newton e Thomas (1974)	ML	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	1.097 alunos, 76 pontos de embarque	Western, New York, USA
Verderber (1974)	ML	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	11.000 alunos	New York, USA
Bodin e Berman (1979)	ML	U	MNP	HO	N	C, MRT, TW	13.000 alunos	Brentwood, New York, USA
Gavish e Shlifer (1979)	UN	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	21 pontos de embarque	Artificial
Dulac et al. (1980)	UN	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT, MWT	585 alunos, 99 pontos de embarque	Drummondville, Canada
Desrosiers et al. (1981)	ML	U/R	MNP	HO	N, TBD	C, MRT, MWT	16.000 alunos	Drummondville, Canada
Hargroves e Demetsky (1981)	ML	U	MP	HT	N, TBD	C, MRT, MSN	8.537 alunos	Albemarle, Virginia, USA
Swersey e Ballard (1984)	ML	U	MNP	HO	N	TW	37 escolas	New Haven, Connecticut, USA
Chapleau et al. (1985)	UN	U	MNP	HO	N, SWD	C, MRT, MWT	2.079 alunos	Artificial
Russell e Morrel (1986)	ML	U	MP	HO	TBD	C, MRT	140 alunos	Tulsa, Oklahoma, USA
Chen et al. (1990)	ML	R	MP	HO	N, TBD	C, MRT	2.413 alunos	Choctaw, Alabama, USA
Thangiah e Nygard (1992)	UN	R	MNP	HT	N, TBD, TSD	C, MRT	353 alunos	Artificial
Bowerman et al. (1995)	UN	U	MNP	HO	N, SWD, LB	C, MWT	138 alunos	Ontario, Canada
Braça et al. (1997)	ML	U	MP	HO	N	C, MRT, TW, EPT, MSN	838 pontos de embarque, 73 escolas	Manhattan, New York, USA

Tabela 2.2: Revisão da literatura baseada nas características do SBRP (Cont.)

Referência	Escola	Localidade	Carregamento	Frota	Objetivos	Restrições	Tamanho	Local
Corberán et al. (2002)	UN	R	MNP	HO	N, MRL	C	55 pontos de embarque	Burgos, Spain
Li e Fu (2002)	UN	U	MNP	HT	N, TSD, TBD, LB	C	86 alunos, 54 pontos de embarque	Hong Kong, China
Ripplinger (2005)	UN	R	MNP	HT	N, TBD	C, MRT	131 alunos	Artificial
Spada et al. (2005)	ML	R	MP	HT	TL	C, TW	274 alunos	Switzerland
Schittekat et al. (2006)	UN	U	MNP	HO	TBD	C	50 alunos, 10 pontos de embarque	Artificial
Bektas e Elmastas (2007)	UN	U	MNP	HO	N, TBD	C, MRT	519 alunos	Ankara, Turkey
Fügenschuh (2009)	ML	R	MNP	HO	N, TBD	TW	102 escolas	Germany
Díaz-Parra et al. (2012)	UN	U	MNP	HO	TBD, N	C, MRT, SBL	200 pontos de embarque	Artificial
Park et al. (2012a)	ML	R	MP	HO/HT	N	SCH	100 escolas, 562 pontos de embarque, 28.175 alunos	Artificial
Park et al. (2012b)	ML	U	MP	HT	N	C, MRT, TW	100 escolas, 2.000 pontos de embarque, 32.048 alunos	Artificial
Schittekat et al. (2013)	UN	U/R	MNP	HO	TBD	C, SBL	40 pontos de embarque, 200 alunos	Artificial
Faraj et al. (2014)	ML	R	MNP	HT	TBD	C, MRT	23 escolas, 944 alunos	Minas Gerais, Brasil
Kinable et al. (2014)	UN	U	MNP	HO	TBD	C, MRT	40 pontos de embarque, 800 alunos	Artificial
Bögl et al. (2015)	ML	U/R	MP	HO	TBD, TSD	MWT, TSF, C, SBL	8 escolas, 500 alunos	Artificial
Campbell et al. (2015)	ML	R	MP	HO	TBD	C	5 escolas, 2.301 alunos	St. Louis, Missouri, USA
Chen et al. (2015)	UN	U	MNP	HO/HT	TBD, N	SCH	100 escolas, 562 pontos de embarque, 28.175 alunos	Artificial

Tabela 2.2: Revisão da literatura baseada nas características do SBRP (Cont.)

Referência	Escola	Localidade	Carregamento	Frota	Objetivos	Restrições	Tamanho	Local
Kang et al. (2015)	ML	U	MP	HT	N, TBD	C, MRT	6 escolas, 26 alunos	USA
Kumar e Jain (2015)	UN	U	MNP	HO	TBD	C	40 escolas, 11.600 alunos	Artificial
Santana et al. (2015)	UN	U/R	MNP	HO	TBD	C, TW	600 alunos, 440 pontos de embarque	Bogota, Colombia
Conceicao (2015)	ML	R	MP	HT	TBD	C, SBL	23 escolas, 716 alunos	Minas Gerais, Brasil
Chen et al. (2015)	UN	U	MNP	HO	TBD, TSD	C, MWT	6 escolas, 400 alunos	Taiwan
Yao et al. (2016)	ML	U	MP	HO	TBD	C, MRT	2 escolas, 116 pontos de embarque, 1.088 alunos	Artificial
Caceres et al. (2017)	ML	U	MNP	HO	TBD, N	C, MRT, SBL	13 escolas, 177 pontos de embarque, 1.237 alunos	Williamsville, New York, USA
Lima et al. (2017)	ML	R	MP	HT	TBD, N, LB	C	20 escolas, 150 pontos de embarque	Artificial
Shafahi et al. (2017)	ML	U/R	MP	HO	TBD	C, SBL, TCC, TW	25 escolas, 200 pontos de embarque, 3.656 alunos	Artificial
Este Trabalho (2018)	UN	R	MNP	HT	N, TBD	C, MRT	173 escolas, 15.788 alunos	Rio de Janeiro, Brasil

Fonte: Autor, 2018.

Dos 42 trabalhos identificados, o objetivo mais amplamente utilizado no SBRP é a minimização do tempo de viagem ou da distância total percorrida, presente em 76,2% dos estudos. Percebemos que no decorrer dos anos, 40,5% dos artigos focam na localidade rural, 69% não utilizam carregamento misto e 28,6% trabalham com frota heterogênea. No conjunto dos trabalhos analisados, apenas 4,7% abordam o SBRP no transporte escolar rural, sem carregamento misto e com frota heterogênea, sendo que nenhum propôs uma metodologia foco desta dissertação.

2.2 Métodos Computacionais para Resolução

O problema de roteamento de veículos escolares é um caso especial do problema de roteamento de veículos (MUSHI et al., 2015). O VRP envolve projeto de rotas de entrega e/ou coleta de custo mínimo, partindo de um ou mais depósitos para um número de clientes, sujeito a restrições adicionais (ARENALES et al., 2015).

As três características específicas do problema roteamento de veículos escolares que diferem puramente do problema de roteamento de veículos são descritas por Bektas e Elmastas (2007):

1. Os ônibus, em geral, não têm de voltar para a escola depois de completar o seu itinerário. Especificamente, eles podem terminar seu percurso em qualquer ponto diferente da origem;
2. O número total de estudantes transportados de cada ônibus não pode exceder a sua capacidade;
3. O comprimento (ou tempo) de cada percurso é limitado, uma vez que os alunos devem ser transportados para a escola antes de um período específico de tempo.

A estrutura da solução do problema de uma escola é semelhante à obtida nas variantes do VRP e pode ser solucionado por diferentes métodos (FU et al., 2005). Nesse sentido, realizamos um levantamento dos métodos mais frequentes a fim de guiar a decisão da escolha da ferramenta para resolver o SBRP.

A literatura, frequentemente, divide os métodos em três principais classes: Métodos Exatos, Métodos Heurísticos e Meta-Heurísticos. A Figura 2.2 mostra os principais algoritmos e suas respectivas abordagens na seções seguintes (ALVES, 2015; EL-SHERBENY, 2010).

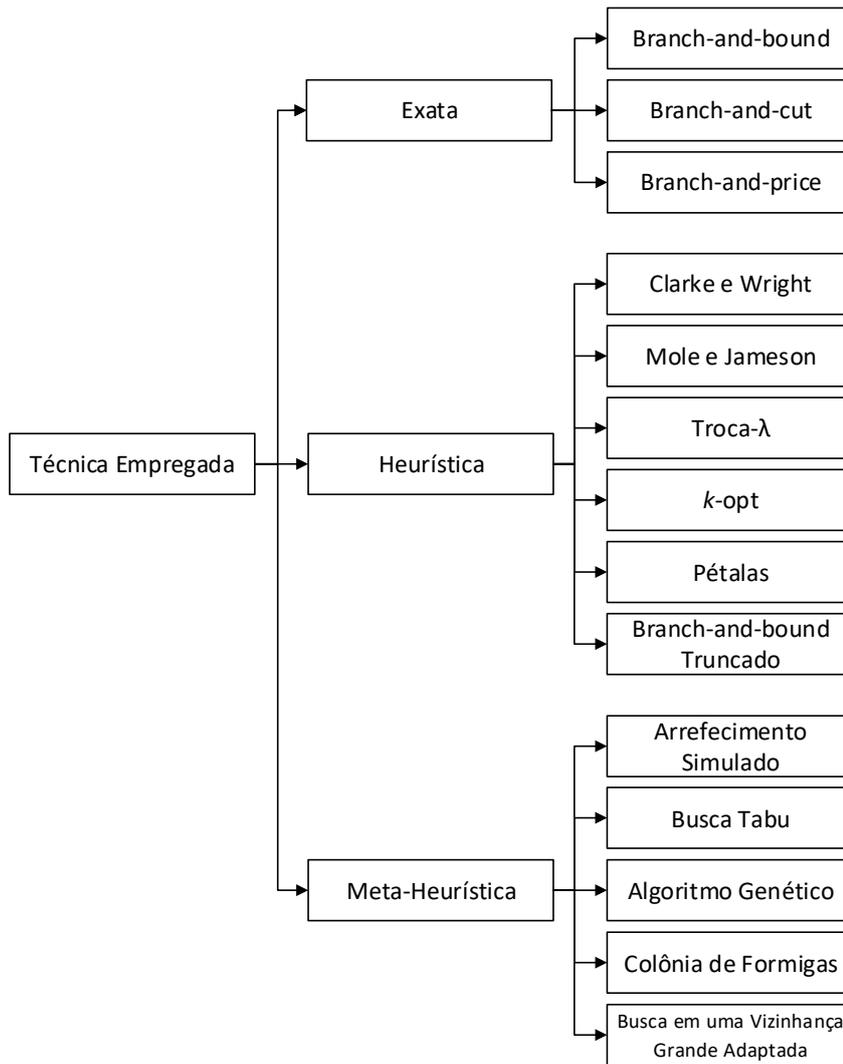


Figura 2.2: Métodos de solução do VRP

Fonte: Autor, 2018.

2.2.1 Métodos Exatos

Os métodos exatos são formas de varredura sobre um espaço de busca de soluções. A vantagem em se utilizar esses métodos é que o valor ótimo global sempre é encontrado (quando viável). Todavia, eles não pertencem a classe de problemas P . A classe P contém todos os problemas que podem ser resolvidos em tempo polinomial; isto é, a equação de tempo em função do número de entradas cresce de forma polinomial (CORMEN et al., 2009; SEDGEWICK; WAYNE, 2011). A seguir, são abordados alguns métodos exatos que são utilizados para resolver o VRP.

2.2.1.1

Branch-and-bound

O método *Branch-and-bound* consiste em solucionar problemas de otimização com restrições de variáveis inteiras. A ideia geral é criar ramificações de restrições a partir do problema inicial, de tal forma que essas restrições inviabilizem soluções fracionadas. O método constrói uma árvore de decisão com base em limites superiores e inferiores, evitando assim que algumas soluções ruins sejam exploradas. Esse método pode ser utilizado com outros métodos de programação linear, tal como o simplex (LAPORTE, 1992). O nome desse método surge da sua estratégia em criar restrições através de ramificações em uma árvore (*branch*) e cada ramo dessa árvore corresponder a uma restrição (*bound*) imposta ao problema original.

Há três formas para o método Branch-and-bound podar as ramificações:

1. O problema restrito é infactível;
2. A solução ótima do ramo é inteira;
3. O valor da solução do ramo é pior do que a melhor solução atual (solução incumbente).

Uma das primeiras aplicações do *Branch-and-bound* foi no problema do caixeiro viajante que serve como base para todos os problemas de roteamento de veículos. O problema do caixeiro viajante tenta encontrar uma rota cujo percurso seja o menor, e que percorra uma série de cidades, mas que retorne para a cidade de origem. O problema está dentro da classe *NP-Difícil* e a classe *NP* é definida como todos os problemas de decisão que podem ser resolvidos em tempo polinomial. Uma observação importante a ser feita é que $P \subseteq NP$, uma vez que se um problema pode ser solucionado em tempo polinomial, certamente ele pode ser verificado em tempo polinomial. Por outro lado, os problemas são todos aqueles que ainda não podem nem ser verificados em tempo polinomial (CORMEN et al., 2009; SEDGEWICK; WAYNE, 2011).

2.2.1.2

Branch-and-cut

O *Branch-and-cut* é uma melhoria do algoritmo *Branch-and-bound*. Nele, a estratégia adotada é resolver cada problema relaxado (sem restrições de integralidade) do *Branch-and-bound* e resolvê-lo utilizando a técnica de planos de corte. Assim que a técnica de Planos de Corte termina, se a solução ótima do subproblema obedecer às restrições de integralidade ou se o limitante inferior for maior que uma solução já conhecida, o nó é descartado e um próximo nó é

analisado. Contudo, se não for possível encontrar uma inequação válida para o problema de separação, aplica-se a ramificação (LYSGAARD et al., 2004).

2.2.1.3

Branch-and-price

Quando se tem um problema de otimização com variáveis integrais, e considerando todas as variáveis do problema simultaneamente, pode ser muito custoso aplicar as técnicas anteriores. Desse modo, uma técnica chamada de Geração de Colunas foi criada com o intuito de resolver esses problemas, considerando uma porção menor de variáveis. A técnica de geração de colunas seleciona as variáveis com o maior potencial para otimizar o problema.

O método *Branch-and-price* é um método *Branch-and-bound* que utiliza a técnica de geração de colunas em cada nó da árvore de decisão. Na literatura, alguns trabalhos como Martinelli (2012) e Ozbaygin et al. (2017) utilizaram esta técnica com o objetivo de solucionar o VRP. Mais detalhes sobre essa técnica podem ser obtidos em Desaulniers et al. (2005).

2.2.2

Métodos Heurísticos

Nesta seção serão apresentados alguns métodos heurísticos utilizados para resolver o VRP. Conforme descrito anteriormente, esses métodos não garantem que a solução encontrada seja ótima. Contudo, espera-se que eles tenham uma solução próxima à ótima em um tempo computacional polinomial.

2.2.2.1

Clarke e Wright

A heurística de Clarke e Wright (1964) baseia-se no processo de junção de duas rotas e no cálculo de economia a partir dessas junções. Assim, dadas duas rotas $(0, \dots, i, \dots, 0)$ e $(0, \dots, j, \dots, 0)$, a heurística irá computar a economia de uma nova rota $(0, \dots, i, j, \dots, 0)$ através da Equação (2-1), resultado da concatenação entre as duas rotas.

$$s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij} \quad (2-1)$$

Há duas versões para o algoritmo: paralelo e sequencial. O algoritmo pode ser descrito através dos seguintes passos:

– **Etapa 1 (cálculo de economia):**

Compute as economias de rotas tomando a Equação 2-1 como base para $i, j = 1, \dots, n$ e $i \neq j$. Crie n novas rotas $(0, i, 0)$ para $i = 1, \dots, n$. Ordene as economias de forma decrescente.

– **Etapa 2 (versão paralela / melhor junção viável):**

Varra a lista de economias na ordem e detecte um par de rotas de tal forma que uma rota contenha a aresta $(0, j)$ e outra contenha a aresta $(i, 0)$. Se a junção das duas rotas for viável, então delete $(0, j)$ e $(i, 0)$, e adicione a aresta (i, j) .

– **Etapa 2 (versão sequencial / extensão de rota):**

Considere cada rota $(0, i, \dots, j, 0)$ e encontre a melhor economia s_{ki} ou s_{jl} que pode ser utilizada para unir com outra rota contendo a aresta $(k, 0)$ ou contendo a aresta $(0, l)$. Junte as rotas e repita o processo na nova rota gerada. Se não há mais possibilidade de união, reaplique o processo na próxima rota.

De acordo com Laporte et al. (2000), experimentos empíricos revelaram que a versão paralela apresenta melhores resultados em relação à versão sequencial.

Outro ponto importante a destacar é que a complexidade desse método é relativamente baixa, da ordem de $\mathcal{O}(n^2)$, o que viabiliza bastante seu uso (HEINEN, 2006).

2.2.2.2

Mole e Jameson

Um ponto negativo da heurística de *Clarke and Wright* é que somente os nós extremos de uma rota são considerados para expandí-la. Na heurística de Mole e Jameson, os nós internos são considerados no processo de expansão. A primeira etapa do algoritmo que utiliza essa heurística é criar uma rota para cada ponto que não pertence a qualquer rota (exceto o nó do depósito). Posteriormente, um nó é selecionado seguindo algum critério para ser inserido na rota inicial, por exemplo, o nó livre mais próximo do depósito. Após esta etapa, ocorre um processo iterativo na qual novos nós são adicionados às rotas. A seleção de um novo nó livre para uma rota é dada através de duas métricas: proximidade e economia.

O critério de proximidade seleciona o nó que está mais próximo à rota atual através da Equação (2-2).

$$\alpha(i, k, j) = c_{ik} + c_{kj} - \lambda c_{ij} \quad (2-2)$$

Nesta equação, λ é um parâmetro que pondera a penalidade da adição da aresta (i, j) e alguns trabalhos como Goldbarge e Luna (2005) utilizam $\lambda = 2$.

Já o critério de economia busca avaliar qual o melhor local para o novo nó ser adicionado e é calculado segundo a Equação (2-3).

$$\beta(i, k, j) = \mu c_{0k} - \alpha(i, k, j) \quad (2-3)$$

Nesta equação, μ é um fator de ponderação sobre a distância do nó selecionado e o depósito. O nó que tiver a maior economia será adicionado à rota atual.

É importante destacar que a heurística de *Mole e Jameson* é uma melhoria da heurística de *Clarke e Wright* e a literatura, frequentemente, aponta que essa heurística apresente melhores resultados em relação a de *Clarke e Wright* (HEINEN, 2006).

2.2.2.3

Troca- λ

A heurística Troca- λ foi proposta inicialmente por Osman (1993) e baseia-se no processo de trocar trechos de rotas entre um par de rotas. Assim, considere um conjunto de rotas viáveis $S = \{R_1, \dots, R_p, \dots, R_q, \dots, R_v\}$ em que R_i é o conjunto de vértices visitado por uma rota i . A heurística proposta seleciona um subconjunto $S_1 \subseteq R_p$ e outro subconjunto $S_2 \subseteq R_q$ gerando duas novas soluções:

$$R'_p = (R_p \setminus S_1) \cup S_2$$

$$R'_q = (R_q \setminus S_2) \cup S_1$$

As duas novas rotas são então integradas a um novo conjunto de solução $S' = \{R_1, \dots, R'_p, \dots, R'_q, R_v\}$.

Duas estratégias principais são utilizadas para encontrar um novo conjunto S' : processo de troca e processo de permuta. O processo de troca escolhe um vértice de uma rota e o reposiciona em uma rota vizinha. O processo de permuta itera sobre todos os vértices de uma rota e localiza o vizinho mais próximo. Se esse vizinho não fizer parte da rota inicial, eles são permutados. Caso contrário, segue a heurística para o próximo vértice da rota inicial.

2.2.2.4

k -opt

O k -opt foi originalmente desenvolvido para resolver o problema do Caixeiro Viajante. A ideia geral é melhorar uma rota a partir da remoção de k arestas e inserção k arestas testando exaustivamente todas as possibilidades. Dada o espaço de busca para todas as possibilidades, este algoritmo é da ordem de $\mathcal{O}(n^k)$ em que n é o número de vértices. Assim, para valores baixos de k ele é aceitável. Esta técnica também é, frequentemente, utilizada na literatura

com valores de $k = 2$ ou $k = 3$ (ALVES, 2015). A Figura 2.3 ilustra o processo de troca exaustiva para a melhoria de uma rota.

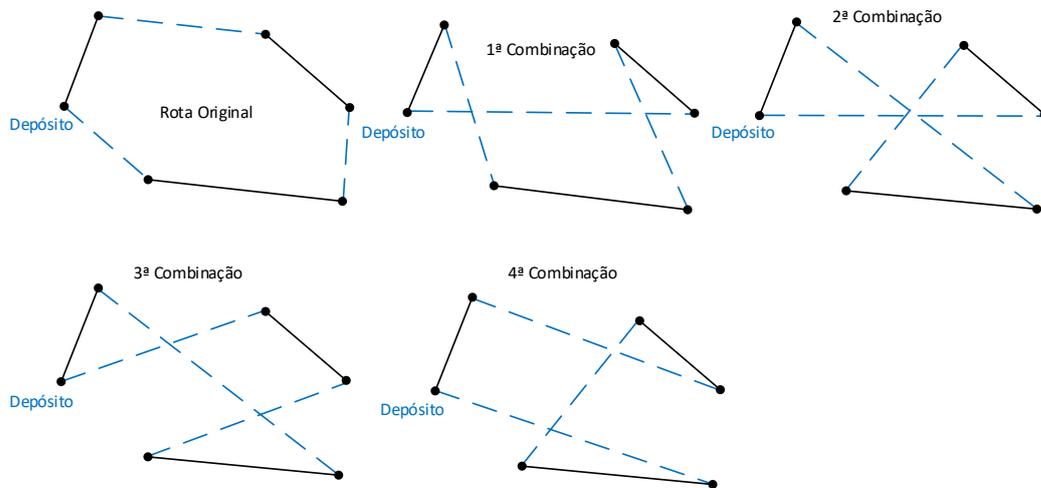


Figura 2.3: Combinações para melhoria de rota utilizando 3-opt
 Fonte: Autor, 2018.

2.2.2.5 Pétalas

Esta heurística foi proposta inicialmente em Foster e Ryan (1976) para resolver o VRP. Seu nome vem de seu próprio método heurístico, em que uma solução do problema é vista como uma “flor” e cada rota dessa solução como uma pétala. A ideia é gerar agrupamentos de vértices para formar uma “pétala” e, posteriormente, encontrar uma combinação de pétalas para gerar a solução final.

O modelo matemático por detrás dessa solução é descrito pelas Equações (2-4).

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{k \in S} d_k x_k \\
 \text{sujeito a:} \quad & \sum_{k \in S} a_{ik} x_k = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n \\
 & x_k \in \{0, 1\} \quad \forall k \in S
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

Nesse sistema, d_k é o custo petal k , $x_k = 1$, se estiver a rota x na solução, $a_{ik} = 1$, se estiver o vértice i na rota k e S é o conjunto de rotas que farão parte da formação da "flor" (solução final).

Apesar da modelagem proposta ser interessante, o problema apenas muda de domínio, mas ainda sim é custoso quando o número de rotas em S é grande.

Outras propostas sucederam à original, tal como em Renaud et al. (1996), capaz de encontrar conjuntos de rotas sobrepostas.

2.2.2.6

Branch-and-bound Truncado

O método *Branch-and-bound* Truncado parte do mesmo processo do *Branch-and-bound* (veja Seção 2.2.1.1). Contudo, em vez de explorar todas as ramificações, um diâmetro de busca é estabelecido para a exploração dos próximos níveis. A decisão sobre os ramos que serão escolhidos para a ramificação é feita com base em uma métrica, de tal forma que os ramos com maior potencial para exploração sejam selecionados (ZHANG, 1993).

Uma vez que cada nível é explorado considerando a mesma largura, este processo consome tempo linear, permitindo que o algoritmo seja polinomial. Por outro lado, se um ramo “promissor” deixa de ser selecionado, soluções consideradas “boas” podem não ser varridas pelo processo.

2.2.3

Meta-Heurísticas

As Meta-Heurísticas são heurísticas que podem ser aplicadas a quaisquer problemas de otimização. Isto é, elas são estratégias genéricas que podem ser adaptadas para resolver um problema específico. Na literatura, podem-se encontrar inúmeras Meta-Heurísticas, muitas delas são inspiradas em fenômenos naturais como teoria Darwiniana, enxame de abelhas, colônias de formigas, descida de encosta, vagalumes, entre muitas outras. Nessa seção, serão apresentadas algumas Meta-Heurísticas que já foram utilizadas para resolver o VRP.

2.2.3.1

Arrefecimento Simulado

No Arrefecimento Simulado, utiliza-se uma analogia com sistemas térmicos; isto é, o método inicia-se com uma solução s qualquer e encontra um vizinho s' . É então computado um valor de ganho $\Delta = f(s') - f(s)$. Três situações podem ocorrer com relação a Δ (ALVES, 2015):

1. $\Delta < 0$: O novo vizinho é melhor que a solução anterior. Então, considere $s = s'$;
2. $\Delta = 0$: O novo vizinho é tão bom quanto o anterior;

3. $\Delta > 0$: O novo vizinho não é melhor que a solução anterior. Então, um sorteio probabilístico baseado na temperatura do sistema irá decidir se s' será aceito ou não.

É importante destacar que a técnica inicia-se com temperatura elevada, o que faz com que a aceitação de s' seja mais provável. Após a etapa de decisão, uma nova iteração é feita. À medida que as iterações avançam, a temperatura decresce seguindo a Equação (2-5). É comum utilizar a Equação (2-6) como probabilidade de aceitação da solução s' . Essas iterações acontecem até que a temperatura seja próxima a zero e nenhum problema poderá ser mais aceito.

$$t_{t+1} = \alpha.t \quad \text{com } 0 < \alpha < 1 \quad (2-5)$$

$$s_{t+1} = \begin{cases} s' & \text{com probabilidade } e^{\left(\frac{f(s')-f(s)}{\theta_t}\right)} \\ s & \text{com probabilidade } 1 - e^{\left(\frac{f(s')-f(s)}{\theta_t}\right)} \end{cases} \quad (2-6)$$

2.2.3.2

Busca Tabu

A Busca Tabu é um processo de enumeração de soluções que, a partir de uma solução inicial x , o melhor vizinho é escolhido para ser visitado. Seu nome vem do fato de que as soluções recentemente encontradas são armazenadas em um conjunto. Por meio desse conjunto, é possível evitar uma varredura cíclica entre os vizinhos, evitando também que um mínimo local seja explorado mais de uma vez. As soluções que fazem parte desse conjunto restritivo são denominadas de Tabu (GENDREAU et al., 1994).

2.2.3.3

Algoritmo Genético

Segundo Gendreau e Potvin (2010), algoritmos genéticos são algoritmos que se baseiam na teoria do neo-Darwinismo de evolução; ou seja, fazem uso de ideias como mutação, seleção e sobrevivência do indivíduo mais forte. Além disso, o autor afirma que o objetivo básico desses algoritmos é otimizar uma função de avaliação executada em cada solução (hipótese) proposta.

O método de otimização utilizado por algoritmos genéticos é a evolução, conhecida por sua robustez quando implementadas em sistemas biológicos (MITCHELL, 1997). Através desse método é possível conseguir uma solução ótima com um menor custo de processamento do que em outros tipos de algoritmos.

Como ilustra a Figura 2.4, o algoritmo genético inicialmente cria uma população aleatória composta por indivíduos válidos para a solução do problema

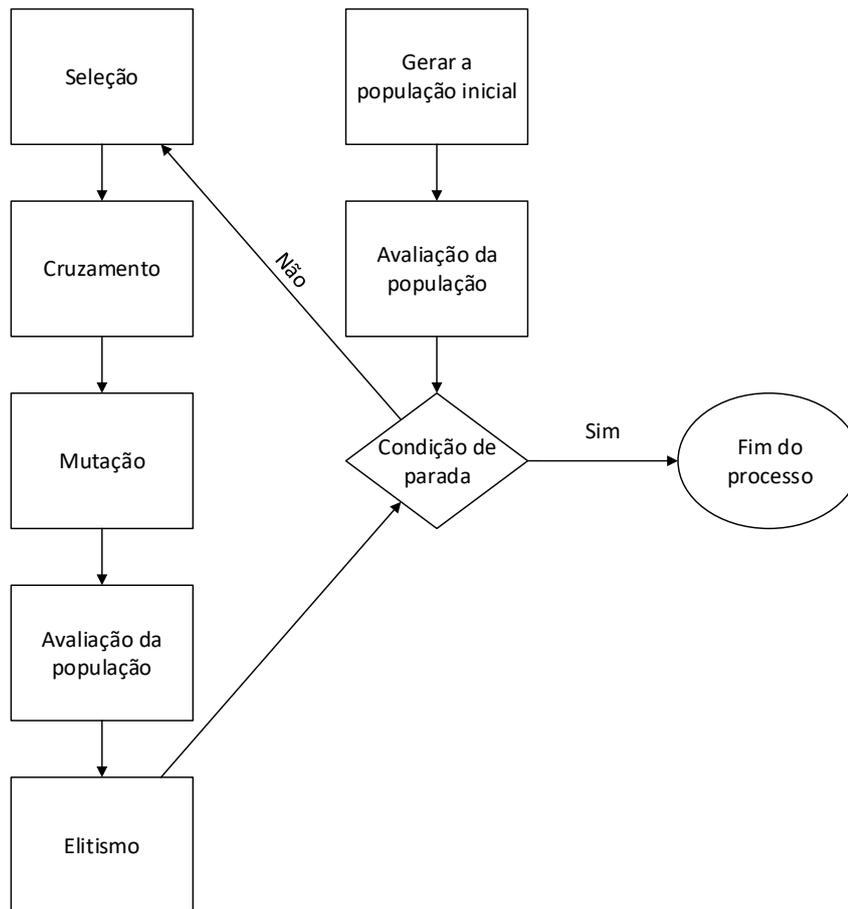


Figura 2.4: Fluxograma do funcionamento de um algoritmo genético.

Fonte: Autor, 2018.

e em seguida são avaliadas por uma função matemática que irá ranquear os indivíduos com notas baseados nos dados de tratamento do algoritmo (MITCHELL, 1997).

Em seguida, o algoritmo se mantém em um laço de gerações até que uma determinada condição de parada seja atingida e a execução do algoritmo interrompida. Tal laço é composto das seguintes etapas:

Seleção: são escolhidos aleatoriamente pares de indivíduos para formar a nova geração;

Cruzamento (*Crossover*): conjunto de elementos (genes) de dois indivíduos se interagem para formarem dois novos indivíduos;

Mutaçao: altera um ou mais componentes de uma estrutura escolhida tendo uma chance de parte dos indivíduos gerados sofrer uma alteração não presente em nenhum dos indivíduos que a criou;

Avaliação: a função de avaliação classifica cada novo indivíduo gerado;

Elitismo: uma quantidade de determinados indivíduos bem avaliados é selecionada para que esses indivíduos permaneçam inalterados entre as gerações e também para garantir que não aconteça quedas nas notas durante a execução do algoritmo.

Existem diversas formas de efetuar o Cruzamento e a Mutação. A escolha pelos diferentes métodos é feita com base no próprio problema que se deseja solucionar. Para o VRP, frequentemente utiliza-se o Cruzamento Ordenado e a Mutação por Permutação (VAIRA, 2014).

2.2.3.4

Colônia de Formigas

Na natureza, o comportamento das formigas segue um padrão bem definido. Inicialmente, as formigas saem de suas colônias aleatoriamente em busca de alimentos. Durante suas caminhadas, elas liberam feromônios que deixam seu rastro pelo terreno. Sempre que uma formiga encontra alimento, outras formigas utilizarão o caminho descoberto e reforçarão a trilha de feromônio, atraindo a atenção para mais formigas.

Contudo, os feromônios são voláteis e apagam as trilhas das formigas se elas não reforçarem o caminho. Esse comportamento faz com que novos caminhos sejam explorados com o passar do tempo.

A Meta-Heurística Colônia de Formigas parte do mesmo princípio, variando de forma singular para cada problema. A ideia geral é associar um valor de visibilidade e feromônio para cada aresta do grafo proposto. Inicialmente, as formigas escolhem caminhos com mais feromônios e que tenham vizinhos mais próximos. No final de cada iteração, os feromônios são atualizados. Esse processo se repete até que um número de iteração seja alcançado (COLORNI et al., 1991).

2.2.3.5

Busca em uma Vizinhança Grande Adaptada

Esta meta-heurística é muito semelhante à apresentada em Shaw (1998), de nome *Large Neighborhood Search*. A busca em uma vizinhança grande é composta por duas etapas: destruição e reparação. A ideia é partir de uma solução inicial S ao VRP, destruí-la e repará-la de maneira a gerar uma nova solução S' . Esse processo pode ser executado em conjunto com a Meta-Heurística de Arrefecimento Simulado. O processo de destruição e reparação

utilizam um conjunto de heurísticas. É importante destacar que esse conjunto de heurísticas está fortemente relacionado ao problema que se deseja resolver. Assim, diferentes domínios podem requerer heurísticas diferentes.

No caso específico do VRP pode-se citar as seguintes heurísticas de destruição: Aleatória, Shaw baseada em função objetivo, Shaw baseada em distâncias, remoção do pior. Como heurísticas de reparação, pode-se citar: Guloso, Guloso Aleatório, Guloso Míope, *K-Regret* entre muitos outros que a literatura propõe. Uma descrição mais detalhada das heurísticas utilizadas para VRP podem ser encontradas em Vieira (2017).

A diferença entre a heurística original proposta por Shaw (1998) e a adaptada, proposta por Ropke e Pisinger (2006), é que a versão adaptada considera uma probabilidade para a escolha do método de destruição e reparação com base em seu desempenho passado. O Algoritmo 2.1 descreve a meta-heurística.

Algoritmo 2.1: Busca em uma vizinhança grande adaptada

```

1 início
2   Construa uma solução inicial  $x$ 
3    $x^* \leftarrow x$ 
4   repita
5     Encontre uma vizinhança para ser destruída e reparada
6     através das heurísticas escolhidas pelo processo da roleta
7     com base em seus desempenhos passados  $\{\pi_j\}$ 
8     Gere uma nova solução  $x'$  a partir de  $x$  usando as heurísticas
9     escolhidas
10    se  $x'$  pode ser aceito então
11      |  $x \leftarrow x'$ 
12    fim
13    Atualize os desempenhos das heurísticas  $\{\pi_j\}$ 
14    se  $f(x) < f(x^*)$  então
15      |  $x^* \leftarrow x$ 
16    fim
17    retorna  $x^*$ 
18  até que se atinja o critério de parada;
19 fim

```

Para o caso dessa pesquisa, conforme será descrito no decorrer da descrição da metodologia proposta, o algoritmo da Vizinha Grande Adaptada será utilizado para a resolução do problema do VRP, através da ferramenta VRP Solver Spreadsheet. A escolha se baseia na afirmação de Erdogan (2017) de que o algoritmo ALNS tem se apresentado o mais bem sucedido na solução do VRP

2.3

Sistemas de Informação Geográfica

Os Sistemas de Informação Geográfica, usam ferramentas de hardware e software para coletar, exibir, analisar, gerenciar e armazenar dados geográficos. Essas ferramentas oferecem recursos de visualização robustos em várias escalas geográficas, fornecem aos usuários mapeamentos de múltiplas camadas, análise espacial e recursos de modelagem de padrões, e muitas vezes fornecem recursos de personalização que suportam soluções únicas e específicas (SPACE; ATLANTIC, 2013).

GIS's são ferramentas valiosas para o planejamento de transportes, tanto pela quantidade de informações que conseguem manipular, como pela sua interface gráfica que permite uma visualização dos problemas a serem resolvidos e das soluções alternativas. Alguns GIS's incorporam algoritmos para a resolução de problemas logísticos, como o roteamentos de veículos, e permitem a inserção de novas funcionalidades através de linguagens de programação (PRATA, 2009).

Os GIS's projetados para uso em transportes se constituem uma boa ferramenta de auxílio à decisão para o planejamento das rotas. O uso de GIS para o trânsito tornou-se assunto de interesse para os planejadores de transportes e pesquisadores desde a última década até agora (BACHOK et al., 2017).

O GIS também pode ser utilizado na criação de plataformas que possibilitam o fornecimento contínuo para o público. Park e Kim (2016) utilizaram um GIS na criação de uma plataforma aberta para divulgar dados da indústria da construção. Butt et al. (2016) desenvolveram um protótipo para que *stakeholders* e leigos possam acessar informações de qualquer conjunto habitacional de acordo com suas necessidades e interesses.

Durante o desenvolvimento da metodologia deste trabalho, foram utilizados dados do Google Maps e OpenStreetMap, por possibilitar acesso a uma grande quantidade de informações. Estes dados foram trabalhados no QGIS, pois confere melhor flexibilidade na visualização. Cada finalidade destas ferramentas são conceituadas a seguir:

Google Maps: é uma plataforma que permite ao usuário visualizar e usar diversos conteúdos, incluindo dados do mapa e do terreno, imagens, fichas de empresas, trânsito, avaliações e outras informações relacionadas fornecidas pela Google, seus licenciados e usuários (GOOGLE, 2015).

OpenStreetMap: é uma plataforma que contempla o mapa mundial para uso livre sob uma licença aberta. É desenvolvido por uma comunidade voluntária de mapeadores que contribuem e mantêm atualizados os dados sobre estradas, trilhos, cafés, estações ferroviárias e muito mais por todo o mundo (BENNETT, 2010; OPENSTREETMAP, 2018).

QGIS: é um Sistema de Informação Geográfica de código aberto licenciado segundo a Licença Pública Geral GNU. É um projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Funciona em Linux, Unix, Mac OSX, Windows e Android e suas funções permitem criar, editar, visualizar, analisar e publicar informações geoespaciais (QGIS, 2015).

3 Metodologia

O capítulo anterior apresenta a fundamentação teórica necessária para o entendimento da problemática do SBRP. A complexidade do processo todo exige a sistematização de cada etapa e sua automatização. Por isso, este capítulo propõe uma metodologia para o roteamento do transporte escolar com objetivo de minimizar o custo de viagem.

Neste intuito, a proposta é composta por 8 etapas e tem como base um problema empírico e os estudos elencados na Seção 2.1. A Figura 3.1 ilustra a estrutura geral da metodologia, onde cada fase será detalhada e discutida nos tópicos seguintes.

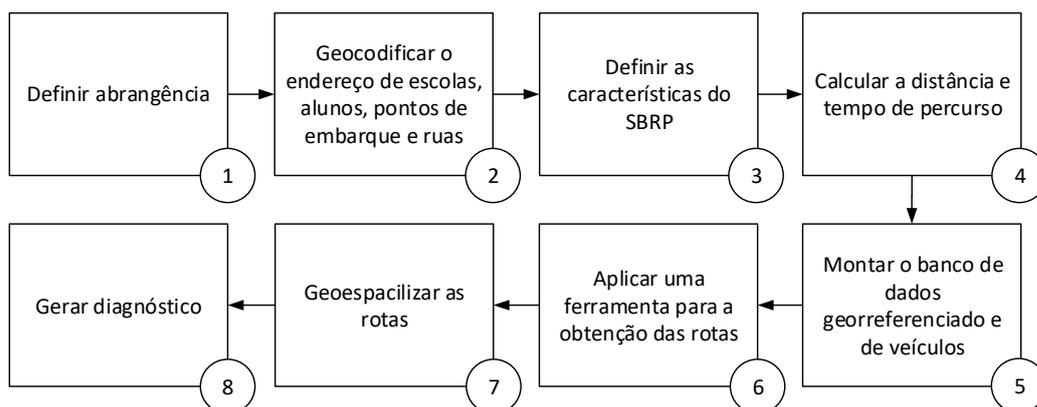


Figura 3.1: Fases da metodologia
Fonte: Autor, 2018.

3.1 Abrangência

A primeira fase consiste em definir a área geográfica do estudo. As delimitações da região variam de acordo com a abrangência e o objetivo da pesquisa. No SBRP, a abrangência encontrada na literatura e descrita na revisão da Tabela 2.1, se limita a Escolas, Turnos, Bairros, Distritos, Municípios ou Estados. A Figura 3.2 ilustra a sequência de delimitações que podem ocorrer nesta fase ou no decorrer das próximas etapas a fim de atingir o objetivo preterido.

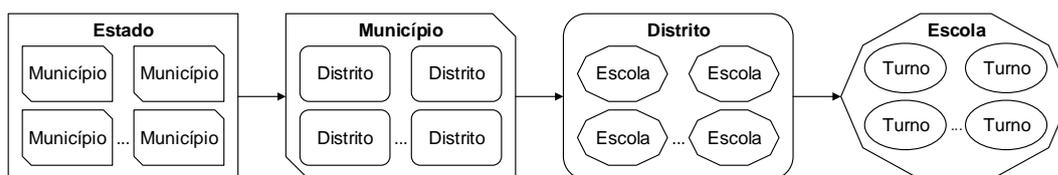


Figura 3.2: Região de aplicação do SBRP

Fonte: Autor, 2018.

3.2 Geocodificação

Nesta etapa, são mapeadas as vias urbanas e são definidas as coordenadas geográficas das escolas, dos pontos das residências e/ou pontos de embarque dos alunos através da geocodificação. Esta técnica é o processo de converter endereços (como nome da rua e número) em coordenadas geográficas (latitude e longitude) que permitem a inserção de marcadores de local em um mapa ou o posicionamento do mapa (GOOGLE DEVELOPERS, 2017).

As identificações das coordenadas geográficas podem ser realizadas usando serviço de API (*Application Protocol Interface*) ou sistemas de informações geográficas. A interface pode ser através do navegador de internet, algoritmos de programação ou aplicativos. As principais ferramentas que disponibilizam estes dados na internet são ArcGIS, Autocad Maps, Bing, Google Maps, OpenStreetMAP e QGIS (SZTUTMAN, 2014; JÚNIOR et al., 2017).

A busca da latitude e longitude pode ser realizada com um conjunto de endereços utilizando linguagem de programação ou uma por vez através da interface do navegador de internet. Nesta fase, optou-se pela utilização do serviço do Google Maps. A ferramenta possibilita a replicação do estudo em qualquer localidade do mundo e disponibiliza um serviço gratuito podendo ser estendido para assinantes.

O serviço do Google Maps Geocoding API permite a conversão entre endereços e coordenadas geográficas através do navegador de internet e de linguagem de programação (como por exemplo Java, Python, Go, Node.js, entre outros). Diariamente até 2.500 consultas do serviço podem ser realizadas gratuitamente. Após essa quantidade e existindo novas consultas, é cobrado 50 centavos de dólar para cada 1.000 consultas.

Nas subseções seguintes, são descritas as instruções para a busca de um endereço alvo por vez utilizando o navegador de internet. Em seguida, é detalhada a busca de um conjunto de locais utilizando a linguagem de programação Python.

3.2.1 Busca Através do Navegador

As coordenadas geográficas de um local a partir do site do Google Maps são obtidas uma por vez de duas formas. Primeiro, quando o endereço disponível é encontrado pelo sistema e, segundo, quando não é encontrado sendo necessário realizar uma marcação no mapa. A fim de detalhar ao leitor o passo-a-passo, o Apêndice A contempla um manual com as instruções de como coletar latitude e longitude em ambos os casos.

Utilizando o Google Maps Geocoding API através do navegador de internet é possível acessar as coordenadas geográfica. A consulta retorna um resultado no formato JSON (*JavaScript Object Notation*), que se refere um documento em uma formatação de troca de dados. A figura 3.3 ilustra um exemplo do resultado desta consulta.

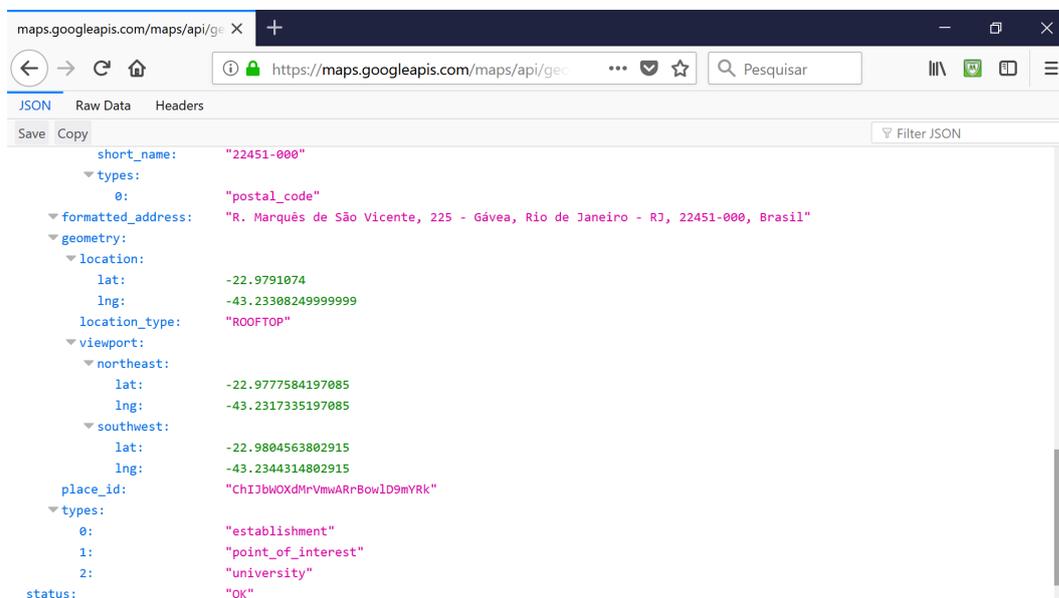


Figura 3.3: Resultado da pesquisa do Google Maps Geocoding API
Fonte: Autor, 2018.

Nesse exemplo, são procuradas as coordenadas geográficas da PUC-Rio. O teste pode ser realizado inserindo o endereço no navegador <<https://maps.googleapis.com/maps/api/geocode/json?address=PUC+RIO>>. A resposta inclui o resultado -22.9791074 e -43.23308249999999, respectivamente, a latitude e a longitude.

3.2.2 Busca Através de Linguagem de Programação

A consulta no Google Maps Geocoding API, por meio de um conjunto de endereços dos alunos, pontos de embarque e/ou das escolas, é possível

mediante a utilização de programação. Desta maneira, foi desenvolvida uma ferramenta em Python que busca e salva as coordenadas geográficas automaticamente registradas em um arquivo de *Excel*. O Algoritmo 3.1 foi comentado passo-a-passo para que o leitor acompanhe o desenvolvimento.

```
1 #Geocodificar Pontos
2 #Importar o módulo do Google Maps API e o Pandas como pd
3 import googlemaps
4 import pandas as pd
5
6 #É necessário possuir uma chave para utilizar a API, essa
   informação é declarada aqui
7 gmaps = googlemaps.Client(key='')
8
9 #São definidas as colunas existentes no arquivo Excel que é
   utilizado como banco de dados
10 colunas = ['ID', 'LOCAL', 'LAT', 'LNG']
11 #Cria-se uma matriz no Python 3, utilizando o módulo pandas,
   com as mesmas colunas do arquivo Excel
12 matriz = pd.DataFrame(columns=colunas)
13
14 #A matriz do Excel é importada no Python com o nome locais
15 locais = pd.read_excel('arquivos/entrada.xlsx')
16
17 #Para cada linha na matriz importada (que possui as informações
   dos locais) é realizado a pesquisa utilizando o serviço do
   Google Maps API
18 for index, linha in locais.iterrows():
19     try:
20         geocode_result = gmaps.geocode(linha['LOCAL'])
21         local = geocode_result[0]['geometry']['location']
22         lat = local['lat']
23         lng = local['lng']
24         info_temp = [linha['ID'], linha['LOCAL'], lat, lng]
25         print(info_temp)
26 #Em caso de erro, o campo com a informação é deixado em
   branco
27     except:
28         info_temp = [linha['ID'], linha['LOCAL'], '', '']
29
30 #As informações são gravadas em uma matriz no Python 3 para
   posteriormente ser exportado para o Excel
31 temp = pd.DataFrame([info_temp], columns=colunas)
32 matriz = matriz.append(temp, ignore_index=True)
33
```

```
34 #Todas as informações são salvas no arquivo saida.xlsx na aba
    MATRIZ
35 escrever = pd.ExcelWriter('arquivos/saida.xlsx')
36 matriz.to_excel(escrever, 'MATRIZ', index=False)
37 escrever.save()
```

Algoritmo 3.1: Geocodificação

Fonte: Autor, 2018.

3.3

Característica

Muitos problemas reais envolvem o SBRP, assim, o aumento dos estudos sobre o tema levou a um uso de terminologias para definir as suas diferentes classes (LIMA, 2015). O levantamento das características, seja em ambiente rural ou urbano, é importante para garantir aos alunos o acesso à escola.

Cada região possui uma determinada demanda de transporte a ser atendida de acordo com o número de escolas, de alunos e de turnos. Alguns outros aspectos são relacionados diretamente aos problemas de transporte, como por exemplo, carregamento misto entre escolas, transporte de alunos especiais, tipo de frota, entre outros.

Para que seja caracterizado o problema de forma eficiente, a definição da abrangência e os resultados da geocodificação precisam ser analisados conjuntamente. Normalmente, utilizam-se sistemas de informação geográfica para facilitar a interpretação e as definições, de forma auxiliar. Assim, as características de cada região e os parâmetros técnicos são levados em consideração.

Pela aproximação à realidade e para melhor classificação a partir da perspectiva do problema, a Seção 2.1.2 sintetiza os aspectos práticos utilizados na maioria das soluções voltadas aos problemas do SBRP. Nesse sentido, recomenda-se o entendimento do problema em questão, a fim de obter as características de cada critério, conforme ilustrado na Tabela 2.1.

3.4

Distância e Tempo

Esta fase compreende encontrar a distância e o tempo de percurso para uma matriz de Origem e Destino (OD). Para as distâncias, as opções de cálculos são Distâncias Euclidiana, Distâncias Geodésica ou Distâncias Real. Para o cálculo do tempo de percurso nos casos que forem considerados as distâncias Euclidiana e Geodésica, o resultado encontrado é dividido pela velocidade média desejada. Já o tempo real é dado de acordo com o tempo de viagem estimado de um carro com base na velocidade e restrições do caminho.

3.4.1

Distância Estimada

As distâncias euclidiana e geodésica podem ser estimadas sem considerar as características das vias. A diferença é que o cálculo euclidiano não considera a curva da terra, assim, o percurso não respeita o plano terrestre, uma vez que em alguns casos seria necessário realizar o deslocamento por dentro da terra. Além disso, a distância euclidiana considera que o globo pode ser representado por um plano cartesiano e com isso não considera o erro de proporção que existe para essa interpretação. Já o cálculo geodésico mede o menor caminho entre dois pontos considerando a curvatura da terra.

A diferença da distância euclidiana para a geodésica aumenta quanto maior for a distância entre os pontos, e para pequenos deslocamentos a diferença é relativamente pequena. Na sequência, descrevemos a equação de cada método.

Distância Euclidiana: é a mais simples de ser obtida. A estimativa da distância de menor caminho entre a origem e o destino é considerada através de uma reta. A Equação 3-1 refere-se à fórmula para o cálculo da distância euclidiana.

$$\text{Distância Euclidiana} = \sqrt{(\text{Lat}_1 - \text{Lat}_2)^2 + (\text{Lon}_1 - \text{Lon}_2)^2} \quad (3-1)$$

Distância Geodésica: a fórmula para unir dois pontos considerando a curva do globo terrestre é descrita na Equação 3-2.

$$PI = 3.14159265358979$$

$$\text{RadiusEarthKM} = 6370.97327862$$

$$\text{Lat}_1 = (\text{Lat}_1/180) * PI$$

$$\text{Lat}_2 = (\text{Lat}_2/180) * PI$$

$$\text{Lon}_1 = (\text{Lon}_1/180) * PI$$

$$\text{Lon}_2 = (\text{Lon}_2/180) * PI$$

$$\text{DistanciaGeodesicaAproximada} =$$

$$(\text{RadiusEarthKM} * (2 * \text{ArcSin}(\text{Sqr}((\text{Sin}((\text{Lat}_1 - \text{Lat}_2)/2)^2) + \text{Cos}(\text{Lat}_1) * \text{Cos}(\text{Lat}_2) * (\text{Sin}((\text{Lon}_1 - \text{Lon}_2)/2)^2)))))) \quad (3-2)$$

Os cálculos para obtenção da distância entre os locais podem ser realizados manualmente, todavia, realizar um por um para um determinado número de conjuntos de dados levará um certo tempo. Sendo assim, foi elaborado o Al-

goritmo 3.2, em Python, para automatizar o cálculo das Distâncias Euclidiana e Geodésica.

A utilização do código necessita das coordenadas geográficas de origem e destino em arquivos independentes de *Excel*. Desta forma, a ferramenta será executada e os dados exportados para um novo arquivo.

```

1 #Distância Euclidiana e Geodésica
2 #É preciso importar o módulo do Pandas
3 import pandas as pd
4 import math
5
6 #Informamos que existe um arquivo para os locais de origem e de
  destino
7 origem = pd.read_excel('arquivos/origem.xlsx')
8 destino = pd.read_excel('arquivos/destino.xlsx')
9
10 #Informamos as colunas do arquivo que será gerado
11 colunas = ['ID_ORIGEM', 'ID_DESTINO', 'EUCLIDIANA', 'GEODESICA']
12
13 matriz = pd.DataFrame(columns=colunas)
14
15 raio_km = 6370.97327862
16
17 #Iniciamos o loop para realizar as interligações
18 for index, l_origem in origem.iterrows():
19     for index, l_destino in destino.iterrows():
20         lat1 = l_origem['LAT_ORIGEM']
21         lng1 = l_origem['LNG_ORIGEM']
22         lat2 = l_destino['LAT_DESTINO']
23         lng2 = l_destino['LNG_DESTINO']
24         r_lat1 = (lat1/180) * math.pi
25         r_lng1 = (lng1/180) * math.pi
26         r_lat2 = (lat2/180) * math.pi
27         r_lng2 = (lng2/180) * math.pi
28         #Distância Euclidiana
29         dis_euclidiana = math.sqrt((lat1 - lat2) ** 2 + (lng1 -
30         lng2) ** 2) * 100000
31         #Distância Geodesica
32         dis_geodesica = ((2 * math.asin(math.sqrt((math.sin((
33         r_lat1 - r_lat2) / 2) ** 2) + math.cos(r_lat1) * math.cos(
34         r_lat2) * (math.sin((r_lng1-r_lng2) / 2) ** 2)))) * raio_km
35         * 1000
36
37         #As informações são registradas
38         info_temp = [l_origem['ID'], l_destino['ID'],
39         dis_euclidiana, dis_geodesica]

```

```
35     temp = pd.DataFrame([info_temp], columns=colunas)
36     matriz = matriz.append(temp, ignore_index=True)
37
38 #É criado o arquivo de saída
39 escrever = pd.ExcelWriter('arquivos/saida.xlsx')
40 #Os dados são transferidos para o arquivo externo
41 matriz.to_excel(escrever, 'DADOS', index=False)
42 #O arquivo exportado é salvo
43 escrever.save()
```

Algoritmo 3.2: Distâncias Euclidiana e Geodésica

Fonte: Autor, 2018.

3.4.2

Distância Real

A identificação da distância real considera as vias, ruas e estradas disponíveis. É obtida com base na utilização do serviço do Google Maps. Este serviço permite obter a distância e o tempo do percurso com utilização de um veículo para o deslocamento ponto a ponto através do navegador de internet ou por linguagem de programação para um conjunto de origens e destinos.

3.4.2.1

Busca Através do Navegador

A distância real de um exemplo no site do Google Maps é ilustrada na Figura 3.4, utilizando um veículo com origem na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro com destino à Secretaria de Estado de Educação. A distância real é de 13,2km, enquanto a distância euclidiana desse percurso é de 8,6km e a geodésica é de 9,5km.

Embora seja possível calcular a distância utilizando somente as coordenadas geográficas do ponto de origem e do ponto do destino, sem utilizar o serviço do Google Maps, na figura 3.4 fica claro que o percurso de deslocamento não pode ser realizado em uma linha reta, uma vez que deve ser considerado o terreno da região, a eventual existência de morros, lagos, rios e parques fazem com que o percurso seja realizado com curvas e desvios.

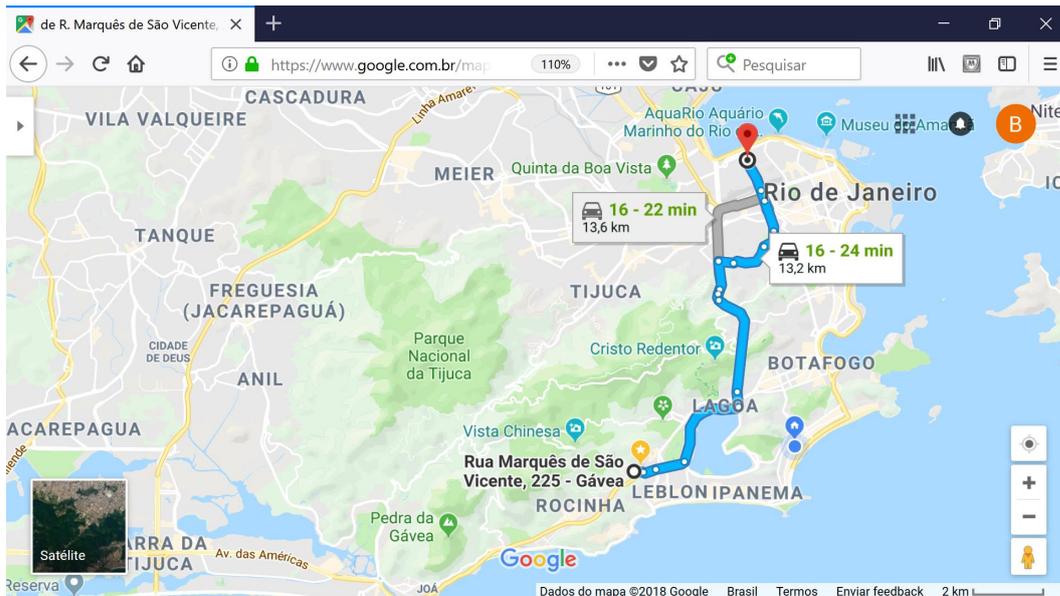


Figura 3.4: Resultado da pesquisa manual no Google Maps
 Fonte: Autor, 2018.

O resultado apresentado na figura 3.4, é demonstrado na figura 3.5 através do navegador de internet utilizando o serviço do Google Maps Distance Matrix API. A figura 3.5 retorna o arquivo no formato JSON, que informa a distância e o tempo necessário para o percurso.



Figura 3.5: Resultado da pesquisa no Google Maps Distance Matrix API
 Fonte: Autor, 2018.

3.4.2.2 Busca Através de Linguagem de Programação

O serviço do Google Maps Distance Matrix API fornece a distância e o tempo de percurso para uma matriz de origens e destinos, de acordo com a rota recomendada entre os pontos de partida e chegada.

O Algoritmo 3.3, desenvolvido em Python, realiza a consulta dos arcos existentes entre os alunos e as escolas na API do Google. Nesta busca, é gerada a menor distância e o tempo de percurso.

Para utilização do algoritmo, é necessário ter uma base de dados com as coordenadas de origem e destino em arquivos de *Excel* separados. Sendo assim, as consultas serão realizadas automaticamente e exportados para um novo arquivo. O Algoritmo 3.3 foi comentado passo-a-passo para que o leitor acompanhe o desenvolvimento da ferramenta.

```
1 #Matriz OD
2 #É preciso importar o módulo do Google Maps e do Pandas
3 import googlemaps
4 import pandas as pd
5
6 #Informamos a licença do Google Maps Api
7 gmaps = googlemaps.Client(key='')
8
9 #Informamos que existe um arquivo para os locais de origem e de
10 destino
11 origem = pd.read_excel('arquivos/origem.xlsx')
12 destino = pd.read_excel('arquivos/destino.xlsx')
13
14 #Informamos as colunas do arquivo que será gerado
15 colunas = ['ID_ORIGEM', 'ID_DESTINO', 'L_ORIGEM', 'L_DESTINO',
16            'DISTANCIA', 'TEMPO']
17
18 matriz = pd.DataFrame(columns=colunas)
19
20 #Iniciamos o loop para realizar as conversas
21 for index, l_origem in origem.iterrows():
22     for index, l_destino in destino.iterrows():
23         try:
24             #Consulta
25             consulta = gmaps.distance_matrix(l_origem['LOCAL'],
26             l_destino['LOCAL'])
27             #Registro da distância
28             distancia = consulta['rows'][0]['elements'][0]['
29             distance']['value']
30             #Registro do tempo
31             tempo = consulta['rows'][0]['elements'][0]['
32             duration']['value']
33
34         except:
35             distancia = ''
36             tempo = ''
```

```

32
33     #As informações são registradas
34     info_temp = [l_origem['ID'], l_destino['ID'], l_origem[
35     'LOCAL'], l_destino['LOCAL'], distancia, tempo]
36     temp = pd.DataFrame([info_temp], columns=colunas)
37     matriz = matriz.append(temp, ignore_index=True)
38
39 #É criado o arquivo de saída
40 escrever = pd.ExcelWriter('arquivos/saida.xlsx')
41 #Os dados são transferidos para o arquivo externo
42 matriz.to_excel(escrever, 'DADOS', index=False)
43 #O arquivo exportado é salvo
44 escrever.save()

```

Algoritmo 3.3: Distâncias e tempos entre pontos através do Google Maps

Fonte: Autor, 2018.

3.5 Base de Dados

Nesta fase, os bancos de dados de Localização, Distância e Veículos que se inter-relacionam são estruturados com base na ferramenta de resolução *VRP Spreadsheet Solver* proposta por Erdogan (2017). Estes dados são utilizados pelo modelo para a execução da roteirização, conforme ilustrado na figura 3.6 e descrita na sequência.

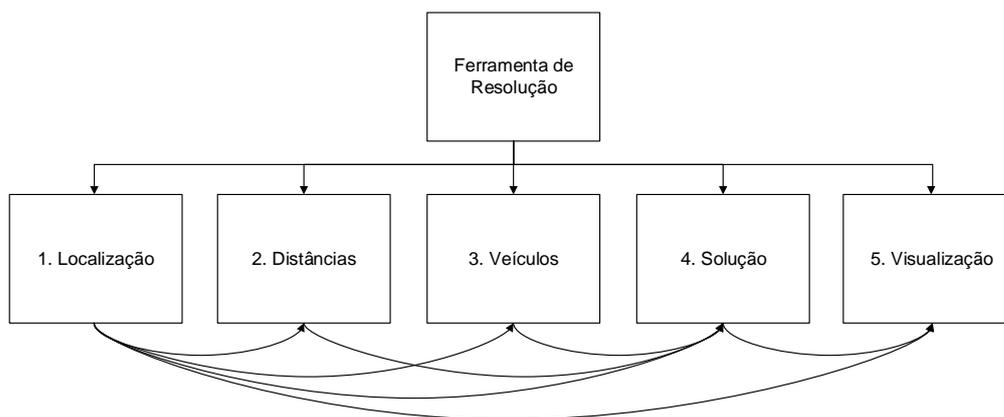


Figura 3.6: Estrutura do *VRP Spreadsheet Solver*

Fonte: Adaptado de Erdogan (2017)

Localização: contém as informações coletadas na fase 2, item 3.2. O arquivo contempla o identificador do local, o nome da unidade escolar ou ponto de embarque, a latitude, a longitude e a quantidade de alunos a serem coletados ou entregues.

Distância: contém as informações gerados na fase 5, item 3.5. O arquivo contempla o registro do local de origem, destino, distância e do tempo de percurso dos arcos existentes.

Veículo: contém as informações relacionadas aos tipos de veículos disponíveis para a roteirização. São catalogadas as informações do tipo de veículo, da capacidade, do custo por km, do tempo limite de percurso e da quantidade de veículos disponíveis.

3.6 Solução

A ferramenta de solução *VRP Spreadsheet Solver* apresenta um descritivo completo do roteiro gerado nesta etapa. O recurso resolve variantes do problema de roteamento de veículos (VRP) em instâncias com até 200 pontos dentro de 1 hora de tempo de CPU (ERDOGAN, 2017).

A programação do código é realizada no *Visual Basic for Applications* (VBA), extensão do *Microsoft Excel*, que é um programa para análise quantitativa muito utilizada no meio corporativo. Muitos softwares possuem funcionalidades integradas para trocar informações com o *Excel*, garantindo assim maior acessibilidade da ferramenta desenvolvida (ERDOGAN, 2017).

Na literatura, o SBRP é classificado como um problema de roteamento de veículo aberto com frota heterogênea com objetivo de minimizar o custo da viagem, levando em consideração restrição do tempo de viagem e da capacidade do veículo. Desse modo, a formulação matemática descrita por Pisinger e Ropke (2007) foi adaptada para as características da proposta e utilizada por Erdogan (2017).

Conjuntos	
V_C	Conjunto de pontos de embarque a serem visitados;
$V = V_C \cup \{0\}$	Conjunto de vértices para a rede;
A	Conjunto de arcos da rede;
K	Conjunto de veículos disponíveis.
Parâmetros	
$G(V, A)$	Rede completa a ser resolvida;
\hat{q}_i	Demanda de alunos atribuída ao ponto de embarque i ;
Q^k	Capacidade atribuída ao veículo k ;
\hat{D}^k	Limite de tempo de condução atribuído ao veículo k ;
\hat{d}_{ij}	Tempo de condução entre os clientes i e j ;
c_{ij}^k	Custo de viagem do veículo k no arco (i, j) .

Variáveis de decisão	
x_{ij}^k	$\begin{cases} 1 & \text{caso o veículo } k \text{ atravessar o arco } (i, j), \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$
y_i^k	$\begin{cases} 1 & \text{caso o veículo } k \text{ servir o vértice } i, \\ 0 & \text{caso contrário;} \end{cases}$
z_{ij}^k	Quantidade de alunos transportada pelo veículo k no arco (i, j) .

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (3-3)$$

$$\sum_{k \in K} y_i^k = 1 \quad \forall i \in V_M \quad (3-4)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ij}^k \leq \sum_{j \in V \setminus \{i\}} x_{ji}^k \quad \forall i \in V_C, k \in K \quad (3-5)$$

$$\sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ji}^k - \sum_{j \in V \setminus \{i\}} z_{ij}^k = \hat{q}_i y_i^k \quad \forall i \in V_C, k \in K \quad (3-6)$$

$$z_{ij}^k \leq Q^k x_{ij}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (3-7)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} \hat{d}_{ij} x_{ij}^k \leq \hat{D}^k \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (3-8)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (3-9)$$

$$y_i^k \in \{0, 1\} \quad \forall i \in V_C, k \in K \quad (3-10)$$

$$z_{ij}^k \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, k \in K \quad (3-11)$$

A função objetivo (3-3) minimiza o custo total das rotas. A restrição (3-4) garante que somente um veículo atende cada ponto de embarque. A restrição (3-5) garante a conservação de fluxo da solução entre a escola de origem do veículo k e os pontos de embarque por ele visitados. A restrição (3-6) garante a conservação do fluxo para a entrega dos alunos. A equação (3-7) garante que a capacidade de cada veículo não será ultrapassada. A equação (3-8) restringe o tempo de condução de cada veículo. As equações (3-9) e (3-10) definem a integralidade das variáveis. Por fim, a equação (3-11) define a não negatividade das variáveis utilizadas.

Para resolver a formulação, o estudo de Pisinger e Ropke (2007) baseia-se na metaheurística *Adaptive Large Neighborhood Search* (ALNS), descrito na Seção 2.2.3.5. A ideia desta técnica consiste na combinação de várias estratégias de inserção e remoção de pedidos em uma mesma heurística para obter melhores resultados. O pseudocódigo proposto com base na ALNS de Pisinger e Ropke (2007) é adaptado e descrito em Algoritmo 3.1.

Algoritmo 3.1: Busca em uma vizinhança grande adaptada

```

1 início
2   Construir uma solução incumbente, acrescentando os alunos às
   rotas através de escolhas que minimizem os custos em cada
   etapa
3   Melhorar a solução atual através de buscas locais com operadores
   de PERMUTAÇÃO, 1-OPT, 2-OPT e
   PERMUTAÇÃO-VEÍCULO
4   Registrar a solução incumbente como a solução mais conhecida
5   repita
6     se a solução atual for melhor do que a solução mais conhecida
7       então
8         registre a solução incumbente como a solução mais
9         conhecida
10        fim
11       senão
12        substitua a solução incumbente pela solução mais
13        conhecida com probabilidade  $p$ 
14        fim
15     retorna a solução mais conhecida
16 até que o tempo decorrido seja maior do que o tempo de CPU
    permitido;
17 fim
  
```

De acordo com Erdogan (2017), quatro operadores de pesquisa local são utilizados na melhoria da solução incumbente, conforme descrito a seguir:

PERMUTAÇÃO: procura por todos os possíveis pares de pontos de embarque em uma dada solução e verifica se a troca deles resultaria em um melhor resultado para a função objetivo;

1-OPT: examina a possibilidade de remover cada ponto de embarque dentro de uma determinada solução e reinseri-lo em uma posição diferente nas rotas para melhorar o resultado da função objetivo;

2-OPT: tenta remover dois arcos da solução de cada vez, por exemplo os arcos (a,b) e (c,d) , e substituí-los por outros dois, os arcos (a,d) e (b,c) procurando por um melhor resultado para a função objetivo;

PERMUTAÇÃO-VEÍCULO: tenta trocar todos os clientes das rotas de dois veículos de diferentes tipos a procura de melhores soluções. É particularmente útil para o caso de frotas heterogêneas.

Após o tempo de processamento da resolução, o resultado é gerado para cada veículo sendo descrito a sua sequência de paradas, a distância percorrida, o tempo de percurso, a quantidade de alunos a serem entregues e/ou coletados e o custo da rota.

3.7 Geoespacialização

A distribuição espacial da rota é o seu desenho em um mapa e existem várias ferramentas que oferecem o serviço de visualização de roteiros conforme citado na Seção 3.2. Os cenários por escola são montados visando o menor custo da viagem, sendo considerada a demanda de cada ponto de embarque e a capacidade do veículo.

Nesta fase, utiliza-se a ferramenta do Google Maps, como exemplo, para visualizar o roteiro de um determinado veículo. A base de mapas do serviço tem abrangência mundial. A potencialidade da ferramenta é ilustrada na Figura 3.7 que demonstra o trajeto para o transporte de um veículo escolar.

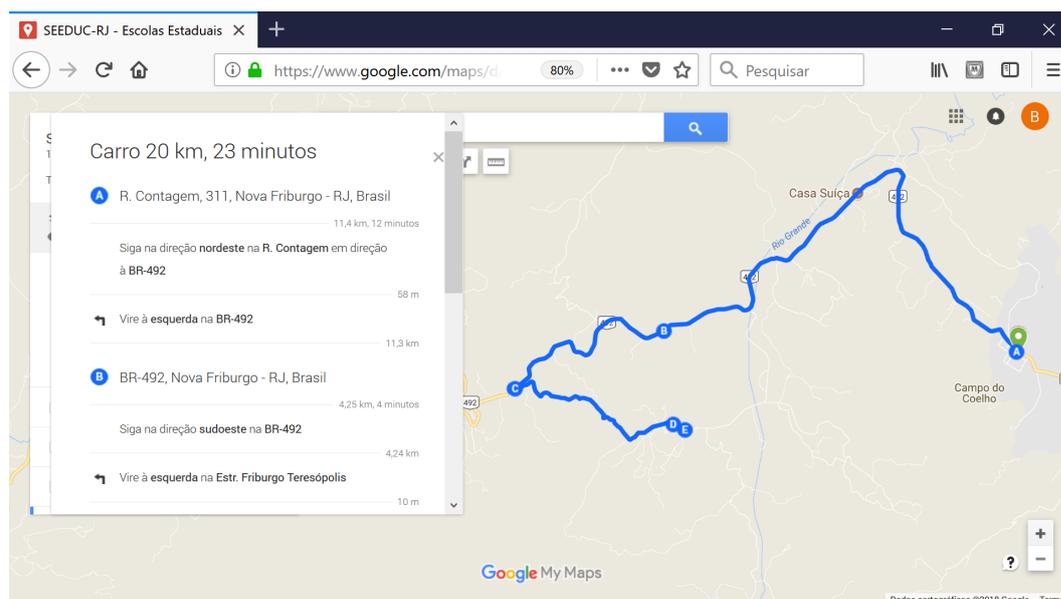


Figura 3.7: Percurso do transporte escolar
Fonte: Autor, 2018.

3.8 Diagnóstico

Um bom diagnóstico depende muito de uma correta percepção da realidade e este entendimento não é um procedimento simples ou trivial. De acordo com Tedesco (2010) uma mesma realidade pode ser vista por diferentes pessoas sob diferentes óticas, produzindo diferentes conclusões. Esta multipli-

cidade pode afetar o processo de tomada decisão de maneira significativa, caso não sejam consideradas em conjunto todas as percepções.

Portanto, o diagnóstico é uma etapa fundamental por se tratar da apuração da metodologia proposta. No campo do SBRP, o diagnóstico é realizado para emissão do resultado da análise do TER, a partir de parâmetros de referência pré-estabelecidos (TEDESCO, 2010). O resultado traz informações técnicas que podem ser comparadas com as realizadas na prática, para que possam ser planejadas ações pontuais ou globais de forma a melhorar o desempenho do sistema.

Dessa forma, o gestor pode utilizar este resultado para guiar suas diretrizes subsequentes no planejamento do transporte escolar, levando em consideração as peculiaridades de cada região bem como seus elementos de representação.

O Fundo Nacional do Desenvolvimento da Educação (FNDE), órgão gestor dos recursos federais e responsável pela execução de políticas educacionais do Ministério da Educação, define que a estruturação do planejamento do transporte escolar deve considerar os elementos físicos (infraestrutura, veículos e equipamentos), os lógicos (estrutura normativa, funcional, de gestão, de produção e político-institucional) e os agentes (condutor, monitor e/ou responsáveis). O órgão disponibiliza um “*Manual de Planejamento para o Transporte Escolar Rural*” no intuito de guiar o planejamento e o uso de recursos, de maneira eficaz, no Transporte Escolar Rural pelos gestores locais (FNDE, 2010).

Nesse sentido, sem o diagnóstico a gestão prática para a solução do problema permanece sem a definição de metas e objetivos. De acordo com Tedesco (2010) a elaboração do diagnóstico depende de etapas tais como: definição do objeto de estudo, definição da área de estudo, caracterização do objeto de estudo, coleta de dados, definição de parâmetros de referência, estudo comparativo entre os dados e os parâmetros, entre outros pertinentes a cada região a ser investigada. A Tabela 3.2 sintetiza a descrição do diagnóstico com base na metodologia proposta.

Tabela 3.2: Etapas do diagnóstico da metodologia proposta

Etapas	Descrição referente à metodologia
Objeto de estudo	O roteamento do transporte escolar (SBRP).
Área de estudo	Considerada a abrangência do estudo: escolas, turnos, distritos, municípios ou estados.
Caracterização do objeto de estudo e coleta de dados	Realizada através da geocodificação, definição das características do SBRP, matriz de distância e tempo de percurso, composição do banco de dados e resolução.
Análise de dados e parâmetros	Consiste na emissão do diagnóstico do roteamento que irá contemplar as rotas propostas e resumos quantitativos.

Fonte: Autor, 2018.

4 Aplicação

Este capítulo tem como objetivo verificar a aplicabilidade da metodologia proposta no Capítulo 3. Nas seções seguintes, um problema de roteamento do transporte escolar rural do estado do Rio de Janeiro será explorado, como forma de aplicação da metodologia desenvolvida, com a devida apresentação dos resultados alcançados.

A escolha pelo estado fluminense ocorreu pela facilidade do autor na coleta de dados. O levantamento dos dados, os quais primordialmente objetivaram o respectivo estudo, foram disponibilizados pela Secretaria de Estado de Educação do Rio de Janeiro, por meio de documentos físicos e eletrônicos e entrevistas não estruturadas.

4.1 Transporte Escolar no Estado do Rio de Janeiro

O acesso e o direito à educação gratuita e de qualidade estão resguardados pela legislação brasileira por vários meios legais. A Constituição Federal de 1988, em seu artigo 206, inciso I, estabelece que o ensino será ministrado com base no princípio de igualdade de condições para o acesso e permanência na escola. O artigo 208, inciso VII, complementa que o dever do Estado com a educação será efetivado mediante a garantia de atendimento ao educando, em todas as etapas da educação básica, por meio de programas suplementares de material didático escolar, transporte, alimentação e assistência à saúde.

Nesse sentido, percebe-se que a legislação vigente estabelece a garantia do acesso dos alunos à escola e que o transporte é o elo entre eles. Neste contexto, cabe um especial destaque ao Transporte Escolar Rural, devido às condições das estradas serem precárias e em geral muito íngremes e estreitas.

O serviço de transporte escolar rural do estado do Rio de Janeiro é de responsabilidade da Secretaria de Estado de Educação, e cada unidade escolar é encarregada de contratar e gerenciar o transporte de seus alunos, respeitando a Resolução nº 5.506 da SEEDUC-RJ (2017) .

O diretor da escola é responsável por estabelecer as rotas e designar a frota de veículos que será utilizada para fazer o transporte de seus alunos nos respectivos turnos. O custo é calculado por quilômetro rodado ou por dia de

utilização, de acordo com o tipo de veículo, respeitando os limites estabelecidos na Nota Técnica nº 0001 SUBIT/SEEDUC-RJ (2010).

Para a resolução do problema de roteamento do transporte escolar rural são utilizadas as oito etapas estabelecidas no Capítulo 3. Os resultados são descritos nas seções a seguir.

4.2

Abrangência

O estado do Rio de Janeiro está localizado na região sudeste do Brasil, sendo composto por 92 municípios. A região conta com 15.989.929 habitantes, área territorial de 43.782 km² e densidade demográfica de 365,23 hab/km² (IBGE, 2010). Em 2017, a SEEDUC-RJ gerenciava 1.253 unidades escolares e, aproximadamente, 600 mil alunos. É a quarta maior em quantidade se comparada com outros estados brasileiros.

O estudo se restringe às unidades escolares que necessitam do Transporte Escolar Rural. No ano de 2017, o estado fluminense transportava 15.788 alunos residentes em área rural de 173 unidades escolares localizadas em 51 municípios. Para cada dia de aula, todos os alunos são coletados e entregues próximo às suas residências.

4.3

Geocodificação

O estudo empírico foi dificultado, tendo em vista que a SEEDUC-RJ não dispõe das informações georreferenciadas catalogadas em uma base de dados. Diante dessa lacuna, que inviabilizava o desenvolvimento do presente estudo, o seu autor recorreu aos métodos computacionais detalhados na Seção 3.2.2. A seguir, são demonstrados os resultados desta fase para cada item.

Redes Viárias: uma extensa fonte de dados de informações geográficas pode ser encontrada no projeto OpenStreetMap (OSM). As redes viárias do estado fluminense foram baixadas do OSM (<<http://www.openstreetmap.org/>>) e geoespacializada no Sistema de Informação Geográfica, QGis, conforme ilustrado na Figura 4.1.

Unidades Escolares Estaduais: neste quesito, o intuito é identificar a latitude e a longitude de cada unidade definida na abrangência. A localização de todas as unidades escolares referenciadas em um mapa do estado do Rio de Janeiro não está disponível para a sociedade em uma plataforma. Sendo assim,

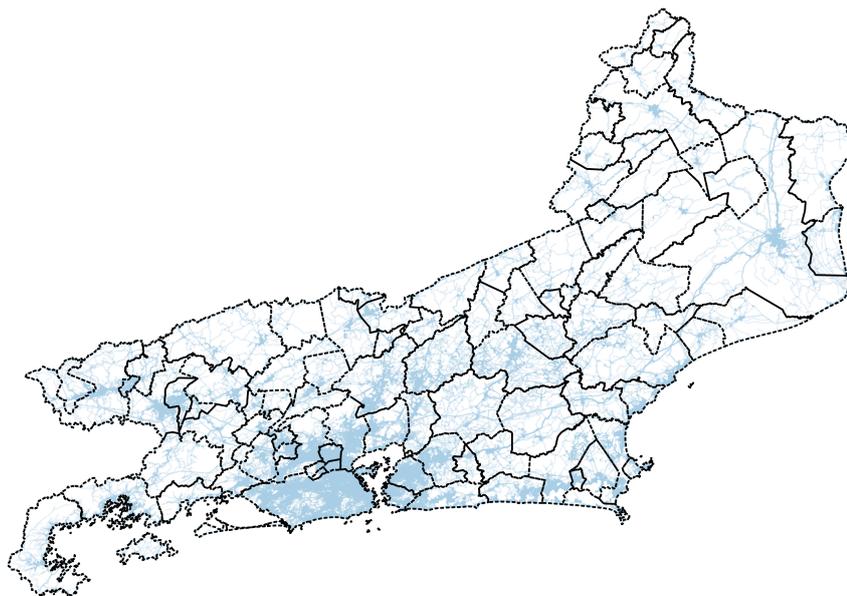


Figura 4.1: Rede viária do estado do Rio de Janeiro

Fonte: Autor, 2018.

este trabalho não se limita realizar apenas a localização das unidades escopo deste estudo e estende para todas as escolas do estado.

Para este trabalho foi utilizado o código desenvolvido na Seção 3.2.2 e os resultados estão disponibilizados no Apêndice B. Para verificar a consistência dos dados encontrados, é utilizado o software QGIS para visualizar espacialmente o resultado, conforme ilustra a Figura 4.2.

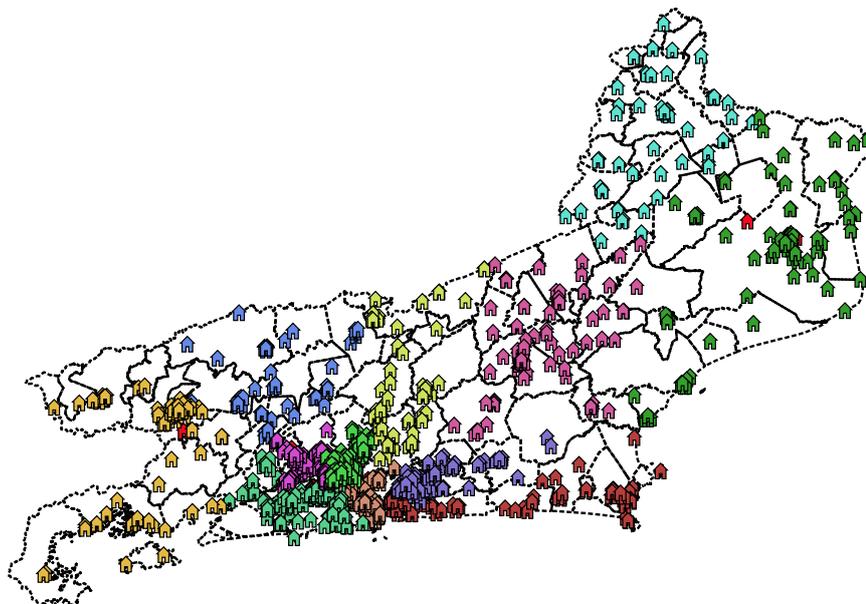


Figura 4.2: Unidades Escolares Estaduais do estado do Rio de Janeiro no QGIS

Fonte: Autor, 2018.

Os resultados apresentam valores consistentes. Desta forma, uma das

contribuições do estudo consistiu no georreferenciamento das unidades escolares estaduais. Estes dados estão disponibilizados para sociedade através da plataforma do GoogleMaps, no site <<https://goo.gl/PrThv1>>, conforme demonstrado na Figura 4.3.

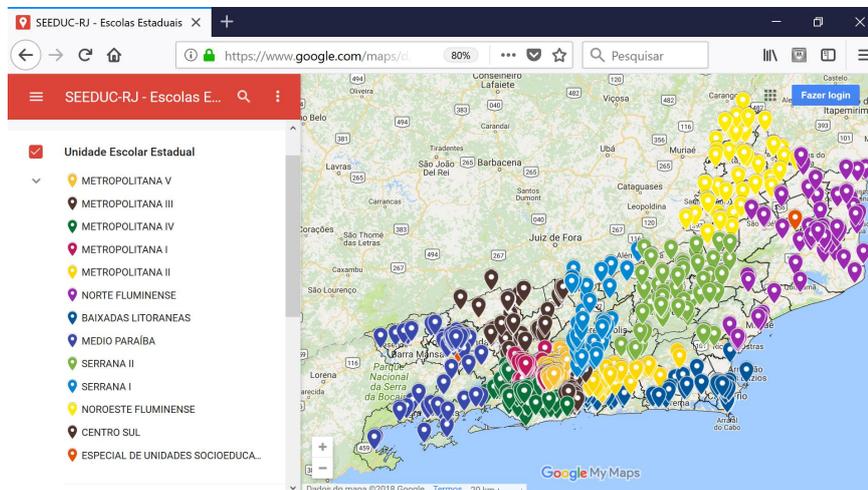


Figura 4.3: Unidades Escolares Estaduais do Rio de Janeiro no Google Maps
Fonte: Autor, 2018.

Pontos de Embarque: os 13.721 pontos de embarque dos 15.788 alunos também não estavam espacialmente identificados, sendo assim foi utilizado o algoritmo disponível na Seção 3.2.2 para resolução. A latitude e a longitude encontrada na utilização do código não são disponibilizadas neste trabalho, visto a preocupação de preservar a integridade dos alunos. Podemos afirmar que foram localizados 44,4% dos alunos e o resultado é ilustrado na Figura 4.4

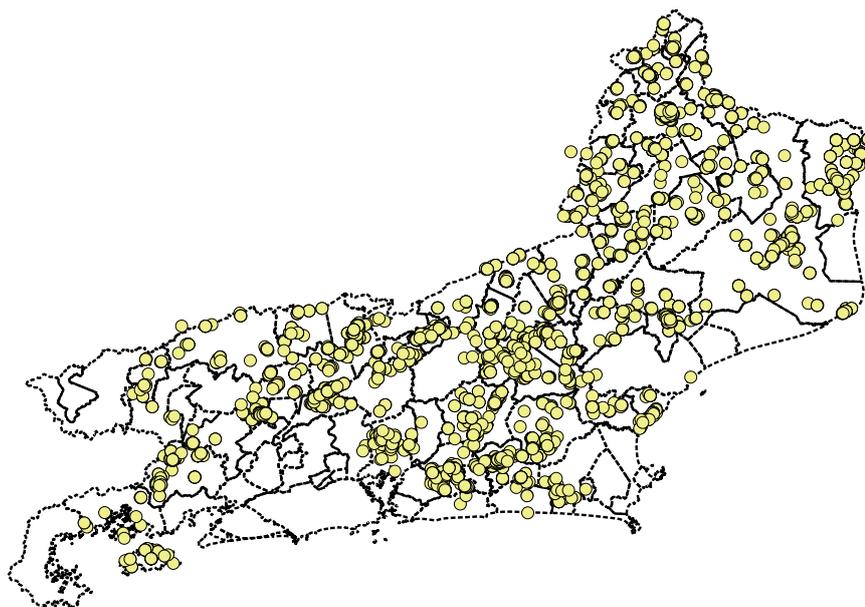


Figura 4.4: Pontos de Embarque dos Alunos que utilizam o TER
Fonte: Autor, 2018.

O resultado abaixo de 50% é devido aos logradouros das regiões do campo levar em consideração o nome da localidade, sítio, fazenda, entre outros. Como identificado, grande parte desses locais e/ou localidades ainda não foi referenciado na base de dados do Google Maps, o que simboliza uma limitação dos dados disponíveis e a necessidade de delimitação da abrangência do estudo.

Diante do fato mencionado, para dar sequência ao estudo da abrangência delimitada, seria necessário realizar um trabalho manual para identificar cada localidade através do guia descrito no Apêndice A ou ir a campo com um dispositivo do tipo GPS para identificar os 8.748 pontos pendentes. Em ambos os casos, um custo e uma equipe de servidores estariam atrelados para continuidade do estudo.

Dessa forma, para aplicação do método proposto, a delimitação é realizada com base na quantidade de municípios com mais pontos de embarque localizados por turno. A cidade de Nova Friburgo apresenta-se em primeiro lugar, com 77,6% dos alunos encontrados no turno da manhã, perfazendo o total de 116 alunos e 72 pontos de embarque. Para complementar os 100%, as coordenadas foram verificadas manualmente para 20 pontos seguindo o guia do Apêndice A.

Assim, classifica-se o tipo de seleção desta amostra como não-probabilística, que segundo Marques et al. (2006), são compostas por forma acidental ou intencional. Esse modelo de seleção é realizado de acordo com a facilidade de acesso aos dados. A Figura 4.5 ilustra o resultado da delimitação para a sequência da resolução.

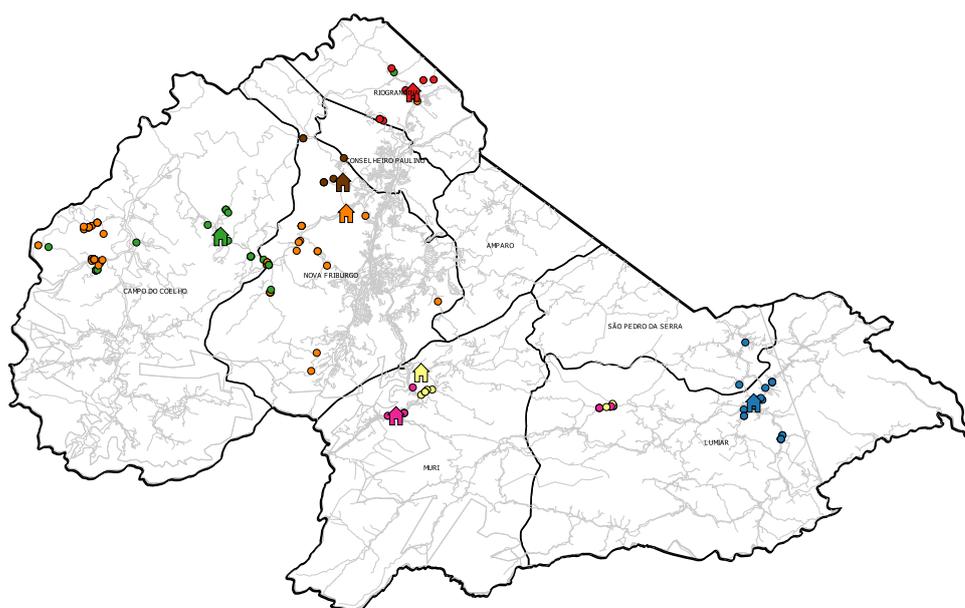


Figura 4.5: Município de Nova Friburgo, UEs e pontos de embarque

Fonte: Autor, 2018.

Podemos ressaltar que o banco de dados das vias do município em estudo não possui informações sobre impedimento de tráfego das vias ou possíveis restrições onde determinados veículos ficam impossibilitados de trafegar. Dessa forma, tais alterações, se necessárias, deverão ser feitas pelo gestor do transporte escolar.

4.4

Característica

No problema real do SBRP a ser solucionado, trata-se de estudantes do ensino fundamental e médio, do turno da manhã, entre 11 e 17 anos, que residem no município de Nova Friburgo e fazem jus ao TER. A resolução SEEDUC-RJ (2017) nº 5.506 estabelece que cada Associação de Apoio à Escola contrate o serviço de transporte de seus respectivos alunos. As empresas que prestam os serviços devem ter frota de veículos heterogênea composta por Kombi, Van, Micro-ônibus e/ou Ônibus. Cada tipo de veículo tem uma capacidade e um custo variável por km ou por dia de utilização, calculado a partir do ponto de embarque com maior distância da escola (Nota Técnica nº 0001 SUBIT/SEEDUC-RJ, 2010).

Cabe ressaltar que não há legislação brasileira que defina o tempo máximo de percurso e a distância de deslocamento do aluno até o ponto de embarque/desembarque. Desta maneira, a determinação ou a verificação do melhor conjunto dos pontos de embarque, bem como o tempo de deslocamento do aluno até o local de partida do veículo não foram objetos deste trabalho. Este estudo se limita em utilizar os pontos de embarque fornecidos e a quantidade de alunos pertencentes em cada local de partida e o tempo máximo de 01:30 de percurso.

Para aplicação do modelo, as características do problema são classificadas com base nos estudos da Seção 2.1 e a Tabela 4.1 demonstra o resultado.

Tabela 4.1: Características identificadas

Critério	Descrição
Número de unidade escolar	Única
Localidade	Rural
Escopo do problema	Manhã
Carregamento Misto	Não é permitido
Aluno de necessidade especial	Somente alunos gerais são considerados
Frota	Heterogênea
Objetivo	Minimizar o custo total da viagem do veículo
Restrição	Capacidade do veículo Tempo máximo de percurso

Fonte: Autor, 2018.

4.5

Distância e Tempo

Este passo compreende em encontrar, através de uma matriz de origem e destino, a distância e o tempo dos arcos existentes entre pontos de embarque e destes para a respectiva escola, conforme descrito na Seção 3.4.

Embora o custo para o cálculo das distâncias reais seja em, alguns casos, superior ao custo de utilizar as distâncias calculadas (euclidiana e geodésica), e por se tratar da solução de um problema real, estes cálculos se tornam indispensáveis.

Através dos protótipos desenvolvidos em Python, foram executados os algoritmos para a busca da distância da API do Google Maps e para o cálculo das distâncias euclidiana e geodésica. Para ilustrar o que ocorre ao utilizar estas distâncias, o somatório dos resultados entre os arcos são comparados e ilustrados na Tabela 4.2.

Por se tratar de uma região de difícil acesso, a distância real entre os demais cálculos supera 78%, ou seja, a distância real é igual a aproximadamente 1,8643 vezes mais que o valor da distância euclidiana e 1,7874 da distância geodésica.

Tabela 4.2: Comparativo entre os cálculos de distâncias

Escola	Arcos	Soma distância euclidiana	Soma distância geodésica	Soma distância Google Maps	Variação euclidiana e Geodésica	Variação Euclidiana e Google Maps	Variação geodésica e Google Maps
E1	240	374.916,24	406.062,72	578.046,00	8,31%	54,18%	42,35%
E2	342	2.193.333,76	2.293.645,09	4.337.876,00	4,57%	97,78%	89,13%
E3	72	115.704,96	123.414,83	324.514,00	6,66%	180,47%	162,95%
E4	1122	8.974.374,03	9.345.005,41	16.666.293,00	4,13%	85,71%	78,34%
E5	90	522.207,36	538.194,43	844.082,00	3,06%	61,64%	56,84%
E6	30	192.430,43	198.541,56	318.060,00	3,18%	65,29%	60,20%
E7	20	33.339,95	35.747,34	60.662,00	7,22%	81,95%	69,70%
Total	1916	12.406.306,74	12.940.611,39	23.129.533,00	4,31%	86,43%	78,74%

Fonte: Autor, 2018.

O trajeto e o tempo considerados se referem aos encontrados no Google Maps, visto que a distância entre os endereços leva em consideração os trajetos disponíveis pela malha viária da cidade e suas características, como a circulação na via e o registro histórico do trânsito no local.

4.6

Base de Dados

Nesta fase, são incluídos os dados da localização de origem, capacidade e tipo de veículo da frota disponível. A Tabela 4.3 informa a quantidade de

veículos disponíveis para cada unidade escolar, suas respectivas capacidades e custos. Tais dados foram fornecidos pela SEEDUC.

Tabela 4.3: Veículos disponíveis

Escola	Tipo de Veículo	Custo KM (R\$)	Capacidade	Quantidade
E1	KOMBI	1,30	8	1
E1	VAN	1,30	14	1
E2	KOMBI	1,30	8	2
E2	MICRO-ÔNIBUS	1,60	15	1
E3	KOMBI	1,30	8	2
E4	KOMBI	1,30	8	2
E4	MICRO-ÔNIBUS	1,60	14	1
E4	MICRO-ÔNIBUS	1,60	15	3
E5	KOMBI	1,30	8	1
E5	VAN	1,30	15	1
E6	KOMBI	1,30	11	1
E7	KOMBI	1,30	8	1

Fonte: Autor, 2018.

4.7 Solução

Após o cálculo das distâncias e dos tempos entre os pontos de embarque e escolas, bem como consolidado os bancos de dados, inicia-se o processo de construção das rotas. A ferramenta utilizada é *VRP Spreadsheet Solver* através dos passos descrito na Seção 3.6.

A ferramenta é executada em um processador Intel Core i7 de 2,40 GHz com 8,0 GB de RAM e sistema operacional Windows 10. A resolução proposta neste trabalho inicia a construção de cada rota na Unidade Escolar e termina no último aluno a desembarcar, respeitando as restrições de capacidade e tempo de percurso.

Mais detalhes do passo a passo da utilização da ferramenta proposta por (ERDOGAN, 2017) pode ser obtido em seu trabalho bem como no manual disponível em <<http://people.bath.ac.uk/ge277/index.php/vrp-spreadsheet-solver/>>.

A solução para o turno da manhã das escolas de Nova Friburgo foram testadas em um tempo de processamento de 1, 2, 5 e 60 minutos. Sendo que o custo não modificou em relação ao tempo, variando apenas o número de iterações. A Tabela 4.4 detalha o resultado obtido.

Em relação, especificamente, às rotas e quantidades de veículos por unidade escolar descritos na Tabela 4.4, obteve-se como resultado SBRP, 17 veículos variando entre Kombi, Van e Micro-ônibus disponíveis entre as 7 unidades escolares. A unidade escolar com maior demanda de alunos das regiões rurais para o transporte escolar foi a E4, com 64 alunos e 33 pontos de

embarque, os quais foram distribuídos entre seis veículos com capacidade total para 75 passageiros. Já a unidade escolar com menor demanda de alunos foi a unidade E7, com um total de 6 alunos a serem transportados em um único veículo do tipo Kombi, com capacidade para 8 passageiros, cuja rota apresenta quatro pontos de parada.

Os resultados encontrados indicam que o modelo matemático e o algoritmo utilizados, descritos na seção 3.6 trouxeram soluções viáveis para o SBRP. A forma com que os dados são mostrados facilita o entendimento e a programação das rotas por parte dos gestores do TER.

4.8 Geoespacialização

A sequência das rotas descritas na Tabela 4.4 foram geoespacializadas utilizando o sistema QGIS e descritas na Figura 4.6.

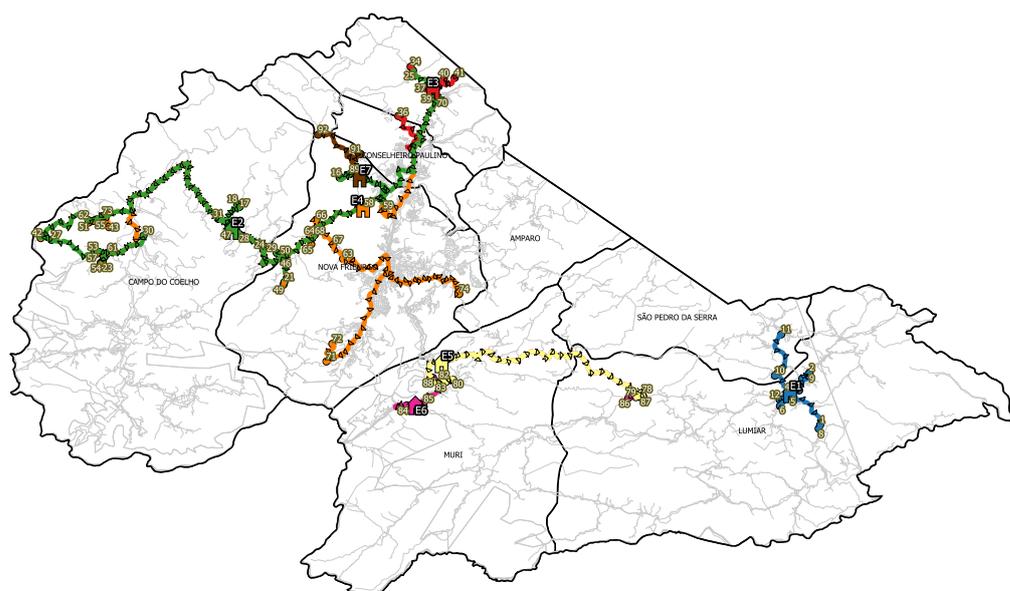


Figura 4.6: Rotas do Transporte Escolar Rural de Nova Friburgo
Fonte: Autor, 2018.

Observa-se pela Figura 4.6 que as rotas iniciam na unidade escolar e terminam no ponto de desembarque do último aluno, sendo considerado o retorno deste para sua residência. Para a ida, considera-se a premissa de simetria entre dois pontos, ou seja, que a distância percorrida para o deslocamento do ponto de embarque 1 para o 2 é idêntica à distância do ponto 2 para o 1, sendo este último um trajeto considerado igualmente possível. Desta forma, a rota de ida do aluno para sua respectiva escola é o trajeto inverso do estabelecido na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Resultado do SBRP

Rota	Veículo	Capacidade	Número de Paradas	Número de Alunos	Distância Percorrida (KM)	Tempo de Viaagem	Custo Otimizado (R\$)	Custo Atual(R\$)	Percentual Otimizado/Atual
E1		25	15	24	15,646	00:48:29	20,34	95,00	-78,59%
1- E1 → 14 → 4 → 5 → 12 → 6 → 10 → 11	KOMBI	11	7	10	8,189	00:26:17	10,65	-	-
2- E1 → 2 → 9 → 13 → 7 → 15 → 3 → 1 → 8	VAN	14	8	14	7,457	00:22:12	9,69	-	-
E2		31	18	24	68,305	01:56:35	91,20	121,51	-24,94%
3- E2 → 21 → 22 → 29 → 16 → 25	KOMBI	8	5	5	36,152	01:08:09	47,00	-	-
4- E2 → 20 → 27 → 26 → 23 → 19 → 33 → 30	KOMBI	8	7	8	24,174	00:32:50	31,43	-	-
5- E2 → 32 → 18 → 17 → 31 → 28 → 24	M.ÔNIBUS	15	6	11	7,979	00:15:36	12,77	-	-
E3		16	8	12	15,72	00:41:41	20,44	40,30	-49,28%
6- E3 → 40 → 41 → 38 → 37 → 34	KOMBI	8	5	6	7,097	00:22:10	9,23	-	-
7- E3 → 39 → 35 → 36	KOMBI	8	3	6	8,623	00:19:31	11,21	-	-
E4		75	33	64	129,335	03:35:14	194,00	266,70	-27,26%
8- E4 → 58 → 59 → 70	KOMBI	8	3	3	12,418	00:28:59	16,14	-	-
9- E4 → 67 → 63 → 74 → 71 → 72	KOMBI	8	5	6	30,687	01:12:15	39,89	-	-
10- E4 → 68 → 47 → 45 → 57 → 53	M.ÔNIBUS	14	5	13	24,483	00:30:54	39,17	-	-
11- E4 → 65 → 43 → 56 → 73 → 55 → 44 → 51 → 62 → 42	M.ÔNIBUS	15	9	15	27,947	00:35:35	44,72	-	-
12- E4 → 66 → 64 → 48 → 61 → 52 → 60 → 54	M.ÔNIBUS	15	7	12	25,863	00:35:45	41,38	-	-
13- E4 → 69 → 50 → 46 → 49	M.ÔNIBUS	15	4	15	7,937	00:11:46	12,70	-	-
E5		23	9	11	19,262	00:28:13	25,04	65,00	-61,48%
14- E5 → 80 → 82 → 81 → 83	KOMBI	8	4	5	4,992	00:11:42	6,49	-	-
15- E5 → 78 → 77 → 75 → 76 → 79	M.ÔNIBUS	15	5	6	14,27	00:16:31	18,55	-	-
E6		11	5	9	22,804	00:33:06	29,65	51,09	-41,97%
16- E6 → 84 → 85 → 88 → 87 → 86	KOMBI	11	5	9	22,804	00:33:06	29,65	-	-
E7		8	4	6	8,409	00:24:47	10,93	31,20	-64,97%
17- E7 → 89 → 90 → 91 → 92	KOMBI	8	4	6	8,409	00:24:47	10,93	-	-
TOTAL		189	92	150	279,481	08:28:05	391,60	670,80	-41,62%

Fonte: Autor, 2018.

4.9 Diagnóstico

O diagnóstico, conforme apresentado no item 3.8, consiste na análise da aplicação e é a primeira fase para o planejamento das intervenções.

O resultado, demonstrado na tabela 4.4, gerou um total de 17 rotas para atender as sete unidades escolares e a demanda de 150 alunos. Podemos concluir que o objetivo de minimizar os custos do TER foi atingido. A aplicação da metodologia apresentada, vislumbra uma economia para as rotas que varia entre 24,94% e 78,59% do custo total do percurso. Tais resultados podem ser representados por escola pelo gráfico presente na Figura 4.7

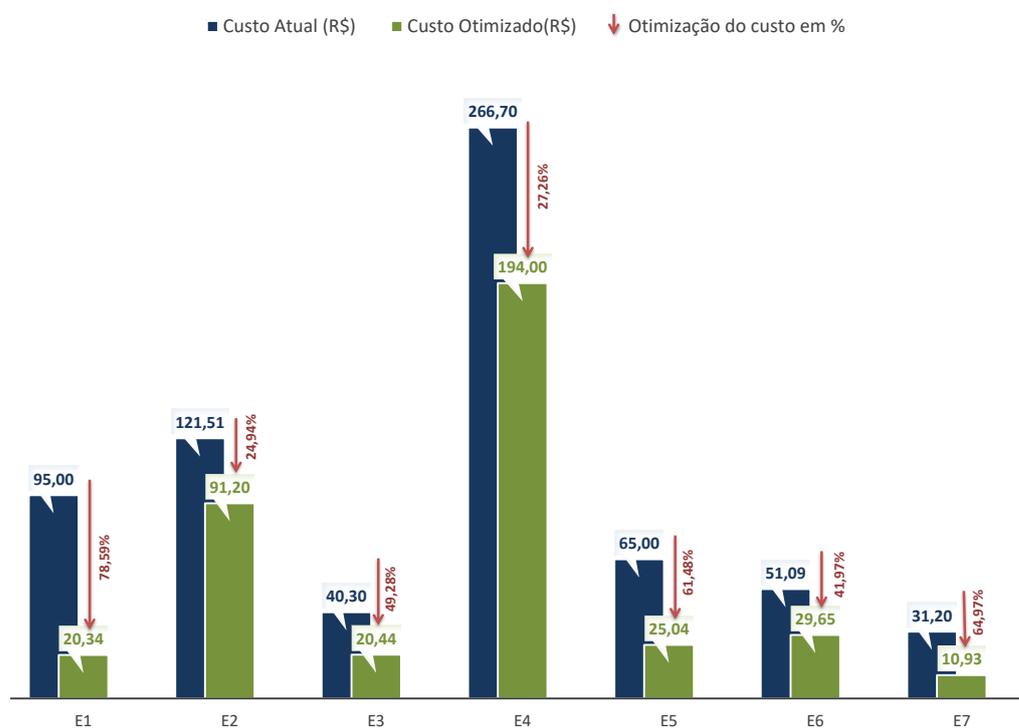


Figura 4.7: Comparação de custos atuais e otimizados por escola

Fonte: Autor, 2018.

Outras informações podem ser diagnosticadas pelo gestor através da Figura 4.7 e da Tabela 4.4, conforme detalhado a seguir:

- Considerando em termos percentuais de cada escola, a unidade escolar mais beneficiada no estudo foi a primeira que teve o custo atual equivalente a R\$ 95,00 reduzido para R\$ 20,34, resultando em uma otimização de 78,59%. Isso ocorre devido ao fato do tipo de contratação desta unidade ser por aluguel. A segunda unidade mais beneficiada foi a unidade E7 com otimização de 64,97%, tendo o valor original de R\$ 31,20 reduzido

- para R\$ 10,93. Após a unidade E7, estão respectivamente as unidades E5, E3, E6, E4 e E2;
- Considerando a comparação entre os custos, a redução é de R\$ 670,80 para R\$ 391,00, otimizando 41,62%. As diferenças de valores são pontos que chamam muita atenção, a começar pela primeira unidade E1 que obteve um valor de R\$ 74,66 inferior ao custo original. A unidade escolar E4, tem possibilidade de redução na ordem de R\$ 72,70. Na sequência estão, respectivamente, as unidades E5, E2, E6, E7 e E3;
 - Quanto à distância e ao tempo de percurso, a unidade escolar E2 possui a maior distância, 36,152 km, no tempo de 01:08, realizado pela Rota 3 e velocidade média de 31,9 km/h. Entretanto, o trajeto com maior tempo é a Rota 9 da escola E4, 01:12, percorrendo uma distância de 30,687 km e velocidade média de 25,57 km/h. Isso se dá pelo fato da distância e tempo encontrados através do Google Maps levar em consideração o tráfego das vias, que nesta ocasião se dá em estradas de terra batida

Dessa forma, tendo sido realizadas todas as etapas da metodologia proposta, o estudo apresentou seus benefícios no cumprimento dos objetivos propostos, entregando um diagnóstico para ser avaliado. Cabe ressaltar que diante da possibilidade maior de ganho em casos como da unidade escolar E1, cuja contratação é por Aluguel, a SEEDUC-RJ manteve apenas a contratação por KM, através do Comunicado Interno nº 02 CDTE/SUPAD/SUBIT/SEEDUC-RJ (2018).

5 Conclusão

Este trabalho buscou desenvolver uma metodologia para solucionar o problema decisório do roteamento do transporte escolar. Propor um conjunto de métodos para o SBRP com base em uma aplicação é uma real necessidade em termos econômicos e sociais.

O projeto desenvolvido aplicou técnicas e conceitos do campo da Pesquisa Operacional para reduzir os custos destinados a operação do SBRP. A pesquisa alcançou o seu objetivo baseado em estudos que utilizaram dados quantitativos e qualitativos em uma abordagem multimetodológica, dentro do contexto do transporte escolar que considera aspectos estratégicos e situacionais.

A metodologia demonstrou a importância e a necessidade de elaboração da estrutura semântica pertinente ao objeto de estudo. Desta forma, são definidos os seus elementos constituintes e de representação, o que permite estruturar a caracterização do problema até o seu diagnóstico. Além disso, buscou-se utilizar ferramentas para tomada de decisões que que fossem de fácil manuseamento, flexíveis para a manipulação de dados e acessíveis para o governo. Para tanto, foi utilizado o *VRP Spreadsheet Solver*, proposto por Erdogan (2017), capaz de solucionar problemas de roteamento com as características procuradas.

O sistema de rotas foi modelado como um OVRP com restrições de capacidade dos veículos, frota heterogênea, limite de tempo e demanda determinística. As visualizações das rotas com técnicas do GIS ajudam no entendimento do percurso bem como no apoio à decisão. As ferramentas foram utilizadas para o contexto das unidades escolares do município de Nova Friburgo, RJ. Uma das contribuições do estudo consistiu no georreferenciamento das unidades escolares estaduais. Estes dados estão disponibilizados para sociedade através da plataforma do Google Maps.

Os resultados obtidos do SBRP, em meio rural, foram comparados com os dados reais e demonstraram uma oportunidade considerável de melhoria na operação atual, reduzindo o custo médio da rota em 41,62%. Em uma simulação que contemplaria um período equivalente a um ano letivo (200 dias), se considerada a diferença do valor atual com o valor otimizado (equivalente a R\$ 279,20) e o trajeto de ida e volta do veículo (duas vezes o valor da

diferença, equivalente a R\$ 558,40), o valor total de economia para o ano letivo de 2017 seria de R\$ 111.680,00. Além disso, podemos mensurar a possibilidade de melhoria do nível de serviço, redução do tempo para o atendimento aos alunos e melhor aproveitamento dos veículos.

Os experimentos demonstram que o modelo funciona para a fração da realidade em questão, o que comprova a eficiência da metodologia. Futuras avaliações são decisivas para a expansão da proposta para as demais localidades. Intervir nessa área envolve uma série de aspectos legais, institucionais, administrativos e financeiros, que precisam ser levados em consideração e que não foram objeto desta dissertação.

Algumas limitações foram encontradas na aplicação da metodologia, em especial na etapa de Geocodificação, que se refere à obtenção das informações de latitude e longitude. Dessa forma, para que as análises reflitam cada vez melhor a realidade da operação, é sugerido que as campanhas com instruções para o cadastro dos dados, bem como a estrutura para inserir e armazenar os dados da operação seja acrescentada na matrícula do aluno.

Os algoritmos protótipos e os resultados tangíveis descritos neste trabalho foram disponibilizados para a SEEDUC-RJ, a fim de auxiliar aos servidores ligados ao transporte escolar rural nas análises sobre a operação, nas simulações de cenários com diferentes possibilidades de roteiros, na medição de impactos de cada parâmetro utilizado, dentre outras. Desta forma, a instituição irá economizar tempo na execução do roteamento, será mais assertiva na escolha dos roteiros, irá ganhar qualidade nas decisões tomadas e obterá melhores resultados.

5.1 Futuros Desdobramentos

Diversas áreas promissoras para pesquisas futuras podem derivar deste estudo, conforme pontuado abaixo:

- **Realizar pesquisa para identificar as coordenadas geográficas dos 8.748 pontos que não puderam ser identificados durante a aplicação da metodologia apresentada:**

A coleta da latitude e longitude pode ser realizada de duas formas: através de um trabalho manual que pode ser feito seguindo as etapas descritas no guia do Apêndice A ou através de uma pesquisa de campo, com o uso de dispositivo GPS.

– **Considerar a utilização dos veículos em múltiplas escolas:**

Realizar estudo que ampliem o escopo deste estudo incluindo outras características específicas para o SBRP, como a utilização de veículos em múltiplas unidades escolares. Caso sejam utilizados os mesmos dados deste estudo, ainda é possível a realização de uma análise comparativa de ambas soluções.

– **Considerar a melhor estratégia para alocação de alunos em unidades escolares próximas às suas residências:**

Um dos fatores que colaboram para a complexidade de encontrar uma solução que viabilize a redução de custos para o SBRP, está no fato da necessidade de transportar alunos que não estudam nas escolas mais próximas à sua residência. Por isso, esse fator pode servir como objeto de estudo para novas pesquisas.

– **Criar pontos de transbordo que permitam a circulação de veículos menores nos ramos viários:**

A criação de pontos de transbordo permite que os alunos que residem há uma distância maior da rota principal possam ser conduzidos até essa rota, ou mesmo que a rota principal seja encurtada em virtude das ramificações.

Referências bibliográficas

ALVES, F. *Problemas de roteamento de veículos aplicados no planejamento logístico do transporte escolar da cidade de Coxim*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, São Paulo, 2015.

ANGEL, R. D.; CAUDLE, W. L.; NOONAN, R.; WHINSTON, A. Computer-assisted school bus scheduling. *Management Science*, v. 18, n. 6, p. 279–288, 1972.

ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. *Pesquisa operacional: para cursos de engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

ASSAD, A. Modeling and implementation issues in vehicle routing. *Vehicle Routing*, 1988.

BACHOK, S.; IBRAHIM, O.; M., M.; PONRAHONO, Z. *Rural Public Bus Routing and Bus Stops Detecting using Global Positioning System and Geographical Information System*. United States of America: American Scientific Publishers, 2017.

BEKTAS, T.; ELMASTAS, S. Solving school bus routing problems through integer programming. *The Journal of the Operational Research Society*, v. 58, n. 12, p. 1599–1604, 2007.

BENNETT, B. T.; GAZIS, D. C. School bus routing by computer. *Transportation Research*, v. 6, n. 4, p. 317–325, 1972.

BENNETT, J. *OpenStreetMap*. [S.l.]: Packt Pub, 2010.

BEZERRA, V. H. d. S.; NETO, P. M. s. S. Modelo de roteirização de veículos com o auxílio do sistema de posicionamento global - gps. 2011.

BODIN, L.; GOLDEN, B.; ASSAD, A.; BALL, M. Routing and scheduling of vehicles and crews - the state of the art. *Computers and Operations Research*, v. 10, n. 2, p. 63–212, 1983.

BODIN, L. D.; BERMAN, L. Routing and scheduling of school buses by computer. *Transportation Science*, v. 13, n. 2, p. 113–129, 1979.

BÖGL, M.; DOERNER, K. F.; PARRAGH, S. N. The school bus routing and scheduling problem with transfers. *Networks*, v. 65, n. 2, p. 180–203, 2015.

BOWERMAN, R.; HALL, B.; CALAMAI, P. A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: Formulation and solution method. *Transportation Research Part A*, v. 29, n. 2, p. 107–123, 1995.

- BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. Brazilian logistics: a time for transition. *Gestão & Produção*, SciELO Brasil, v. 4, n. 2, p. 130–139, 1997.
- BRAÇA, J.; BRAMEL, J.; POSNER, B.; SIMCHI-LEVI, D. A computerized approach to the new york cityschool bus routing problem. *IIE Transactions*, v. 29, n. 8, p. 693–702, 1997.
- BUTT, M. A.; LI, S.; JAVED, N. Towards co-ppgis—a collaborative public participatory gis-based measure for transparency in housing schemes: a case of lahore, pakistan. *Applied Geomatics*, Springer, v. 8, n. 1, p. 27–40, 2016.
- CACERES, H.; BATTÀ, R.; HE, Q. School bus routing with stochastic demand and duration constraints. *Transportation Science*, INFORMS, v. 51, n. 4, p. 1349–1364, 2017.
- CAMPBELL, J. F.; NORTH, J. W.; ELLEGOOD, W. A. Modeling mixed load school bus routing. In: . Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 3–30.
- CARVALHO, W. L.; CRUZ, R. O. M. da; CÂMARA, M. T.; ARAGÃO, J. J. G. de. Rural school transportation in emerging countries: The brazilian case. *Research in transportation economics*, Elsevier, v. 29, n. 1, p. 401–409, 2010.
- CDTE/SUPAD/SUBIT/SEEDUC-RJ. *Cronograma para Contratação de Transporte Complementar Rural nº 02*. [S.l.], 2018.
- CHAPLEAU, L.; FERLAND, J.-A.; ROUSSEAU, J.-M. Clustering for routing in densely populated areas. *European Journal of Operational Research*, v. 20, n. 1, p. 48–57, 1985.
- CHEN, D.-S.; KALLSEN, H. A.; CHEN, H.-C.; TSENG, V.-C. A bus routing system for rural school districts. *Computers & Industrial Engineering*, v. 19, n. 1, p. 322–325, 1990.
- CHEN, X.; KONG, Y.; DANG, L.; HOU, Y.; YE, X. Exact and metaheuristic approaches for a bi-objective school bus scheduling problem. *PLOS ONE*, Public Library of Science, v. 10, n. 7, p. 1–20, 2015.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Oper. Res.*, INFORMS, Maryland, USA, v. 12, n. 4, p. 568–581, 1964.
- COLONI, A.; DORIGO, M.; MANIEZZO, V. *Distributed Optimization by Ant Colonies*. 1991.
- CONCEICAO, S. V. *A mixed load rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: a study for the Brazilian problem*. Tese (Doutorado) — UFMG, 2015.
- CORBERÁN, A.; FERNÁNDEZ, E.; LAGUNA, M.; MARTÍ, R. Heuristic solutions to the problem of routing school buses with multiple objectives. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 4, p. 427–435, 2002.

- CORMEN, T. H.; LEISERSON, C. E.; RIVEST, R. L.; STEIN, C. Introduction to algorithms, third edition. The MIT Press, 2009.
- DESAULNIERS, G.; DESROSIERS, J.; SOLOMON, M. M. *Column generation*. [S.l.]: Springer, 2005.
- DESROSIERS, J.; FERLAND, J.; ROUSSEAU, J.-M.; LAPALME, G.; CHAPLEAU, L. *An Overview of a School Busing System*. [S.l.]: North-Holland, 1981.
- DESROSIERS, J.; FERLAND, J.; ROUSSEAU, J.-M.; LAPALME, G.; CHAPLEAU, L. *TRANSCOL - a Multiperiod School Bus Routing and Scheduling System*. [S.l.]: North-Holland, 1986.
- DÍAZ-PARRA, O.; RUIZ-VANOYE, J. A.; BUENABAD-ARIAS, M. de los Á.; SAENZ, A. C. *Vertical Transfer Algorithm for the School Bus Routing Problem*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- DULAC, G.; FERLAND, J. A.; FORGUES, P. A. School bus routes generator in urban surroundings. *Computers & Operations Research*, v. 7, n. 3, p. 199–213, 1980.
- EL-SHERBENY, N. A. Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University - Science*, v. 22, n. 3, p. 123–131, 2010.
- ERDOGAN, G. An open source spreadsheet solver for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 84, p. 62–72, 2017.
- FARAJ, M. F.; SARUBBI, J. F. M.; SILVA, C. M.; PORTO, M. F.; NUNES, N. T. R. A real geographical application for the school bus routing problem. *IEEE*, p. 2762–2767, 2014.
- FAZENDA, M. da. *Relatório de Análise Econômica dos Gastos Públicos Federais*. [S.l.], 2016.
- FNDE. *Manual de regulação do transporte escolar rural*. Brasília, DF, 2010.
- FOSTER, B. A.; RYAN, D. M. An integer programming approach to the vehicle scheduling problem. *Journal of the Operational Research Society*, v. 27, n. 2, p. 367–384, 1976.
- FU, Z.; EGGLESE, R.; LI, L. Y. A new tabu search heuristic for the open vehicle routing problem. *Journal of the operational Research Society*, Springer, v. 56, n. 3, p. 267–274, 2005.
- FÜGENSCHUH, A. Solving a school bus scheduling problem with integer programming. *European Journal of Operational Research*, v. 193, n. 3, p. 867–884, 2009.
- GAVISH, B.; SHLIFER, E. An approach for solving a class of transportation scheduling problems. *European Journal of Operational Research*, v. 3, n. 2, p. 122–134, 1979.

- GEIPOT. *Avaliação preliminar do transporte rural: destaque para o segmento escolar*. [S.l.], 1995.
- GENDREAU, M.; HERTZ, A.; LAPORTE, G. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management Science*, INFORMS, v. 40, n. 10, p. 1276–1290, 1994.
- GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y. *Handbook of metaheuristics*. [S.l.]: Springer, 2010.
- GOLDBARG, M.; LUNA, H. *Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos*. [S.l.]: CAMPUS - RJ, 2005.
- GOOGLE. *Termos de Serviço adicionais do Google Maps/Google Earth*. 2015. Disponível em: <https://www.google.com/intl/pt-BR_br/help/terms_maps.html>. Acesso em: 15/02/2018.
- GOOGLE DEVELOPERS. *Primeiros passos*. 2017. Disponível em: <<https://developers.google.com/maps/documentation/geocoding/start?hl=pt-br>>. Acesso em: 15/01/2018.
- HARGROVES, B. T.; DEMETSKY, M. J. A computer assisted school bus routing strategy: A case study. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 15, n. 6, p. 341–345, 1981.
- HEINEN, F. S. O. M. R. Algoritmos genéticos aplicados ao problema de roteamento de veículos. *Hífen*, v. 30, n. 58, 2006.
- IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - Cidades*. 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br>>. Acesso em: 11/11/2017.
- JÚNIOR, J. C. d. O. S.; ALEXANDRE, R. F.; MONTEIRO, B.; VASCONCELOS, J. A. de. Refinamento de soluções ótimas para o problema de roteamento de veículos escolares. 2017.
- KANG, M.; KIM, S.-K.; FELAN, J. T.; CHOI, H. R.; CHO, M. Development of a genetic algorithm for the school bus routing problem. 2015.
- KINABLE, J.; SPIEKSMAN, F.; BERGHE, G. V. School bus routing—a column generation approach. *International Transactions in Operational Research*, v. 21, n. 3, p. 453–478, 2014.
- KUMAR, Y.; JAIN, S. School bus routing based on branch and bound approach. p. 1–4, 2015.
- LAPORTE, G. The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms. *European Journal of Operational Research*, v. 59, n. 3, p. 345–358, 1992.
- LAPORTE, G.; GENDREAU, M.; POTVIN, J.-Y.; SEMET, F. Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research*, v. 7, n. 4, p. 285–300, 2000.

- LI, F.; GOLDEN, B.; WASIL, E. The open vehicle routing problem: Algorithms, large-scale test problems, and computational results. *Computers e Operations Research*, Elsevier, Oxford, UK, v. 34, n. 10, p. 2918–2930, 2007.
- LI, L. Y. O.; FU, Z. The school bus routing problem: a case study. *Journal of the Operational Research Society*, v. 53, n. 5, p. 55–558, 2002.
- LIMA, F. M. de S.; PEREIRA, D. S. D.; CONCEIÇÃO, S. V. da; CAMARGO, R. S. de. A multi-objective capacitated rural school bus routing problem with heterogeneous fleet and mixed loads. *4OR*, v. 15, n. 4, p. 359–386, 2017.
- LIMA, F. M. S. *A mixed load rural school bus routing problem with heterogeneous fleet: A study for the Brazilian problem*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- LYSGAARD, J.; LETCHFORD, A. N.; EGGLESE, R. W. A new branch-and-cut algorithm for the capacitated vehicle routing problem. *Mathematical Programming*, Springer, v. 100, n. 2, p. 423–445, 2004.
- MARQUES, H. R.; MANFROI, J.; CASTILHO, M. A. d.; NOAL, M. L. Metodologia da pesquisa e do trabalho científico. *Campo Grande: UCDB*, p. 55, 2006.
- MARTINELLI, R. *Exact Algorithms for Arc and Node Routing Problems*. Tese (Doutorado) — PhD thesis, Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
- MATIAS-PEREIRA, J. *Manual de metodologia da pesquisa científica*. [S.l.]: Atlas, 2016.
- MITCHELL, T. M. Machine learning. *New York*, 1997.
- MUSHI, A. R.; MUJUNI, E.; NGONYANI, B. Optimizing schedules for school bus routing problem: the case of dar es salaam schools. *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, International Journal of Advanced Research in Computer Science, v. 6, n. 1, 2015.
- NEWTON, R. M.; THOMAS, W. H. Design of school bus routes by computer. *Socio-Economic Planning Sciences*, v. 3, n. 1, p. 75–85, 1969.
- NEWTON, R. M.; THOMAS, W. H. Bus routing in a multi-school system. *Computers & Operations Research*, v. 1, n. 2, p. 213 – 222, 1974.
- NOVAES, A.; PASSAGLIA, E.; VALENTE A. E VIEIRA, H. *Gerenciamento de Transporte e Frotas*. 3. ed. São Paulo: Pioneira Thomson Learning., 2016.
- OPENSTREETMAP. *About*. 2018. Disponível em: <<https://www.openstreetmap.org/about>>. Acesso em: 15/02/2018.
- OSMAN, I. H. Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, v. 41, n. 4, p. 421–451, 1993.

- OZBAYGIN, G.; KARASAN, O. E.; SAVELSBERGH, M.; YAMAN, H. A branch-and-price algorithm for the vehicle routing problem with roaming delivery locations. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 100, p. 115–137, 2017.
- PARK, J.; KIM, B.-I. The school bus routing problem: A review. *European Journal of Operational Research*, v. 202, n. 2, p. 311–319, 2010.
- PARK, J.; TAE, H.; KIM, B.-I. A post-improvement procedure for the mixed load school bus routing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 217, n. 1, p. 204–213, 2012.
- PARK, J.; TAE, H.; KIM, B.-I. A post-improvement procedure for the mixed load school bus routing problem. *European Journal of Operational Research*, v. 217, n. 1, p. 204–213, 2012.
- PARK, S.-H.; KIM, E. Middleware for translating urban gis information for building a design society via general bim tools. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, Architectural Institute of Japan, v. 15, n. 3, p. 447–454, 2016.
- PISINGER, D.; ROPKE, S. A general heuristic for vehicle routing problems. *Computers & Operations Research*, v. 34, n. 8, p. 2403–2435, 2007.
- PRATA, P. A. *Proposta de um algoritmo para o problema de roteirização do transporte escolar rural*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 2009.
- QGIS. *QGIS - A liderança do SIG de código aberto*. 2015. Disponível em: <https://www.qgis.org/pt_BR/site/about/index.html>. Acesso em: 15/02/2018.
- RENAUD, J.; BOCTOR, F. F.; LAPORTE, G. An improved petal heuristic for the vehicle routing problem. *Journal of the operational Research Society*, Springer, v. 47, n. 2, p. 329–336, 1996.
- RIPPLINGER, D. Rural school vehicle routing problem. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 1922, p. 105–110, 2005.
- ROPKE, S.; PISINGER, D. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, INFORMS, Maryland, USA, v. 40, n. 4, p. 455–472, 2006.
- RUSSELL, R. A.; MORREL, R. B. Routing special-education school buses. *Interfaces*, v. 16, n. 5, p. 56–64, 1986.
- SANTANA, L.; RAMIRO, E.; CARVAJAL, J. d. J. R. A hybrid column generation and clustering approach to the school bus routing problem with time windows. *Ingeniería*, v. 20, n. 1, p. 101–117, 2015.
- SAVAS, E. S. On equity in providing public services. *Management Science*, v. 24, n. 8, p. 800–808, 1978.

- SCHITTEKAT, P.; KINABLE, J.; SORENSEN, K.; SEVAUX, M.; SPIEKSMAN, F.; SPRINGAEL, J. A metaheuristic for the school bus routing problem with bus stop selection. Pittsburgh, PA, v. 229, n. 2, p. 518–528, 2013.
- SCHITTEKAT, P.; SEVAUX, M.; SORENSEN, K. A mathematical formulation for a school bus routing problem. v. 2, p. 1552–1557, 2006.
- SEDGEWICK, R.; WAYNE, K. *Algorithms*. 4th. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2011.
- SEEDUC-RJ. *Resolução SEEDUC nº 5506*. [S.l.], 2017.
- SHAFABI, A.; WANG, Z.; HAGHANI, A. Solving the school bus routing problem by maximizing trip compatibility. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, v. 2667, p. 17–27, 2017.
- SHAW, P. Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, p. 417–431, 1998.
- SIQUEIRA, P. H.; SOUZA, L. V. de. Métodos heurísticos aplicados na construção de roteiros de transporte escolar para o estado do paraná. *TRANSPORTES*, v. 20, n. 3, p. 28–40, 2012.
- SPACE; ATLANTIC, N. W. S. C. *Geographic Information System Software Selection Guide*. [S.l.], 2013.
- SPADA, M.; BIERLAIRE, M.; LIEBLING, T. M. Decision-aiding methodology for the school bus routing and scheduling problem. *Transportation Science*, v. 39, n. 4, p. 477–490, 2005.
- SUBIT/SEEDUC-RJ. *Transporte Escolar Rural ou em área de Difícil Acesso*. [S.l.], 2010.
- SWERSEY, A. J.; BALLARD, W. Scheduling school buses. *Management Science*, v. 30, n. 7, p. 844–853, 1984.
- SZTUTMAN, P. *Análise da qualidade posicional das bases do Google Maps, Bing Maps e da Esri para referência espacial em projetos em SIG: aplica o para o município de São Paulo*. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2014.
- TEDESCO, G. M. I. *Metodologia para a elabora o do diagnóstico de um sistema de transportes*. Disserta o (Mestrado), 2010.
- THANGIAH, S.; NYGARD, K. School bus routing using genetic algorithms. v. 1707, p. 387–398, 1992.
- VAIRA, G. *Genetic Algorithm for Vehicle Routing Problem*. Tese (Doutorado) — Vilnius University, 2014.
- VERDERBER, W. J. Automated pupil transportation. *Computers & Operations Research*, v. 1, n. 2, p. 235 – 245, 1974.

VIEIRA, B. S. *Uma Meta-Heurística Adaptive Large Neighborhood Search com Mecanismos de Paralelismo, Detecção de Estagnação e Perturbações para o Problema De Roteamento De Veículos com Frota Heterogênea, Periódico e Multi-Trips*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.

YAO, B.; CAO, Q.; WANG, Z.; HU, P.; ZHANG, M.; YU, B. A two-stage heuristic algorithm for the school bus routing problem with mixed load plan. *Transportation Letters*, Taylor & Francis, v. 8, n. 4, p. 205–219, 2016.

ZAMBONI, L. d. S. Técnicas de roteirização de veículos aplicadas ao transporte escolar. *Técnicas de Roteirização de Veículos aplicadas ao Transporte Escolar*, Universidade Federal do Paraná Curitiba, 1997.

ZHANG, W. Truncated branch-and-bound: A case study on the asymmetric tsp. v. 160166, 1993.

A

Instrução para Obtenção de Coordenadas no Google Maps

Introdução

O objetivo deste documento é descrever como obter as coordenadas de um local a partir do site do Google Maps em dois casos, primeiro quando o endereço disponível é encontrado pelo sistema e, segundo, quando o endereço disponível não é encontrado ou o endereço encontra-se incompleto ou indisponível.

Em todos os casos, o usuário deve primeiramente abrir um browser (os exemplos aqui serão mostrados utilizando o browser Google Chrome) e digitar o endereço do site do Google Maps: maps.google.com.

Caso 1 – Quando o Endereço é Encontrado

Iniciaremos procurando um endereço no site. No exemplo (Figura A.1), o endereço utilizado foi “Av. Prof. Pereira Reis, 119 – Santo Cristo, Rio de Janeiro”. O Google Maps permite que qualquer parte de endereço seja utilizada, desde o mais completo, até mesmo somente CEPs ou bairros. Além disso, conforme o usuário digita o endereço, várias sugestões aparecem, facilitando a busca e reduzindo a quantidade de informação que deve ser digitada.

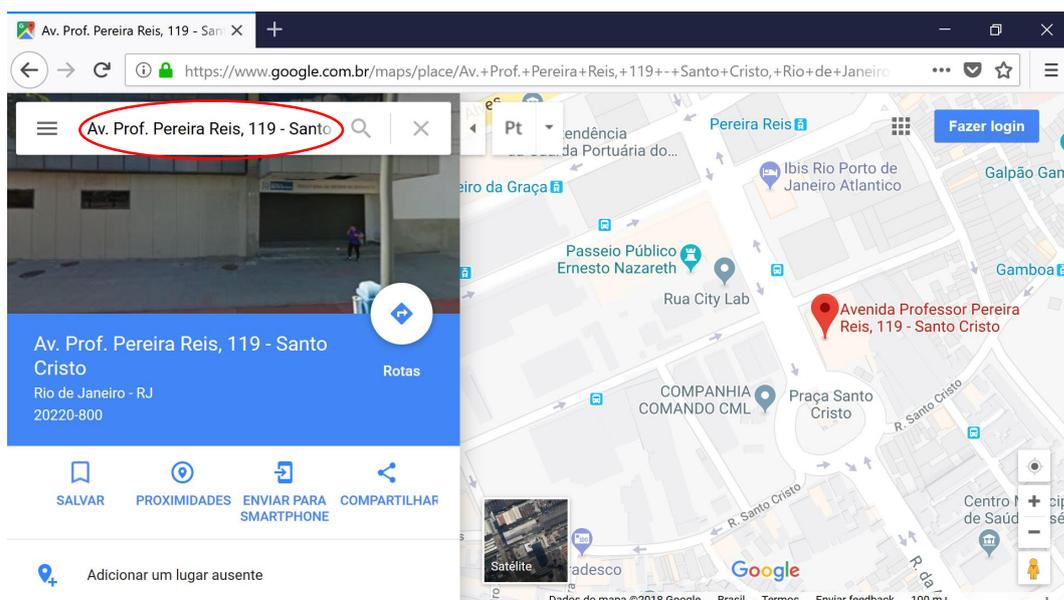


Figura A.1: Resultado da pesquisa no Google Maps
Fonte: Autor, 2018.

Perceba na Figura A.1 que quando o endereço é localizado, um balão vermelho aparece no mapa com o endereço correspondente. Quando isto acontece, não parece ser uma tarefa fácil encontrar as coordenadas do balão vermelho. Porém, como podemos ver na próxima imagem, quando corremos o texto da barra de endereço até o final, não é muito difícil de identificar algo parecido com as coordenadas, separadas por “!4d”. Selecione os números desde o primeiro sinal de menos até o final do segundo número, copie e cole em um editor de textos.

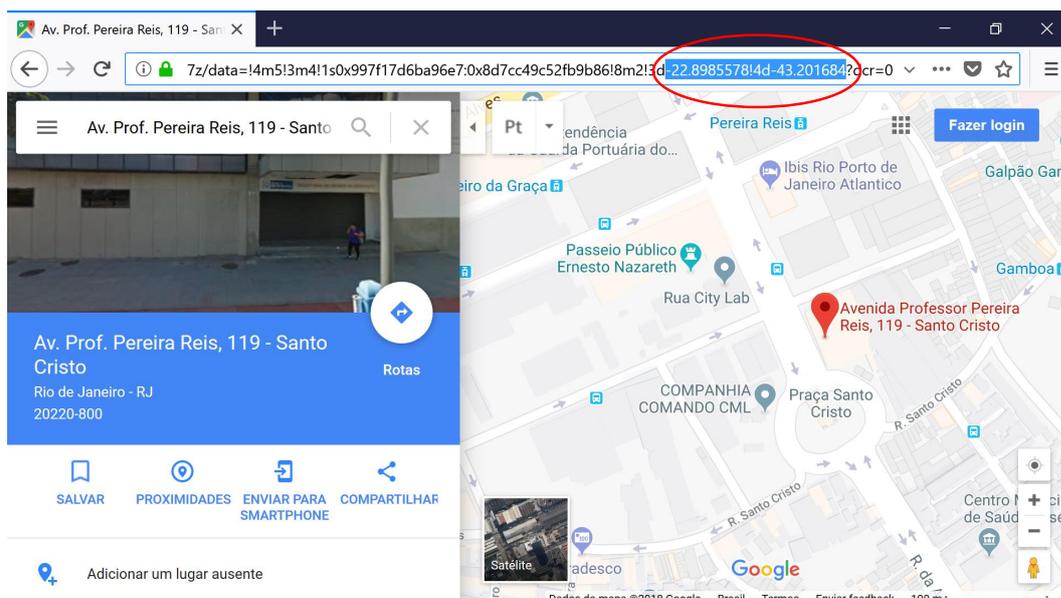


Figura A.2: Resultado da pesquisa no Google Maps
 Fonte: Autor, 2018.

No editor de textos, substitua o separador “!4d” por uma vírgula. Copie e cole de volta na barra de pesquisa do Google Maps para conferir se a coordenada cai no local desejado, igual ao encontrado utilizando o endereço:

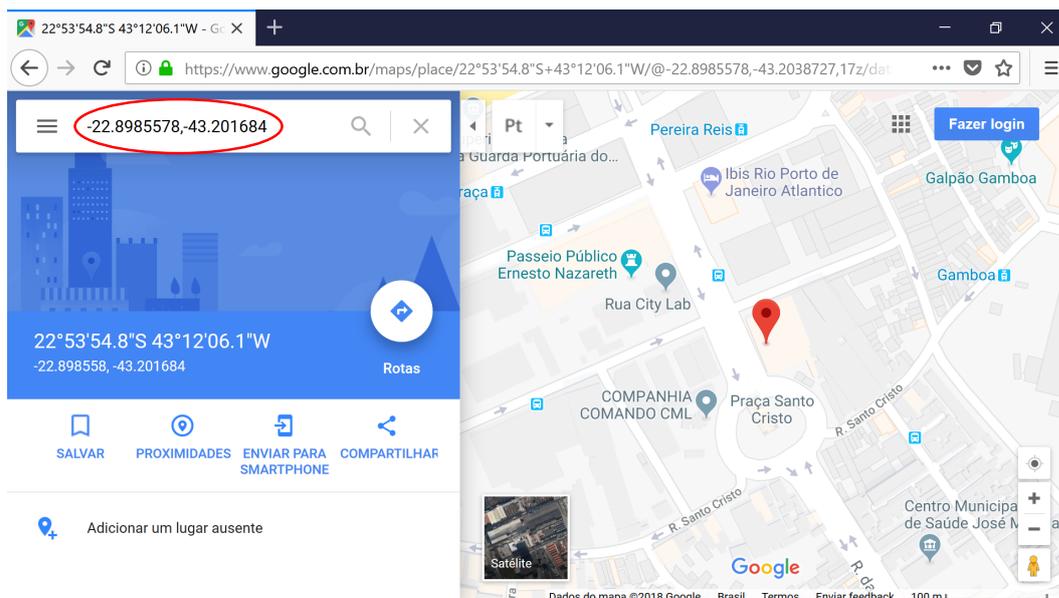


Figura A.3: Resultado da pesquisa no Google Maps

Fonte: Autor, 2018.

É importante notar que no começo da barra de endereço do browser, aparecem dois números que lembram bastante coordenadas. Porém, estas coordenadas são utilizadas pelo sistema para posicionar o mapa no browser, e não têm relação com o ponto pesquisado.

Caso 2 - Quando o Endereço não é Encontrado:

Quando o endereço não é encontrado, está incompleto ou indisponível, é necessário que uma pessoa que conheça o local pesquisado marque no mapa o ponto correto. Conforme dito anteriormente, o Google Maps permite que sejam feitas buscas aproximadas, utilizando partes do endereço, como CEPs, bairros, nomes de comércios ou regiões conhecidas.

A partir do momento que o ponto foi localizado no mapa, o usuário deve efetuar um clique e aguardar a aparição de um círculo cinza, conforme exibido na Figura A.4. Caso o círculo cinza não apareça o usuário deve repetir a operação, mas sem clicar rapidamente duas vezes, senão o mapa fará um zoom.

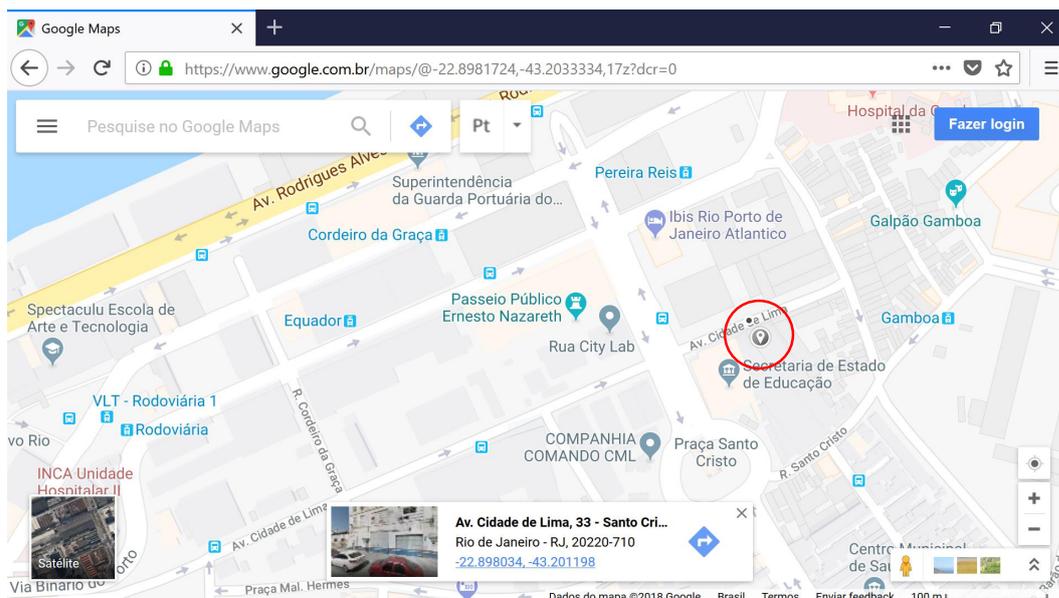


Figura A.4: Resultado da pesquisa no Google Maps
Fonte: Autor, 2018.

Assim que o círculo aparecer, uma ficha de informações aparecerá na base do mapa, com um endereço aproximado (caso seja possível) e as coordenadas. Como não há como copiar estas coordenadas por seleção, a recomendação é que o usuário clique nelas, conforme exibido na próxima figura.

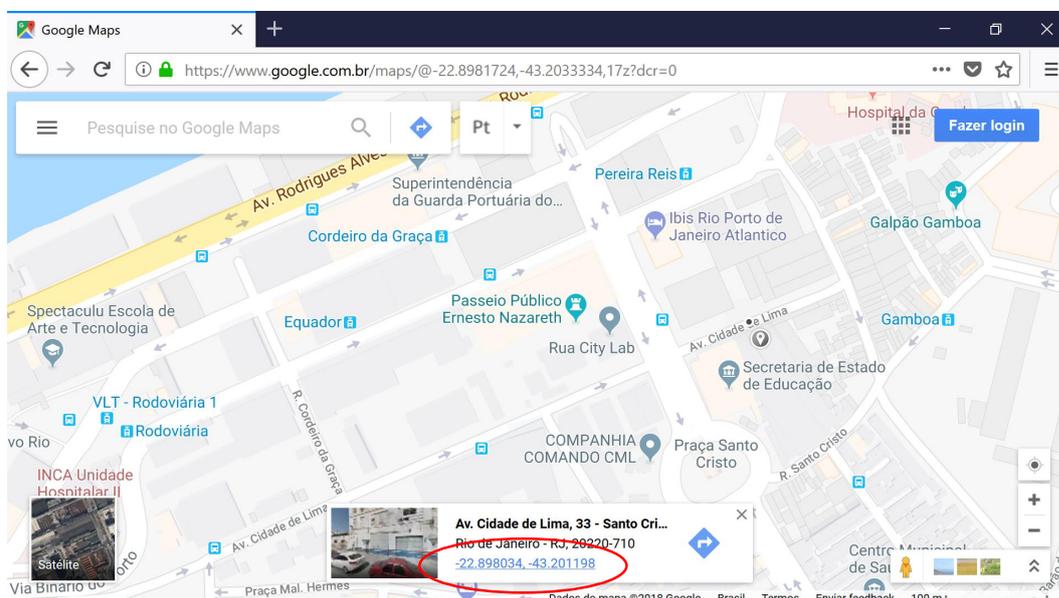


Figura A.5: Resultado da pesquisa no Google Maps
Fonte: Autor, 2018.

Ao clicar nas coordenadas, o Google Maps simula uma busca conforme pode ser visto na próxima figura. Perceba que no ponto clicado onde anteriormente aparecia o círculo cinza, agora aparece um balão vermelho:

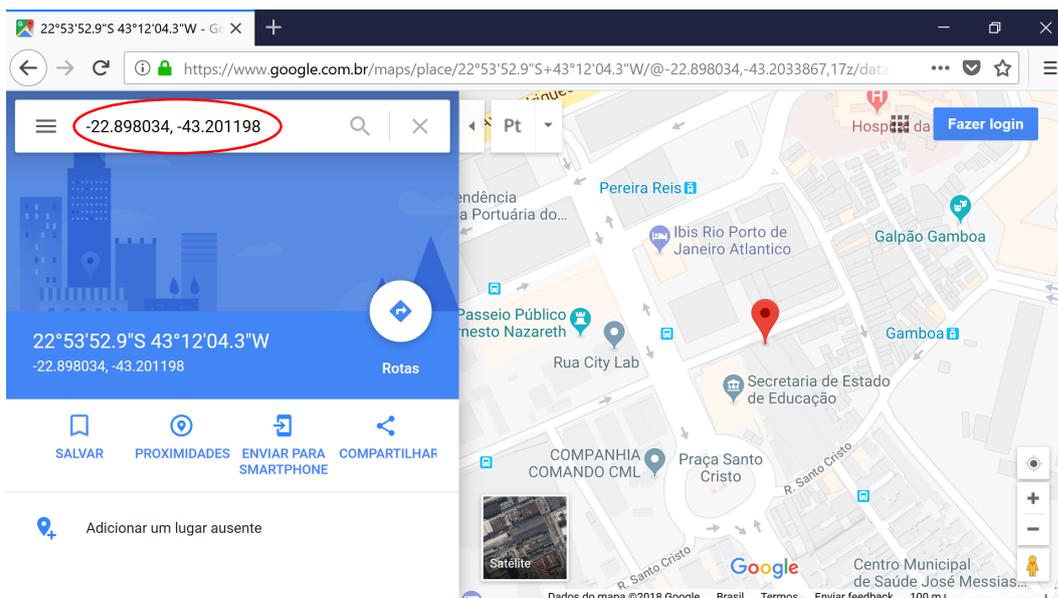


Figura A.6: Resultado da pesquisa no Google Maps
 Fonte: Autor, 2018.

Para finalizar, o usuário pode selecionar as coordenadas, copiá-las e colá-las onde necessário, conforme ilustra a Figura A.7.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1613372/CA

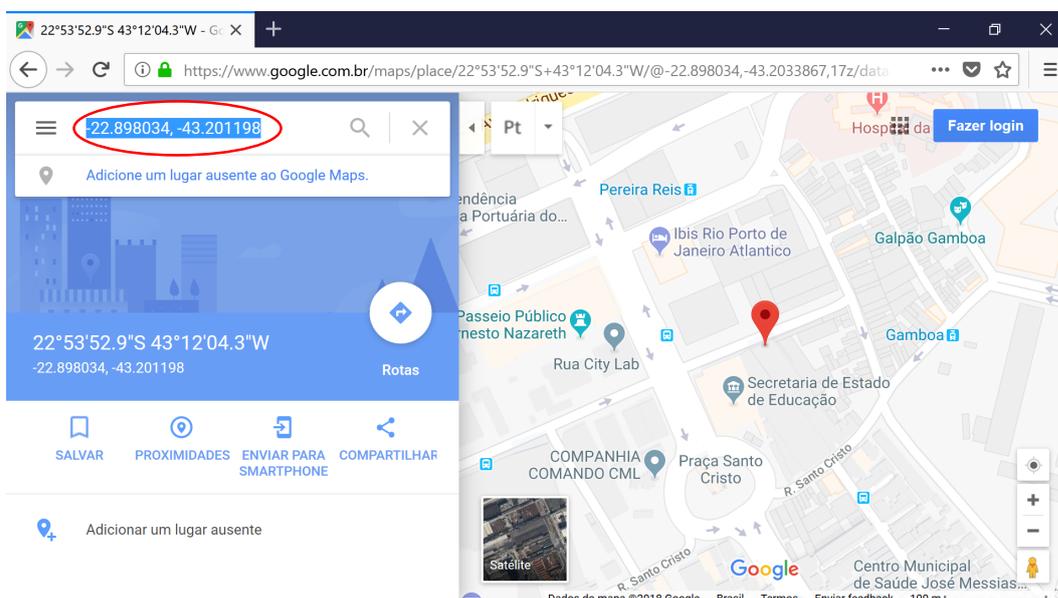


Figura A.7: Resultado da pesquisa no Google Maps
 Fonte: Autor, 2018.

B

Resultado da Geocodificação das Unidades Escolares

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
1	-22.801296	-42.425373	419	-22.818688	-42.995965	837	-22.911546	-43.18474
2	-22.869463	-42.339167	420	-22.793743	-42.983559	838	-22.919008	-43.362599
3	-22.785018	-42.364801	421	-22.889272	-42.989471	839	-22.921496	-43.196479
4	-22.875628	-42.338462	422	-22.818145	-43.017475	840	-22.998971	-43.375546
5	-22.865602	-42.341083	423	-22.825451	-42.916669	841	-22.963586	-43.338297
6	-22.870755	-42.350937	424	-22.843665	-42.999244	842	-22.962049	-43.177388
7	-22.72749	-42.258062	425	-22.843195	-43.015781	843	-22.953591	-43.172445
8	-22.850542	-42.332955	426	-22.831524	-42.960811	844	-22.896553	-43.244344
9	-22.749442	-41.881651	427	-22.795573	-43.02803	845	-22.914367	-43.237311
10	-22.967014	-42.023145	428	-22.812256	-43.041088	846	-22.911458	-43.266977
11	-22.952223	-42.037242	429	-22.803509	-43.01237	847	-22.90362	-43.242606
12	-22.964096	-42.027096	430	-22.859121	-43.030215	848	-22.992865	-43.250807
13	-22.883252	-42.016618	431	-22.806763	-42.946563	849	-22.955808	-43.390731
14	-22.874122	-42.052058	432	-22.855408	-43.096767	850	-22.719287	-43.375119
15	-22.839821	-42.013118	433	-22.830784	-43.040153	851	-22.726902	-43.370587
16	-22.89306	-42.045697	434	-22.802364	-43.048839	852	-22.745986	-43.414207
17	-22.900651	-42.041206	435	-22.829141	-43.055996	853	-22.725163	-43.404997
18	-22.866637	-42.016894	436	-22.821396	-43.058833	854	-22.753853	-43.373373
19	-22.607819	-42.005821	437	-22.823339	-43.003036	855	-22.724761	-43.413222
20	-22.824028	-42.008822	438	-22.845137	-43.073926	856	-22.737007	-43.420706
21	-22.840586	-42.022364	439	-22.862082	-42.996058	857	-22.758596	-43.354861
22	-22.873607	-42.018558	440	-22.792376	-42.991269	858	-22.708664	-43.341021
23	-22.879001	-42.016356	441	-22.833995	-42.996432	859	-22.725197	-43.35697
24	-22.842608	-42.225927	442	-22.829184	-43.014602	860	-22.765794	-43.409932
25	-22.834805	-42.222316	443	-22.863012	-43.009543	861	-22.707172	-43.334151
26	-22.947372	-42.912495	444	-22.846036	-43.053742	862	-22.758597	-43.412054
27	-22.915808	-42.806798	445	-22.851323	-42.998225	863	-22.749215	-43.419833
28	-22.911386	-42.932109	446	-22.852052	-43.093756	864	-22.748732	-43.404589
29	-22.917998	-42.818828	447	-22.803263	-43.004564	865	-22.738722	-43.347349
30	-22.933408	-42.889889	448	-22.816737	-42.956398	866	-22.742019	-43.38971
31	-22.933952	-42.824596	449	-22.856231	-43.025108	867	-22.747655	-43.343389
32	-22.910382	-42.835877	450	-22.832558	-43.074291	868	-22.724	-43.380909
33	-22.916738	-42.814377	451	-22.844822	-43.090011	869	-22.712148	-43.326422
34	-22.918607	-42.935235	452	-22.796534	-43.014266	870	-22.715971	-43.379967
35	-22.951218	-43.091675	453	-22.808985	-42.992341	871	-22.724544	-43.336365
36	-22.903141	-43.125312	454	-22.811014	-43.065941	872	-22.758658	-43.365179
37	-22.903186	-43.10114	455	-22.793503	-42.95037	873	-22.744081	-43.417634
38	-22.883197	-43.110855	456	-22.82255	-42.984114	874	-22.720158	-43.395856
39	-22.914759	-43.093933	457	-22.898444	-42.985738	875	-22.717144	-43.378322
40	-22.873326	-43.07504	458	-22.797625	-42.982091	876	-22.71633	-43.410794
41	-22.862465	-43.09245	459	-22.813269	-42.962649	877	-22.740936	-43.398759
42	-22.876862	-43.047875	460	-22.835827	-43.006182	878	-22.733327	-43.359764
43	-22.885294	-43.063049	461	-22.84131	-43.07254	879	-22.733671	-43.390339
44	-22.907557	-42.97128	462	-22.782899	-43.028315	880	-22.711331	-43.423274
45	-22.909927	-43.078051	463	-22.819	-43.057399	881	-22.74687	-43.399243
46	-22.876719	-43.082136	464	-22.784025	-43.01203	882	-22.720533	-43.368398
47	-22.932666	-43.114526	465	-22.861929	-43.005209	883	-22.743336	-43.379916
48	-22.904999	-43.089722	466	-22.807659	-43.007509	884	-22.715953	-43.386788
49	-22.881367	-43.090018	467	-22.830245	-42.998393	885	-22.762102	-43.409421
50	-22.904978	-43.108465	468	-22.850687	-42.951263	886	-22.748293	-43.41346
51	-22.882861	-43.106111	469	-22.834364	-43.006782	887	-22.748406	-43.384893
52	-22.910164	-43.067982	470	-22.844189	-43.092021	888	-22.741667	-43.396923
53	-22.883555	-43.085528	471	-22.845192	-42.941636	889	-22.780091	-43.435996
54	-22.90224	-43.107248	472	-22.842126	-43.023172	890	-22.783395	-43.427329
55	-22.933787	-43.098365	473	-22.830974	-42.962409	891	-22.791849	-43.437661
56	-22.934044	-43.099762	474	-22.770097	-43.056085	892	-22.798331	-43.43134
57	-22.87105	-43.098999	475	-22.797107	-43.013631	893	-22.772737	-43.434523
58	-22.90672	-43.057067	476	-22.848124	-42.991843	894	-22.78025	-43.410201
59	-22.891037	-43.120653	477	-22.872108	-43.018832	895	-22.78231	-43.424466
60	-22.952774	-43.028195	478	-22.792536	-43.045454	896	-22.778857	-43.399115
61	-22.886326	-43.124607	479	-22.850482	-43.077626	897	-22.771255	-43.424481
62	-22.872555	-43.114472	480	-22.806129	-43.026151	898	-22.782606	-43.426326
63	-22.893546	-43.116011	481	-22.856231	-43.025108	899	-22.809598	-43.419306
64	-22.876974	-43.055758	482	-22.794578	-42.952699	900	-22.809634	-43.41161

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares (Cont.)

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
65	-22.910042	-42.985143	483	-22.824267	-43.054969	901	-22.805916	-43.401026
66	-22.952426	-43.023751	484	-22.865338	-43.272088	902	-22.792442	-43.410654
67	-22.933379	-43.097844	485	-22.816173	-43.340401	903	-22.810997	-43.398321
68	-22.907197	-43.056612	486	-22.825797	-43.321053	904	-22.819509	-43.411972
69	-22.8895	-43.096357	487	-22.900992	-43.295119	905	-22.820444	-43.419717
70	-22.869348	-43.103195	488	-22.844924	-43.339194	906	-22.82068	-43.423801
71	-22.898822	-43.092561	489	-22.81542	-43.225935	907	-22.814662	-43.433539
72	-22.891037	-43.120653	490	-22.909925	-43.293964	908	-22.818985	-43.426415
73	-22.862737	-43.099957	491	-22.864596	-43.247635	909	-22.808246	-43.426667
74	-22.8995	-43.12729	492	-22.872312	-43.276671	910	-22.80963	-43.40574
75	-22.893482	-43.116402	493	-22.845524	-43.283893	911	-22.805065	-43.426854
76	-22.718222	-42.694165	494	-22.891224	-43.294258	912	-22.790323	-43.382277
77	-22.711858	-42.620991	495	-22.835646	-43.288393	913	-22.777039	-43.388546
78	-22.788222	-42.538586	496	-22.876267	-43.343437	914	-22.797081	-43.369731
79	-22.706774	-42.611077	497	-22.89804	-43.275725	915	-22.773029	-43.389135
80	-22.7183	-42.615628	498	-22.878892	-43.352432	916	-22.768508	-43.361891
81	-22.716653	-42.642394	499	-22.848665	-43.26881	917	-22.794487	-43.334675
82	-22.707391	-42.625551	500	-22.875229	-43.338141	918	-22.777405	-43.375908
83	-22.859484	-42.057864	501	-22.868657	-43.332789	919	-22.789442	-43.391333
84	-22.836441	-42.10294	502	-22.85963	-43.357222	920	-22.812769	-43.389143
85	-22.831768	-42.097208	503	-22.837814	-43.279754	921	-22.781602	-43.37262
86	-22.861432	-42.108595	504	-22.82339	-43.331162	922	-22.791501	-43.36314
87	-22.861681	-42.044845	505	-22.821557	-43.173787	923	-22.797342	-43.366401
88	-22.833628	-42.10059	506	-22.806404	-43.319338	924	-22.804847	-43.370502
89	-22.833628	-42.10059	507	-22.887219	-43.287953	925	-22.796251	-43.386864
90	-22.843359	-42.103004	508	-22.790545	-43.182549	926	-22.777761	-43.345697
91	-22.847095	-42.064129	509	-22.82708	-43.306597	927	-22.788393	-43.358616
92	-22.920499	-42.510685	510	-22.90275	-43.290433	928	-22.759094	-43.333732
93	-22.920801	-42.595278	511	-22.864207	-43.366613	929	-22.781099	-43.376981
94	-22.892805	-42.471121	512	-22.829038	-43.346616	930	-22.795139	-43.332291
95	-22.93119	-42.491863	513	-22.842693	-43.281544	931	-22.801688	-43.386259
96	-22.871193	-42.464357	514	-22.829814	-43.275305	932	-22.789636	-43.344296
97	-22.890907	-42.470895	515	-22.902127	-43.284725	933	-22.767862	-43.382101
98	-22.928604	-42.54787	516	-22.841238	-43.349331	934	-22.781915	-43.399722
99	-22.229788	-43.100475	517	-22.883754	-43.307997	935	-22.769473	-43.365553
100	-22.466276	-43.82954	518	-22.838027	-43.299943	936	-22.763288	-43.330078
101	-22.476156	-43.820143	519	-22.86287	-43.268044	937	-22.7981	-43.383271
102	-22.494161	-43.831282	520	-22.909393	-43.284951	938	-22.788086	-43.364946
103	-22.465602	-43.825825	521	-22.842012	-43.268217	939	-22.803224	-43.398243
104	-22.479199	-43.839351	522	-22.84851	-43.30413	940	-22.797643	-43.366386
105	-22.488186	-43.817147	523	-22.873094	-43.263156	941	-22.763287	-43.356176
106	-22.48966	-43.815262	524	-22.798746	-43.202066	942	-22.792719	-43.362194
107	-22.494161	-43.831282	525	-22.845946	-43.338541	943	-22.801603	-43.354005
108	-22.480196	-44.045285	526	-22.873452	-43.29744	944	-22.789491	-43.401972
109	-22.457827	-43.81886	527	-22.82954	-43.348361	945	-22.781651	-43.396599
110	-22.45815	-43.809066	528	-22.858181	-43.373883	946	-22.811925	-43.388033
111	-22.483583	-43.832134	529	-22.843079	-43.326228	947	-22.773495	-43.390385
112	-22.029278	-43.204785	530	-22.872917	-43.262646	948	-22.771945	-43.372966
113	-22.551181	-43.677732	531	-22.825215	-43.316318	949	-22.792281	-43.40009
114	-22.492152	-43.603989	532	-22.870512	-43.286191	950	-22.793936	-43.37335
115	-22.864314	-43.77935	533	-22.845667	-43.351754	951	-22.809825	-43.38843
116	-22.871443	-43.768769	534	-22.861079	-43.258347	952	-22.77892	-43.351364
117	-22.833675	-43.762864	535	-22.821815	-43.334195	953	-21.625775	-42.100199
118	-22.871945	-43.792772	536	-22.88499	-43.290955	954	-21.629473	-42.102106
119	-22.850564	-43.783051	537	-22.894868	-43.321831	955	-21.156767	-41.608931
120	-22.902915	-43.868289	538	-22.882517	-43.338081	956	-21.137086	-41.676754
121	-22.861575	-43.777582	539	-22.892308	-43.276532	957	-21.135845	-41.681222
122	-22.870898	-43.789747	540	-22.888306	-43.272491	958	-20.958038	-41.736364
123	-22.870898	-43.789747	541	-22.883967	-43.262863	959	-21.217948	-41.590417
124	-22.870578	-43.808033	542	-22.792686	-43.174444	960	-21.239094	-41.495055
125	-22.864743	-43.754237	543	-22.836296	-43.288156	961	-21.135788	-41.671941
126	-22.81507	-43.761207	544	-22.878798	-43.255409	962	-21.133945	-41.672457
127	-22.528912	-43.719587	545	-22.882219	-43.258844	963	-21.418559	-41.692512
128	-22.524198	-43.728754	546	-22.864347	-43.368224	964	-21.373741	-41.694843
129	-22.526626	-43.722962	547	-22.82885	-43.299502	965	-21.432553	-41.690623
130	-22.457737	-43.480691	548	-22.880466	-43.315106	966	-21.670871	-42.075916
131	-22.533878	-43.572481	549	-22.868194	-43.349643	967	-21.629923	-41.981492
132	-22.454488	-43.47189	550	-22.8103	-43.193855	968	-21.761887	-42.175863
133	-22.486093	-43.434487	551	-22.878705	-43.324418	969	-21.725138	-41.991863
134	-22.607608	-43.709569	552	-22.799486	-43.207157	970	-21.676555	-42.081062
135	-22.625795	-43.708167	553	-22.827518	-43.28585	971	-21.213929	-41.887131
136	-22.597484	-43.693201	554	-22.839116	-43.268116	972	-21.194866	-41.884935
137	-22.215556	-43.316345	555	-22.824839	-43.325882	973	-21.205865	-41.8904
138	-22.186887	-43.293617	556	-22.817533	-43.292887	974	-21.099198	-42.113653
139	-22.171473	-43.294714	557	-22.967802	-43.181489	975	-21.275621	-41.789884
140	-22.162025	-43.296491	558	-22.851603	-43.325354	976	-21.175899	-42.012793
141	-22.159286	-43.284108	559	-22.89266	-43.32437	977	-21.195975	-41.901957
142	-22.426779	-43.424393	560	-22.794414	-43.172971	978	-21.197364	-41.885228
143	-22.405847	-43.424088	561	-22.867934	-43.253227	979	-21.179672	-42.106033

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares (Cont.)

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
144	-22.320368	-43.401708	562	-22.863314	-43.372129	980	-21.204844	-41.904779
145	-22.41769	-43.419534	563	-22.826736	-43.307257	981	-21.216627	-41.877312
146	-22.209709	-43.618865	564	-22.883999	-43.322245	982	-21.318845	-41.626934
147	-22.170166	-43.58242	565	-22.846945	-43.246959	983	-21.204117	-41.90719
148	-21.994343	-42.912806	566	-22.827017	-43.287774	984	-21.185663	-41.911276
149	-22.029247	-42.792932	567	-22.901304	-43.311695	985	-21.200309	-41.897958
150	-21.995586	-42.914718	568	-22.900728	-43.273806	986	-21.212295	-42.115839
151	-22.036182	-42.990101	569	-22.870461	-43.35509	987	-21.41505	-42.194251
152	-21.892428	-42.708271	570	-22.807	-43.181332	988	-21.432043	-42.100361
153	-21.892428	-42.708271	571	-22.865879	-43.334777	989	-21.412474	-42.192516
154	-22.713257	-43.720106	572	-22.829187	-43.270527	990	-21.416878	-42.196874
155	-22.750727	-43.71398	573	-22.867461	-43.305899	991	-21.036958	-41.889181
156	-22.721006	-43.683493	574	-22.821601	-43.350344	992	-21.035578	-41.986382
157	-22.75308	-43.715901	575	-22.832369	-43.333737	993	-21.041375	-41.9823
158	-22.764433	-43.682197	576	-22.849047	-43.242015	994	-21.043558	-41.961975
159	-22.803225	-43.64683	577	-22.831617	-43.332872	995	-20.8225	-41.909728
160	-22.742889	-43.704642	578	-22.865816	-43.334497	996	-20.931219	-41.956944
161	-22.765394	-43.681783	579	-22.907171	-43.588673	997	-20.968177	-42.039419
162	-22.747738	-43.699488	580	-22.883027	-43.429661	998	-20.967617	-42.042824
163	-22.117238	-43.210349	581	-22.921721	-43.663959	999	-21.540342	-42.179637
164	-22.107522	-43.194866	582	-22.887481	-43.55791	1000	-21.533225	-42.184237
165	-22.14692	-43.103667	583	-22.911948	-43.612803	1001	-21.635419	-42.270875
166	-22.105344	-43.187579	584	-22.870622	-43.468938	1002	-21.658561	-42.339845
167	-22.115431	-43.193122	585	-22.926662	-43.694024	1003	-21.548252	-42.174269
168	-22.119327	-43.218141	586	-22.888841	-43.604605	1004	-21.468795	-42.036994
169	-22.091218	-43.215113	587	-22.922944	-43.692058	1005	-21.54809	-42.174374
170	-22.114633	-43.222226	588	-22.871769	-43.43279	1006	-21.359838	-41.942918
171	-22.114633	-43.222226	589	-22.840276	-43.380704	1007	-20.936111	-41.867825
172	-22.117829	-43.215924	590	-22.959143	-43.69043	1008	-21.415274	-41.812469
173	-22.289915	-43.927599	591	-22.963799	-43.609698	1009	-21.468307	-41.909111
174	-22.240461	-43.712155	592	-22.894264	-43.557837	1010	-21.571137	-41.922671
175	-22.093096	-43.831035	593	-22.837518	-43.399178	1011	-21.49795	-41.339852
176	-22.346569	-43.682777	594	-22.882884	-43.478176	1012	-21.897565	-41.290038
177	-22.246075	-43.701488	595	-22.859037	-43.536758	1013	-21.886877	-41.204779
178	-22.246399	-43.699524	596	-22.875836	-43.468026	1014	-21.748987	-41.317736
179	-22.230136	-44.067191	597	-22.827086	-43.403389	1015	-21.779212	-41.299806
180	-22.23819	-43.700804	598	-22.892791	-43.418671	1016	-21.830116	-41.230492
181	-22.243633	-43.701596	599	-23.001373	-43.638768	1017	-21.831938	-41.273862
182	-22.253461	-43.705719	600	-22.902844	-43.565835	1018	-21.819095	-41.297685
183	-22.244465	-43.70328	601	-22.867072	-43.446955	1019	-21.811467	-41.393739
184	-22.242951	-43.701156	602	-22.904583	-43.701366	1020	-21.94739	-41.134309
185	-22.244989	-43.713297	603	-22.88708	-43.435101	1021	-21.721484	-41.402174
186	-22.245105	-43.706293	604	-22.912901	-43.650915	1022	-21.721686	-41.323536
187	-22.419115	-43.754852	605	-22.906829	-43.571886	1023	-21.750783	-41.313038
188	-22.414038	-43.672361	606	-22.950579	-43.390661	1024	-21.271399	-41.446527
189	-22.409239	-43.6593	607	-22.91161	-43.575841	1025	-21.79632	-41.2864
190	-22.400708	-43.660886	608	-22.807784	-43.372318	1026	-21.714017	-41.308976
191	-22.758613	-43.365834	609	-22.846348	-43.373035	1027	-21.775121	-41.322745
192	-21.665596	-41.508259	610	-22.999443	-43.636444	1028	-21.778188	-41.305013
193	-21.731114	-41.283963	611	-22.902313	-43.550576	1029	-21.216532	-41.463554
194	-22.675541	-43.583576	612	-22.879527	-43.42669	1030	-21.737092	-41.326841
195	-22.899911	-43.703501	613	-22.917466	-43.558539	1031	-21.757541	-41.343152
196	-22.907892	-43.231489	614	-22.871241	-43.463983	1032	-21.751541	-41.342697
197	-22.843675	-43.485129	615	-22.849349	-43.487909	1033	-21.781883	-41.322221
198	-22.806202	-43.229364	616	-22.912026	-43.615065	1034	-21.763535	-41.338395
199	-22.849	-43.481331	617	-22.815753	-43.365256	1035	-21.754252	-41.334196
200	-22.839616	-43.478152	618	-22.880268	-43.467411	1036	-22.04069	-41.05257
201	-22.739469	-43.447378	619	-22.904836	-43.711689	1037	-21.784812	-41.188302
202	-22.849	-43.481331	620	-22.877183	-43.421672	1038	-21.609092	-41.311646
203	-22.883298	-43.466643	621	-22.857145	-43.486678	1039	-21.985767	-41.502966
204	-22.816168	-43.227524	622	-22.894132	-43.445344	1040	-21.759792	-41.324805
205	-22.89982	-43.565409	623	-22.874083	-43.479805	1041	-21.728237	-41.60613
206	-22.840611	-43.477492	624	-22.807071	-43.358635	1042	-21.822991	-41.471738
207	-22.849	-43.481331	625	-22.892565	-43.474053	1043	-21.446065	-41.405774
208	-22.849	-43.481331	626	-22.975386	-43.694325	1044	-21.760815	-41.325791
209	-22.815462	-43.227	627	-22.914246	-43.597453	1045	-21.723218	-41.311637
210	-22.849	-43.481331	628	-22.868808	-43.450651	1046	-21.377436	-41.351241
211	-22.849	-43.481331	629	-22.867106	-43.456437	1047	-21.757985	-41.309972
212	-22.880393	-43.269191	630	-22.973045	-43.585716	1048	-21.761406	-41.326849
213	-22.849	-43.481331	631	-22.889077	-43.477321	1049	-21.737391	-41.314141
214	-22.844272	-43.489984	632	-22.881724	-43.435514	1050	-21.760587	-41.308458
215	-22.841224	-43.482603	633	-22.826431	-43.40277	1051	-21.608345	-41.315492
216	-22.605232	-44.081492	634	-22.931425	-43.672707	1052	-21.723878	-41.297204
217	-22.962954	-44.434691	635	-22.910973	-43.614443	1053	-21.74701	-41.30516
218	-23.138518	-44.170761	636	-22.874951	-43.474714	1054	-21.743328	-41.355016
219	-23.011598	-44.321566	637	-22.88947	-43.56852	1055	-21.762668	-41.31845
220	-23.006392	-44.318018	638	-22.887173	-43.609819	1056	-21.810404	-41.39113
221	-23.000684	-44.30619	639	-22.892856	-43.564931	1057	-21.798484	-41.286406
222	-23.010894	-44.219517	640	-22.913394	-43.543323	1058	-21.786935	-41.382813

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares (Cont.)

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
223	-23.006416	-44.315503	641	-22.886151	-43.548509	1059	-21.753804	-41.333381
224	-23.179923	-44.344619	642	-22.85348	-43.382814	1060	-22.186041	-41.666719
225	-23.005925	-44.480259	643	-22.819193	-43.390555	1061	-21.488063	-41.618218
226	-23.006422	-44.318065	644	-22.928977	-43.695979	1062	-21.498121	-41.613758
227	-22.904389	-44.38622	645	-23.061015	-43.568278	1063	-22.091998	-41.867578
228	-22.98203	-44.292358	646	-22.910623	-43.595713	1064	-22.087478	-41.855826
229	-22.992279	-44.239659	647	-22.832051	-43.414012	1065	-22.083909	-41.872279
230	-23.015174	-44.535123	648	-22.907632	-43.560168	1066	-22.085854	-41.865417
231	-22.541409	-44.146236	649	-22.880013	-43.582054	1067	-22.075974	-41.87288
232	-22.541764	-44.173531	650	-22.926573	-43.680359	1068	-22.106421	-41.865709
233	-22.55842	-44.119296	651	-22.898004	-43.561375	1069	-22.368587	-41.792581
234	-22.532059	-44.189028	652	-22.889901	-43.58104	1070	-22.382595	-41.774329
235	-22.52354	-44.188826	653	-22.880887	-43.416857	1071	-22.340003	-41.755672
236	-22.545219	-44.184165	654	-22.930361	-43.576509	1072	-22.376419	-41.778621
237	-22.564422	-44.167469	655	-22.871096	-43.448316	1073	-22.373125	-41.781595
238	-22.542009	-44.177694	656	-22.901423	-43.549091	1074	-22.378819	-41.785203
239	-22.532386	-44.169283	657	-22.881771	-43.497035	1075	-22.353403	-41.770337
240	-22.571498	-44.16289	658	-22.84973	-43.358838	1076	-22.371594	-41.796379
241	-22.52739	-44.177245	659	-22.878589	-43.463125	1077	-22.383412	-41.78332
242	-22.510851	-44.201931	660	-22.902207	-43.578488	1078	-22.38233	-41.774204
243	-22.54106	-44.145627	661	-22.916652	-43.529115	1079	-22.369099	-41.789446
244	-22.541482	-44.154151	662	-22.929603	-43.652903	1080	-22.105013	-41.470362
245	-22.534737	-44.185086	663	-22.814807	-43.390883	1081	-22.522107	-41.931907
246	-22.534953	-44.198209	664	-22.87825	-43.534892	1082	-22.526861	-41.957089
247	-22.569857	-44.169328	665	-22.857906	-43.483739	1083	-22.42621	-42.010306
248	-22.485731	-44.563068	666	-22.902268	-43.579171	1084	-22.52644	-41.944859
249	-22.928078	-43.907769	667	-22.871845	-43.420158	1085	-22.512116	-41.945262
250	-23.029584	-44.164191	668	-22.997138	-43.629984	1086	-21.653147	-41.747739
251	-22.951413	-44.038948	669	-22.918984	-43.632988	1087	-21.645188	-41.748643
252	-22.924892	-43.947739	670	-22.919175	-43.632829	1088	-21.641291	-41.738093
253	-23.02705	-44.533881	671	-22.8722	-43.496457	1089	-21.593075	-41.841069
254	-23.21848	-44.71534	672	-22.88504	-43.619076	1090	-21.650424	-41.73967
255	-23.225768	-44.726516	673	-22.990013	-43.550834	1091	-21.645138	-41.748689
256	-22.503896	-44.011947	674	-22.825293	-43.372833	1092	-21.520112	-41.082109
257	-22.51916	-43.996981	675	-22.872863	-43.408285	1093	-21.300815	-40.967644
258	-22.628436	-43.902948	676	-22.847236	-43.463733	1094	-21.317943	-41.031565
259	-22.626297	-43.905858	677	-22.939488	-43.692288	1095	-21.576398	-41.064568
260	-22.598908	-44.042733	678	-22.830123	-43.387947	1096	-21.305267	-41.117766
261	-22.419565	-44.290381	679	-22.922395	-43.601903	1097	-21.497997	-41.183959
262	-22.410915	-44.261924	680	-22.892768	-43.603104	1098	-21.472792	-41.11067
263	-22.453763	-44.455689	681	-22.877084	-43.564229	1099	-21.477693	-41.114379
264	-22.47502	-44.491264	682	-22.89939	-43.578804	1100	-21.693445	-41.035501
265	-22.470965	-44.451334	683	-22.665905	-43.286438	1101	-21.693445	-41.035501
266	-22.46949	-44.447592	684	-22.70658	-43.269917	1102	-21.904166	-40.985952
267	-22.505209	-44.678656	685	-22.626273	-43.278514	1103	-21.622894	-41.017758
268	-22.467348	-44.449037	686	-22.682551	-43.26056	1104	-21.638506	-41.044974
269	-22.462297	-44.451107	687	-22.767064	-43.285707	1105	-21.75	-41.166666
270	-22.469261	-44.456307	688	-22.760131	-43.307942	1106	-21.731874	-41.186983
271	-22.465235	-44.455885	689	-22.596683	-43.298979	1107	-22.520227	-42.981263
272	-22.455747	-44.436303	690	-22.597529	-43.292248	1108	-22.515732	-42.965343
273	-22.479226	-44.471301	691	-22.640303	-43.219098	1109	-22.548827	-42.984465
274	-22.471883	-44.500661	692	-22.779648	-43.325347	1110	-22.747558	-42.835631
275	-22.458272	-44.444005	693	-22.792611	-43.290001	1111	-22.782063	-42.936836
276	-22.69651	-44.002433	694	-22.786136	-43.320015	1112	-22.837252	-42.881605
277	-22.726394	-44.137054	695	-22.790904	-43.30889	1113	-22.734958	-42.956268
278	-22.834421	-44.194405	696	-22.771472	-43.288204	1114	-22.837041	-42.763153
279	-22.524598	-44.142961	697	-22.767133	-43.295708	1115	-22.841609	-42.884199
280	-22.509527	-44.098444	698	-22.638721	-43.217947	1116	-22.701427	-42.881428
281	-22.489486	-44.110459	699	-22.758027	-43.315883	1117	-22.735276	-42.834724
282	-22.497114	-44.049454	700	-22.68359	-43.288069	1118	-22.743367	-42.856972
283	-22.504187	-44.094022	701	-22.75674	-43.317412	1119	-22.775614	-42.916446
284	-22.533858	-44.117769	702	-22.76845	-43.323114	1120	-22.731866	-42.829806
285	-22.508079	-44.07236	703	-22.687148	-43.257136	1121	-22.749163	-42.872141
286	-22.53112	-44.130842	704	-22.760042	-43.294529	1122	-22.754945	-42.847882
287	-22.538763	-44.076307	705	-22.605181	-43.274748	1123	-22.765001	-42.923976
288	-22.524028	-44.123485	706	-22.773216	-43.315819	1124	-22.709462	-42.892596
289	-22.52487	-44.097897	707	-22.759054	-43.278406	1125	-22.74574	-42.838996
290	-22.522885	-44.107188	708	-22.779652	-43.291253	1126	-22.729904	-42.953375
291	-22.515052	-44.098783	709	-22.623414	-43.214579	1127	-22.776595	-42.921562
292	-22.518778	-44.086695	710	-22.649312	-43.288181	1128	-22.669825	-43.112372
293	-22.507733	-44.068633	711	-22.786087	-43.291294	1129	-22.653123	-43.041854
294	-22.497145	-44.092049	712	-22.683058	-43.278949	1130	-22.557214	-43.049587
295	-22.52318	-44.114923	713	-22.588424	-43.306005	1131	-22.576363	-43.186878
296	-22.526037	-44.130924	714	-22.615407	-43.238774	1132	-22.707004	-43.14761
297	-22.483595	-44.076026	715	-22.639339	-43.256436	1133	-22.715095	-43.176794
298	-22.467544	-44.098341	716	-22.628393	-43.214696	1134	-22.611149	-43.174762
299	-22.501178	-44.122209	717	-22.636082	-43.265807	1135	-22.609801	-43.177346
300	-22.486681	-44.084368	718	-22.620839	-43.206417	1136	-22.548141	-43.046
301	-22.495424	-44.138731	719	-22.637707	-43.228489	1137	-22.647284	-43.023677

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares (Cont.)

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
302	-22.511533	-44.129719	720	-22.792381	-43.299827	1138	-22.605407	-43.024869
303	-22.506827	-44.062459	721	-22.634196	-43.265472	1139	-22.572212	-43.182768
304	-22.497173	-44.108711	722	-22.786016	-43.319544	1140	-22.614556	-43.114821
305	-22.515174	-44.103228	723	-22.682162	-43.248563	1141	-22.624797	-43.179184
306	-22.643493	-43.644405	724	-22.774926	-43.304135	1142	-22.659255	-43.044084
307	-22.656668	-43.660551	725	-22.600033	-43.304109	1143	-22.642956	-43.030693
308	-22.64664	-43.65486	726	-22.722014	-43.320869	1144	-22.658706	-43.132965
309	-22.680886	-43.608721	727	-22.749686	-43.303369	1145	-22.585425	-43.168671
310	-22.690737	-43.621266	728	-22.787141	-43.295016	1146	-22.656689	-43.140464
311	-22.640812	-43.6501	729	-22.766847	-43.303581	1147	-22.508993	-43.195369
312	-22.674684	-43.605966	730	-22.790845	-43.308938	1148	-22.418559	-43.173514
313	-22.690566	-43.621698	731	-22.796385	-43.314186	1149	-22.508527	-43.173618
314	-22.762948	-43.425621	732	-22.706012	-43.312199	1150	-22.333053	-43.132995
315	-22.72906	-43.452014	733	-22.683173	-43.261557	1151	-22.479451	-43.155138
316	-22.703694	-43.442359	734	-22.745106	-43.317425	1152	-22.533065	-43.205291
317	-22.748548	-43.486784	735	-22.749629	-43.320644	1153	-22.528755	-43.172749
318	-22.751068	-43.463012	736	-22.784182	-43.287224	1154	-22.504152	-43.175414
319	-22.697874	-43.423739	737	-22.705182	-43.291445	1155	-22.454003	-43.143224
320	-22.756473	-43.467275	738	-22.758916	-43.315091	1156	-22.257661	-43.076287
321	-22.756673	-43.439824	739	-22.627094	-43.207533	1157	-22.386141	-43.133125
322	-22.74886	-43.43265	740	-22.662404	-43.29317	1158	-22.150715	-42.923365
323	-22.742294	-43.47496	741	-22.799368	-43.326752	1159	-22.730712	-42.713698
324	-22.759342	-43.455325	742	-22.758281	-43.291821	1160	-22.736829	-42.724268
325	-22.718361	-43.459158	743	-22.723842	-43.315595	1161	-22.399692	-42.982221
326	-22.593747	-43.421938	744	-22.691953	-43.254396	1162	-22.411979	-42.969361
327	-22.757532	-43.478692	745	-22.696771	-43.25596	1163	-22.441564	-42.97895
328	-22.706217	-43.446171	746	-22.755731	-43.285302	1164	-22.385701	-42.910167
329	-22.692912	-43.433118	747	-22.647082	-43.21794	1165	-22.406801	-42.964139
330	-22.727274	-43.471738	748	-22.677793	-43.245148	1166	-22.43331	-42.945141
331	-22.758491	-43.485785	749	-22.77253	-43.302064	1167	-22.423342	-42.965702
332	-22.698063	-43.474106	750	-22.653398	-43.282573	1168	-22.413755	-42.970317
333	-22.820377	-43.618769	751	-22.681018	-43.292203	1169	-22.445567	-42.982904
334	-22.766512	-43.438861	752	-22.684473	-43.355449	1170	-22.176764	-42.475061
335	-22.674031	-43.447548	753	-22.806196	-43.286795	1171	-22.235476	-42.29435
336	-22.691029	-43.463394	754	-22.683926	-43.283763	1172	-22.204734	-42.395648
337	-22.727098	-43.464865	755	-22.668392	-43.274771	1173	-22.15085	-42.418319
338	-22.74656	-43.451634	756	-22.709672	-43.304343	1174	-22.164448	-42.417763
339	-22.738954	-43.477366	757	-22.794186	-43.32226	1175	-22.561662	-42.686187
340	-22.717344	-43.527661	758	-22.637521	-43.25801	1176	-22.58957	-42.729912
341	-22.750505	-43.506517	759	-22.755293	-43.301283	1177	-22.469722	-42.658411
342	-22.710442	-43.473703	760	-22.705671	-43.311056	1178	-22.460993	-42.652924
343	-22.744664	-43.442629	761	-22.78102	-43.317325	1179	-22.567039	-42.836166
344	-22.679582	-43.44363	762	-22.754267	-43.297094	1180	-22.601721	-42.742537
345	-22.751843	-43.469814	763	-22.786298	-43.30531	1181	-22.467168	-42.654003
346	-22.690224	-43.469775	764	-22.7265	-43.320497	1182	-22.591381	-42.727094
347	-22.76621	-43.507138	765	-22.677243	-43.251894	1183	-22.473965	-42.655019
348	-22.727444	-43.493167	766	-22.794467	-43.302306	1184	-21.906037	-42.26223
349	-22.739567	-43.438496	767	-22.973682	-43.335695	1185	-21.880106	-42.456907
350	-22.738881	-43.513834	768	-22.898289	-43.195446	1186	-21.851374	-42.26093
351	-22.787429	-43.547083	769	-22.973362	-43.329273	1187	-21.983821	-42.376908
352	-22.703406	-43.528582	770	-22.92423	-43.240214	1188	-21.985347	-42.360356
353	-22.71263	-43.429468	771	-23.003143	-43.383719	1189	-21.934689	-42.607227
354	-22.851428	-43.601801	772	-22.931839	-43.365586	1190	-21.873626	-42.659439
355	-22.712402	-43.463908	773	-22.949455	-43.363101	1191	-21.935632	-42.60862
356	-22.734033	-43.436911	774	-22.958373	-43.383733	1192	-21.934822	-42.606862
357	-22.763635	-43.509104	775	-22.993815	-43.235874	1193	-21.940324	-42.607107
358	-22.781023	-43.551634	776	-22.930244	-43.178655	1194	-22.477735	-42.208492
359	-22.748015	-43.498916	777	-22.977292	-43.225886	1195	-22.480052	-42.204393
360	-22.738685	-43.484351	778	-22.913067	-43.216312	1196	-22.464872	-42.199195
361	-22.718421	-43.530005	779	-22.753453	-43.110135	1197	-22.491364	-42.201475
362	-22.727063	-43.535167	780	-22.928119	-43.372387	1198	-22.493705	-42.125972
363	-22.765782	-43.522603	781	-22.94709	-43.359762	1199	-22.468959	-42.690209
364	-22.827704	-43.607576	782	-22.929051	-43.372456	1200	-22.477735	-42.208492
365	-22.774913	-43.536089	783	-22.987486	-43.19196	1201	-22.47933	-42.208454
366	-22.738636	-43.483626	784	-22.924077	-43.243449	1202	-22.033004	-42.371619
367	-22.833769	-43.61945	785	-23.00979	-43.321116	1203	-22.012658	-42.366039
368	-22.812334	-43.613976	786	-22.886935	-43.250289	1204	-22.028773	-42.362229
369	-22.728417	-43.433451	787	-22.949472	-43.349718	1205	-22.252024	-42.358493
370	-22.717876	-43.433876	788	-22.89374	-43.252402	1206	-22.029264	-42.361716
371	-22.698281	-43.476087	789	-22.917603	-43.177248	1207	-22.051068	-42.522817
372	-22.742407	-43.426978	790	-22.96912	-43.412875	1208	-22.137156	-42.554167
373	-22.786228	-43.572938	791	-22.982731	-43.192357	1209	-22.050863	-42.522912
374	-22.689665	-43.418972	792	-22.960724	-43.353519	1210	-22.074363	-42.40421
375	-22.71009	-43.447879	793	-22.919157	-43.360318	1211	-21.983462	-42.25256
376	-22.740047	-43.42819	794	-22.922385	-43.371433	1212	-21.981964	-42.250739
377	-22.699291	-43.419613	795	-22.924485	-43.384105	1213	-22.320439	-42.547358
378	-22.69031	-43.463141	796	-22.971981	-43.410155	1214	-22.301383	-42.541981
379	-22.79636	-43.576664	797	-22.922018	-43.257779	1215	-22.348511	-42.325707
380	-22.823712	-43.594014	798	-22.922596	-43.352075	1216	-22.229813	-42.520823

Tabela B.1: Coordenadas geográficas das unidades escolares (Cont.)

ID	LAT	LON	ID	LAT	LON	ID	LAT	LON
381	-22.752988	-43.474697	799	-22.917717	-43.386959	1217	-22.288585	-42.537204
382	-22.824899	-43.599878	800	-23.007993	-43.427815	1218	-22.294571	-42.529212
383	-22.803435	-43.586482	801	-23.008442	-43.327662	1219	-22.259966	-42.534193
384	-22.709736	-43.455091	802	-22.88923	-43.235664	1220	-22.244605	-42.522281
385	-22.807458	-43.587595	803	-22.922146	-43.215124	1221	-22.268629	-42.615255
386	-22.753229	-43.531104	804	-22.896894	-43.352826	1222	-22.194068	-42.512638
387	-22.725153	-43.451555	805	-22.963333	-43.216314	1223	-22.255932	-42.547612
388	-22.747137	-43.508649	806	-22.962055	-43.177279	1224	-22.315	-42.332097
389	-22.85584	-43.619051	807	-22.915378	-43.238034	1225	-22.262566	-42.525891
390	-22.831141	-43.605299	808	-22.954166	-43.196933	1226	-22.336055	-42.505749
391	-22.818031	-43.594187	809	-22.880785	-43.227385	1227	-22.358087	-42.518903
392	-22.755904	-43.416208	810	-22.926988	-43.244971	1228	-22.292427	-42.517686
393	-22.756832	-43.449205	811	-22.907444	-43.19244	1229	-22.284243	-42.535253
394	-22.759562	-43.458994	812	-22.950579	-43.390661	1230	-22.28364	-42.538688
395	-22.682482	-43.443892	813	-22.965872	-43.229067	1231	-22.297001	-42.398933
396	-22.759435	-43.447129	814	-22.932669	-43.351308	1232	-22.240252	-42.549723
397	-22.72452	-43.576993	815	-22.924191	-43.204429	1233	-22.282846	-42.531917
398	-22.714178	-43.564146	816	-22.954447	-43.188251	1234	-22.333913	-42.675214
399	-22.718103	-43.575362	817	-22.931886	-43.196241	1235	-22.246215	-42.523104
400	-22.708183	-43.555262	818	-22.90442	-43.219749	1236	-22.225813	-42.520533
401	-22.706482	-43.539242	819	-22.897841	-43.227757	1237	-22.290509	-42.533353
402	-22.72714	-43.560831	820	-22.916184	-43.211076	1238	-22.282614	-42.531663
403	-22.737625	-43.557245	821	-22.967802	-43.181489	1239	-21.956731	-42.008623
404	-22.726494	-43.568791	822	-22.938246	-43.342855	1240	-21.823996	-42.087673
405	-22.724296	-43.556763	823	-22.980797	-43.224393	1241	-21.771528	-41.995532
406	-22.690626	-43.59085	824	-22.877446	-43.217396	1242	-21.953264	-42.13299
407	-22.715431	-43.566916	825	-22.90809	-43.231258	1243	-22.612789	-42.407619
408	-22.698174	-43.556254	826	-22.981584	-43.491822	1244	-22.650296	-42.389084
409	-22.703304	-43.569138	827	-22.889795	-43.347016	1245	-22.165145	-42.663785
410	-22.817476	-42.931586	828	-22.91459	-43.238576	1246	-22.05918	-42.676665
411	-22.858713	-42.94528	829	-22.898296	-43.196077	1247	-22.068339	-42.159067
412	-22.780675	-43.024033	830	-22.911569	-43.211632	1248	-22.063741	-42.065246
413	-22.825191	-42.971786	831	-22.922868	-43.181659	1249	-22.063886	-42.068927
414	-22.823879	-43.073586	832	-22.965125	-43.176383	1250	-22.199999	-42.233333
415	-22.843287	-43.017283	833	-22.913915	-43.380063	1251	-22.187314	-42.104451
416	-22.829451	-43.089168	834	-22.902678	-43.2501	1252	-22.098773	-42.206859
417	-22.833667	-43.078119	835	-22.897028	-43.354149	1253	-22.185413	-42.163413
418	-22.816515	-42.939969	836	-22.932778	-43.243347			

Fonte: Autor, 2018.

C

Resultado da Matriz de Distância e Tempo entre os Pontos

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
E1	E1	0	0	39	34	2643	290	60	E4	23885	1637
E1	1	3022	304	39	35	8012	1039	60	42	4739	480
E1	2	1912	476	39	36	8290	1084	60	43	6574	598
E1	3	459	171	39	37	881	171	60	44	6656	523
E1	4	89	25	39	38	482	122	60	45	645	107
E1	5	388	106	39	39	0	0	60	46	18093	1297
E1	6	1246	305	39	40	1398	327	60	47	13781	1053
E1	7	643	182	39	41	2014	462	60	48	17944	1282
E1	8	3271	321	40	E3	1066	231	60	49	19882	1524
E1	9	1890	471	40	34	3451	462	60	50	18182	1336
E1	10	1980	433	40	35	9219	1290	60	51	7086	584
E1	11	4832	695	40	36	9498	1334	60	52	447	81
E1	12	990	242	40	37	1689	343	60	53	889	158
E1	13	1319	300	40	38	916	202	60	54	397	65
E1	14	114	29	40	39	1398	318	60	55	6480	514
E1	15	509	152	40	40	0	0	60	56	6105	495
1	E1	3022	312	40	41	1825	415	60	57	850	147
1	1	0	0	41	E3	1682	369	60	58	24086	1672
1	2	4546	682	41	34	4067	601	60	59	26731	1952
1	3	3093	377	41	35	9835	1428	60	60	0	0
1	4	2933	289	41	36	10113	1473	60	61	542	92
1	5	3076	338	41	37	2305	482	60	62	6948	538
1	6	4027	551	41	38	1531	341	60	63	23799	1768
1	7	3276	388	41	39	2014	457	60	64	20360	1459
1	8	249	17	41	40	1825	412	60	65	20229	1428
1	9	4524	676	41	41	0	0	60	66	21652	1549
1	10	4761	680	E4	E4	0	0	60	67	22424	1612
1	11	7465	901	E4	42	25809	1665	60	68	20420	1412
1	12	3771	488	E4	43	21691	1492	60	69	18166	1333
1	13	3953	506	E4	44	21773	1416	60	70	34110	2819
1	14	3028	319	E4	45	23978	1699	60	71	33628	3174
1	15	3142	358	E4	46	5881	413	60	72	35112	3657
2	E1	1987	489	E4	47	10278	717	60	73	6106	495
2	1	4621	693	E4	48	5941	403	60	74	35007	3062
2	2	0	0	E4	49	7671	640	61	E4	23486	1557
2	3	1631	375	E4	50	5970	427	61	42	4563	433
2	4	2116	521	E4	51	22203	1478	61	43	6174	518
2	5	2282	561	E4	52	23580	1623	61	44	6256	443
2	6	3281	669	E4	53	24121	1689	61	45	634	107
2	7	1537	352	E4	54	24282	1750	61	46	17693	1217
2	8	4869	709	E4	55	21597	1408	61	47	13382	973
2	9	22	6	E4	56	21222	1389	61	48	17544	1202
2	10	3066	586	E4	57	24255	1726	61	49	19483	1445
2	11	4595	696	E4	58	200	36	61	50	17782	1256
2	12	3026	605	E4	59	3155	391	61	51	6686	504
2	13	1001	265	E4	60	23885	1685	61	52	94	12
2	14	1985	490	E4	61	23486	1612	61	53	635	78
2	15	1403	317	E4	62	22065	1432	61	54	939	158
3	E1	356	115	E4	63	6089	574	61	55	6080	434
3	1	2989	318	E4	64	3908	322	61	56	5706	415
3	2	1748	431	E4	65	4192	352	61	57	769	114
3	3	0	0	E4	66	3335	305	61	58	23686	1592
3	4	484	146	E4	67	4714	418	61	59	26332	1872
3	5	651	186	E4	68	3465	265	61	60	542	92
3	6	1945	418	E4	69	5955	425	61	61	0	0
3	7	478	137	E4	70	10534	1258	61	62	6549	458
3	8	3238	335	E4	71	13226	1708	61	63	23400	1688
3	9	1726	426	E4	72	14710	2190	61	64	19960	1379
3	10	2129	461	E4	73	21223	1389	61	65	19829	1348
3	11	4667	650	E4	74	11431	1500	61	66	21252	1469
3	12	1689	355	42	E4	25809	1590	61	67	22025	1532
3	13	1155	255	42	42	0	0	61	68	20021	1332
3	14	353	115	42	43	5422	366	61	69	17767	1253
3	15	345	107	42	44	4037	235	61	70	33711	2739

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
4	E1	89	23	42	45	4174	391	61	71	33229	3094
4	1	2933	279	42	46	20017	1251	61	72	34713	3577
4	2	2001	499	42	47	15705	1007	61	73	5706	415
4	3	549	194	42	48	19868	1235	61	74	34608	2982
4	4	0	0	42	49	21806	1478	62	E4	22065	1369
4	5	299	81	42	50	20106	1289	62	42	3745	233
4	6	1157	280	42	51	3904	251	62	43	1678	145
4	7	732	205	42	52	4469	400	62	44	292	14
4	8	3181	296	42	53	3926	337	62	45	7041	534
4	9	1980	493	42	54	5136	518	62	46	16273	1029
4	10	1891	408	42	55	4213	244	62	47	11961	785
4	11	4921	718	42	56	4587	262	62	48	16124	1014
4	12	901	217	42	57	4057	369	62	49	18062	1257
4	13	1408	323	42	58	26010	1626	62	50	16361	1068
4	14	96	30	42	59	28656	1905	62	51	160	30
4	15	598	175	42	60	4739	452	62	52	6643	458
5	E1	388	112	42	61	4563	411	62	53	7184	524
5	1	3076	344	42	62	3745	221	62	54	7345	585
5	2	2207	571	42	63	25723	1721	62	55	468	23
5	3	754	266	42	64	22284	1412	62	56	843	41
5	4	299	90	42	65	22153	1381	62	57	7317	560
5	5	0	0	42	66	23576	1502	62	58	22265	1404
5	6	1378	345	42	67	24348	1565	62	59	24911	1684
5	7	938	277	42	68	22344	1365	62	60	6948	519
5	8	3325	361	42	69	20091	1286	62	61	6549	446
5	9	2185	565	42	70	36034	2773	62	62	0	0
5	10	2112	473	42	71	35552	3127	62	63	21979	1500
5	11	5127	790	42	72	37036	3610	62	64	18539	1191
5	12	1122	281	42	73	4587	262	62	65	18408	1160
5	13	1614	395	42	74	36931	3015	62	66	19831	1281
5	14	395	120	43	E4	21691	1436	62	67	20604	1344
5	15	804	247	43	42	5422	408	62	68	18600	1144
6	E1	1246	295	43	43	0	0	62	69	16346	1065
6	1	4027	530	43	44	1386	160	62	70	32290	2551
6	2	3344	701	43	45	6666	601	62	71	31808	2906
6	3	1891	396	43	46	15898	1096	62	72	33292	3389
6	4	1157	272	43	47	11587	852	62	73	842	41
6	5	1378	327	43	48	15750	1081	62	74	33187	2794
6	6	0	0	43	49	17688	1323	63	E4	6089	543
6	7	2075	408	43	50	15987	1135	63	42	25723	1764
6	8	4276	547	43	51	1816	222	63	43	21605	1591
6	9	3322	696	43	52	6269	525	63	44	21687	1516
6	10	2648	531	43	53	6810	591	63	45	23892	1798
6	11	6263	921	43	54	6971	652	63	46	5795	512
6	12	697	168	43	55	1210	151	63	47	10192	816
6	13	2751	526	43	56	835	132	63	48	5855	503
6	14	1304	276	43	57	6943	627	63	49	7585	739
6	15	1941	377	43	58	21891	1471	63	50	5884	526
7	E1	718	206	43	59	24537	1751	63	51	22117	1577
7	1	3351	409	43	60	6574	586	63	52	23494	1722
7	2	1537	357	43	61	6174	513	63	53	24035	1788
7	3	362	91	43	62	1678	175	63	54	24196	1849
7	4	846	237	43	63	21605	1567	63	55	21511	1507
7	5	1013	277	43	64	18165	1258	63	56	21136	1488
7	6	2012	385	43	65	18034	1227	63	57	24169	1825
7	7	0	0	43	66	19457	1348	63	58	6289	578
7	8	3600	426	43	67	20230	1411	63	59	8935	858
7	9	1515	351	43	68	18226	1211	63	60	23799	1784
7	10	2196	428	43	69	15972	1132	63	61	23400	1711
7	11	4456	576	43	70	31916	2618	63	62	21979	1531
7	12	1756	321	43	71	31434	2973	63	63	0	0
7	13	944	181	43	72	32918	3456	63	64	3822	422
7	14	715	206	43	73	836	132	63	65	4106	451
7	15	134	30	43	74	32813	2861	63	66	3856	454
8	E1	3271	328	44	E4	21773	1355	63	67	1375	165
8	1	249	16	44	42	4037	248	63	68	3379	364
8	2	4794	698	44	43	1386	131	63	69	5869	524
8	3	3341	393	44	44	0	0	63	70	16314	1725
8	4	3181	306	44	45	6748	520	63	71	9829	1406
8	5	3325	355	44	46	15980	1015	63	72	11313	1889
8	6	4276	568	44	47	11668	771	63	73	21137	1488
8	7	3525	405	44	48	15831	1000	63	74	10491	1444
8	8	0	0	44	49	17770	1242	64	E4	3908	309
8	9	4773	693	44	50	16069	1053	64	42	22284	1449
8	10	5010	696	44	51	430	62	64	43	18165	1276
8	11	7714	918	44	52	6351	444	64	44	18247	1200
8	12	4020	504	44	53	6891	510	64	45	20452	1483
8	13	4201	523	44	54	7053	571	64	46	2356	196
8	14	3277	336	44	55	176	9	64	47	6752	501

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
8	15	3391	375	44	56	551	27	64	48	2416	187
9	E1	1965	484	44	57	7025	546	64	49	4145	424
9	1	4599	687	44	58	21973	1390	64	50	2445	211
9	2	22	6	44	59	24619	1670	64	51	18677	1262
9	3	1610	369	44	60	6656	505	64	52	20054	1407
9	4	2094	515	44	61	6256	432	64	53	20595	1473
9	5	2261	555	44	62	292	15	64	54	20757	1534
9	6	3259	663	44	63	21687	1486	64	55	18071	1191
9	7	1515	346	44	64	18247	1177	64	56	17696	1172
9	8	4848	704	44	65	18116	1145	64	57	20729	1510
9	9	0	0	44	66	19539	1267	64	58	4108	345
9	10	3044	580	44	67	20312	1329	64	59	6754	625
9	11	4573	690	44	68	18307	1130	64	60	20360	1469
9	12	3004	599	44	69	16054	1051	64	61	19960	1396
9	13	979	259	44	70	31997	2537	64	62	18539	1215
9	14	1963	484	44	71	31515	2892	64	63	3822	440
9	15	1381	311	44	72	32999	3374	64	64	0	0
10	E1	1980	444	44	73	550	27	64	65	667	136
10	1	4770	666	44	74	32894	2779	64	66	1630	284
10	2	3066	574	45	E4	23978	1651	64	67	2447	284
10	3	3022	480	45	42	4174	414	64	68	443	85
10	4	1891	421	45	43	6666	612	64	69	2429	209
10	5	2112	476	45	44	6748	537	64	70	14133	1492
10	6	2648	542	45	45	0	0	64	71	13651	1847
10	7	2928	457	45	46	18185	1312	64	72	15134	2329
10	8	5019	683	45	47	13873	1068	64	73	17697	1173
10	9	3044	568	45	48	18036	1296	64	74	15030	1734
10	10	0	0	45	49	19975	1539	65	E4	4192	314
10	11	3213	471	45	50	18274	1350	65	42	22153	1442
10	12	2392	479	45	51	7178	599	65	43	18034	1270
10	13	2473	398	45	52	539	96	65	44	18116	1194
10	14	2038	425	45	53	244	50	65	45	20321	1477
10	15	2794	422	45	54	1042	172	65	46	2225	190
11	E1	4879	699	45	55	6572	528	65	47	6622	494
11	1	7513	902	45	56	6198	509	65	48	2285	181
11	2	4567	678	45	57	205	39	65	49	4014	417
11	3	4523	584	45	58	24178	1687	65	50	2314	205
11	4	5008	730	45	59	26824	1966	65	51	18546	1256
11	5	5174	770	45	60	645	107	65	52	19924	1401
11	6	6173	878	45	61	634	107	65	53	20464	1467
11	7	4429	561	45	62	7041	552	65	54	20626	1528
11	8	7761	919	45	63	23892	1782	65	55	17940	1185
11	9	4545	673	45	64	20452	1473	65	56	17566	1166
11	10	3185	461	45	65	20321	1442	65	57	20598	1503
11	11	0	0	45	66	21744	1563	65	58	4393	350
11	12	5918	814	45	67	22517	1626	65	59	7038	630
11	13	3974	503	45	68	20512	1426	65	60	20229	1462
11	14	4877	699	45	69	18259	1347	65	61	19829	1389
11	15	4295	526	45	70	34202	2834	65	62	18408	1209
12	E1	990	233	45	71	33720	3188	65	63	4106	445
12	1	3771	469	45	72	35204	3671	65	64	667	136
12	2	3088	640	45	73	6198	509	65	65	0	0
12	3	1636	335	45	74	35100	3076	65	66	1959	226
12	4	901	210	46	E4	5881	365	65	67	2731	289
12	5	1122	265	46	42	20017	1284	65	68	727	89
12	6	697	162	46	43	15898	1112	65	69	2299	202
12	7	1819	346	46	44	15980	1036	65	70	14417	1497
12	8	4020	485	46	45	18185	1319	65	71	13935	1852
12	9	3067	634	46	46	0	0	65	72	15419	2334
12	10	2392	470	46	47	4486	336	65	73	17566	1166
12	11	6008	859	46	48	149	23	65	74	15314	1739
12	12	0	0	46	49	1789	227	66	E4	3335	299
12	13	2495	464	46	50	178	52	66	42	23576	1546
12	14	1049	214	46	51	16410	1098	66	43	19457	1374
12	15	1685	316	46	52	17788	1243	66	44	19539	1298
13	E1	1394	309	46	53	18328	1309	66	45	21744	1581
13	1	4028	512	46	54	18490	1370	66	46	3648	294
13	2	1001	267	46	55	15804	1027	66	47	8045	598
13	3	1038	194	46	56	15430	1008	66	48	3708	285
13	4	1523	340	46	57	18462	1345	66	49	5437	521
13	5	1689	380	46	58	6082	400	66	50	3737	309
13	6	2688	488	46	59	8728	680	66	51	19969	1360
13	7	944	171	46	60	18093	1305	66	52	21347	1505
13	8	4276	529	46	61	17693	1231	66	53	21887	1571
13	9	979	262	46	62	16273	1051	66	54	22049	1632
13	10	2473	405	46	63	5795	496	66	55	19363	1289
13	11	4002	515	46	64	2356	187	66	56	18989	1270
13	12	2433	424	46	65	2225	156	66	57	22021	1607
13	13	0	0	46	66	3648	277	66	58	3536	335

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
13	14	1392	309	46	67	4421	340	66	59	6182	615
13	15	810	136	46	68	2416	140	66	60	21652	1567
14	E1	107	30	46	69	163	49	66	61	21252	1493
14	1	3028	301	46	70	16106	1547	66	62	19831	1313
14	2	1909	477	46	71	15624	1902	66	63	3856	456
14	3	457	172	46	72	17108	2385	66	64	1630	288
14	4	96	22	46	73	15430	1008	66	65	1959	233
14	5	395	103	46	74	17003	1790	66	66	0	0
14	6	1304	292	47	E4	10278	653	66	67	2481	299
14	7	640	184	47	42	15705	1035	66	68	1232	147
14	8	3277	318	47	43	11587	862	66	69	3721	306
14	9	1888	472	47	44	11668	787	66	70	13560	1482
14	10	2038	420	47	45	13873	1070	66	71	13684	1862
14	11	4829	697	47	46	4486	314	66	72	15168	2345
14	12	1049	228	47	47	0	0	66	73	18989	1270
14	13	1316	302	47	48	4337	298	66	74	14457	1724
14	14	0	0	47	49	6275	541	67	E4	4714	377
14	15	506	154	47	50	4574	352	67	42	24348	1598
15	E1	584	170	47	51	12099	848	67	43	20230	1426
15	1	3218	374	47	52	13476	994	67	44	20312	1350
15	2	1403	321	47	53	14017	1060	67	45	22517	1633
15	3	228	55	47	54	14178	1121	67	46	4421	346
15	4	712	201	47	55	11493	778	67	47	8817	650
15	5	879	242	47	56	11118	759	67	48	4480	337
15	6	1878	349	47	57	14150	1096	67	49	6210	573
15	7	134	30	47	58	10478	689	67	50	4509	361
15	8	3466	390	47	59	13124	968	67	51	20742	1412
15	9	1381	315	47	60	13781	1055	67	52	22119	1557
15	10	2062	392	47	61	13382	982	67	53	22660	1623
15	11	4323	540	47	62	11961	802	67	54	22822	1684
15	12	1622	286	47	63	10192	784	67	55	20136	1341
15	13	810	145	47	64	6752	475	67	56	19761	1322
15	14	581	170	47	65	6622	444	67	57	22794	1659
15	15	0	0	47	66	8045	565	67	58	4914	413
E2	E2	0	0	47	67	8817	628	67	59	7560	692
E2	16	15898	1437	47	68	6813	428	67	60	22424	1619
E2	17	1659	255	47	69	4559	349	67	61	22025	1545
E2	18	1741	280	47	70	20503	1835	67	62	20604	1365
E2	19	14117	1108	47	71	20021	2190	67	63	1375	156
E2	20	11607	775	47	72	21505	2673	67	64	2447	256
E2	21	6061	498	47	73	11119	759	67	65	2731	285
E2	22	4423	297	47	74	21400	2078	67	66	2481	289
E2	23	13994	1087	48	E4	5941	355	67	67	0	0
E2	24	2372	178	48	42	19868	1261	67	68	2004	199
E2	25	23246	2095	48	43	15750	1089	67	69	4494	358
E2	26	13516	1011	48	44	15831	1013	67	70	14939	1559
E2	27	16478	1089	48	45	18036	1296	67	71	11204	1563
E2	28	589	88	48	46	149	16	67	72	12688	2045
E2	29	4772	380	48	47	4337	313	67	73	19762	1322
E2	30	12556	974	48	48	0	0	67	74	11866	1600
E2	31	1017	117	48	49	1938	243	68	E4	3465	225
E2	32	169	52	48	50	238	54	68	42	22344	1400
E2	33	13414	981	48	51	16262	1075	68	43	18226	1227
16	E2	15898	1466	48	52	17639	1220	68	44	18307	1151
16	16	0	0	48	53	18180	1286	68	45	20512	1434
16	17	17507	1663	48	54	18341	1347	68	46	2416	147
16	18	17590	1688	48	55	15656	1004	68	47	6813	452
16	19	29965	2516	48	56	15281	985	68	48	2476	138
16	20	27455	2182	48	57	18313	1322	68	49	4206	375
16	21	13203	1379	48	58	6142	391	68	50	2505	162
16	22	11564	1179	48	59	8787	670	68	51	18738	1213
16	23	29842	2495	48	60	17944	1281	68	52	20115	1358
16	24	13526	1286	48	61	17544	1208	68	53	20656	1424
16	25	16101	2038	48	62	16124	1028	68	54	20817	1485
16	26	29364	2419	48	63	5855	486	68	55	18132	1143
16	27	32326	2497	48	64	2416	177	68	56	17757	1124
16	28	15291	1406	48	65	2285	146	68	57	20789	1461
16	29	11913	1238	48	66	3708	267	68	58	3665	260
16	30	28404	2382	48	67	4480	330	68	59	6311	540
16	31	16865	1525	48	68	2476	130	68	60	20420	1420
16	32	16018	1459	48	69	222	51	68	61	20021	1347
16	33	29263	2389	48	70	16166	1537	68	62	18600	1166
17	E2	1659	223	48	71	15684	1892	68	63	3379	356
17	16	17507	1623	48	72	17168	2375	68	64	443	57
17	17	0	0	48	73	15281	985	68	65	727	87
17	18	900	127	48	74	17063	1780	68	66	1232	137
17	19	15117	1218	49	E4	7671	592	68	67	2004	199
17	20	12607	884	49	42	21806	1511	68	68	0	0
17	21	7671	684	49	43	17688	1339	68	69	2490	160

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
17	22	6032	484	49	44	17770	1263	68	70	13690	1407
17	23	14994	1197	49	45	19975	1546	68	71	13208	1762
17	24	3981	365	49	46	1789	227	68	72	14692	2245
17	25	24855	2282	49	47	6275	563	68	73	17758	1124
17	26	14516	1121	49	48	1938	250	68	74	14587	1650
17	27	17478	1199	49	49	0	0	69	E4	5955	405
17	28	2198	274	49	50	1967	279	69	42	20091	1315
17	29	6381	566	49	51	18200	1325	69	43	15972	1143
17	30	13556	1084	49	52	19577	1470	69	44	16054	1067
17	31	2017	227	49	53	20118	1536	69	45	18259	1350
17	32	1490	199	49	54	20279	1597	69	46	163	49
17	33	14414	1091	49	55	17594	1254	69	47	4559	367
18	E2	1741	260	49	56	17219	1235	69	48	222	54
18	16	17590	1660	49	57	20252	1572	69	49	1952	276
18	17	900	141	49	58	7871	627	69	50	15	3
18	18	0	0	49	59	10517	907	69	51	16484	1129
18	19	15199	1255	49	60	19882	1532	69	52	17861	1274
18	20	12689	921	49	61	19483	1458	69	53	18402	1340
18	21	7753	721	49	62	18062	1278	69	54	18564	1401
18	22	6115	520	49	63	7585	723	69	55	15878	1058
18	23	15076	1234	49	64	4145	414	69	56	15503	1039
18	24	4064	401	49	65	4014	383	69	57	18536	1376
18	25	24938	2318	49	66	5437	504	69	58	6155	440
18	26	14598	1157	49	67	6210	566	69	59	8801	720
18	27	17560	1235	49	68	4206	367	69	60	18166	1336
18	28	2281	311	49	69	1952	276	69	61	17767	1262
18	29	6464	603	49	70	17896	1774	69	62	16346	1082
18	30	13638	1120	49	71	17414	2129	69	63	5869	535
18	31	2099	264	49	72	18898	2612	69	64	2429	227
18	32	1572	236	49	73	17220	1235	69	65	2299	195
18	33	14497	1128	49	74	18793	2017	69	66	3721	317
19	E2	14117	1102	50	E4	5970	407	69	67	4494	379
19	16	29965	2502	50	42	20106	1318	69	68	2490	180
19	17	15117	1244	50	43	15987	1145	69	69	0	0
19	18	15199	1269	50	44	16069	1070	69	70	16180	1587
19	19	0	0	50	45	18274	1352	69	71	15698	1942
19	20	7053	588	50	46	178	51	69	72	17182	2424
19	21	20129	1563	50	47	4574	370	69	73	15504	1039
19	22	18490	1363	50	48	238	57	69	74	17077	1829
19	23	123	21	50	49	1967	278	70	E4	10455	1277
19	24	16439	1244	50	50	0	0	70	42	35955	2841
19	25	37313	3161	50	51	16499	1131	70	43	31836	2669
19	26	601	97	50	52	17876	1277	70	44	31918	2593
19	27	4302	473	50	53	18417	1343	70	45	34123	2876
19	28	14656	1154	50	54	18579	1404	70	46	16027	1589
19	29	18839	1445	50	55	15893	1061	70	47	20424	1893
19	30	3252	416	50	56	15518	1042	70	48	16087	1580
19	31	13100	1012	50	57	18551	1379	70	49	17816	1816
19	32	13947	1079	50	58	6171	443	70	50	16116	1604
19	33	844	146	50	59	8816	723	70	51	32348	2655
20	E2	11607	755	50	60	18182	1338	70	52	33725	2800
20	16	27455	2155	50	61	17782	1265	70	53	34266	2866
20	17	12607	897	50	62	16361	1085	70	54	34428	2927
20	18	12689	922	50	63	5884	538	70	55	31742	2584
20	19	7053	571	50	64	2445	229	70	56	31368	2565
20	20	0	0	50	65	2314	198	70	57	34400	2902
20	21	17619	1216	50	66	3737	319	70	58	10433	1292
20	22	15980	1015	50	67	4509	382	70	59	9625	1274
20	23	6930	549	50	68	2505	182	70	60	34031	2861
20	24	13929	896	50	69	15	3	70	61	33631	2788
20	25	34803	2813	50	70	16195	1590	70	62	32210	2608
20	26	6452	473	50	71	15713	1945	70	63	16235	1750
20	27	4871	314	50	72	17197	2427	70	64	14053	1499
20	28	12146	806	50	73	15519	1042	70	65	14338	1528
20	29	16329	1098	50	74	17092	1832	70	66	13481	1481
20	30	5492	436	51	E4	22203	1420	70	67	14860	1594
20	31	10590	665	51	42	3904	291	70	68	13611	1442
20	32	11438	731	51	43	1816	196	70	69	16100	1601
20	33	6351	444	51	44	430	65	70	70	0	0
21	E2	6061	525	51	45	7178	584	70	71	18910	2451
21	16	13203	1370	51	46	16410	1080	70	72	20394	2934
21	17	7671	722	51	47	12099	836	70	73	31368	2565
21	18	7753	747	51	48	16262	1064	70	74	17115	2244
21	19	20129	1575	51	49	18200	1307	71	E4	13517	1681
21	20	17619	1241	51	50	16499	1118	71	42	35673	3004
21	21	0	0	51	51	0	0	71	43	31554	2832
21	22	1639	205	51	52	6781	508	71	44	31636	2756
21	23	20006	1554	51	53	7322	575	71	45	33841	3039
21	24	3689	345	51	54	7483	635	71	46	15745	1752

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
21	25	20551	2029	51	55	606	73	71	47	20141	2056
21	26	19528	1478	51	56	981	92	71	48	15805	1743
21	27	22490	1556	51	57	7455	611	71	49	17534	1979
21	28	5454	465	51	58	22403	1455	71	50	15834	1767
21	29	2077	301	51	59	25049	1735	71	51	32066	2818
21	30	18568	1440	51	60	7086	570	71	52	33443	2963
21	31	7029	584	51	61	6686	497	71	53	33984	3029
21	32	6181	518	51	62	160	58	71	54	34146	3090
21	33	19426	1448	51	63	22117	1550	71	55	31460	2747
22	E2	4423	320	51	64	18677	1241	71	56	31085	2728
22	16	11564	1165	51	65	18546	1210	71	57	34118	3065
22	17	6032	517	51	66	19969	1331	71	58	13496	1697
22	18	6115	542	51	67	20742	1394	71	59	11550	1522
22	19	18490	1370	51	68	18738	1195	71	60	33749	3024
22	20	15980	1036	51	69	16484	1116	71	61	33349	2951
22	21	1639	201	51	70	32428	2602	71	62	31928	2771
22	22	0	0	51	71	31946	2957	71	63	9949	1240
22	23	18367	1349	51	72	33430	3439	71	64	13771	1662
22	24	2051	140	51	73	980	92	71	65	14056	1691
22	25	18912	1824	51	74	33325	2844	71	66	13805	1695
22	26	17889	1273	52	E4	23580	1568	71	67	11324	1406
22	27	20851	1351	52	42	4469	422	71	68	13329	1605
22	28	3816	260	52	43	6269	530	71	69	15818	1764
22	29	438	96	52	44	6351	454	71	70	18975	2382
22	30	16929	1235	52	45	539	95	71	71	0	0
22	31	5390	379	52	46	17788	1229	71	72	1484	482
22	32	4543	313	52	47	13476	985	71	73	31086	2728
22	33	17788	1243	52	48	17639	1213	71	74	12500	1649
23	E2	13994	1081	52	49	19577	1456	72	E4	15001	1898
23	16	29842	2481	52	50	17876	1267	72	42	37157	3222
23	17	14994	1223	52	51	6781	516	72	43	33038	3049
23	18	15076	1248	52	52	0	0	72	44	33120	2973
23	19	123	21	52	53	541	66	72	45	35325	3256
23	20	6930	567	52	54	844	146	72	46	17229	1969
23	21	20006	1542	52	55	6175	445	72	47	21625	2274
23	22	18367	1342	52	56	5800	426	72	48	17289	1960
23	23	0	0	52	57	675	102	72	49	19018	2197
23	24	16316	1223	52	58	23780	1604	72	50	17318	1984
23	25	37190	3140	52	59	26426	1884	72	51	33550	3035
23	26	478	76	52	60	447	80	72	52	34927	3180
23	27	4179	452	52	61	94	11	72	53	35468	3246
23	28	14533	1132	52	62	6643	469	72	54	35630	3307
23	29	18716	1424	52	63	23494	1699	72	55	32944	2965
23	30	3129	395	52	64	20054	1390	72	56	32569	2945
23	31	12977	991	52	65	19924	1359	72	57	35602	3283
23	32	13825	1057	52	66	21347	1480	72	58	14980	1914
23	33	721	125	52	67	22119	1543	72	59	13034	1739
24	E2	2372	180	52	68	20115	1343	72	60	35233	3242
24	16	13526	1259	52	69	17861	1264	72	61	34833	3169
24	17	3981	377	52	70	33805	2751	72	62	33412	2988
24	18	4064	402	52	71	33323	3106	72	63	11433	1458
24	19	16439	1230	52	72	34807	3588	72	64	15255	1879
24	20	13929	896	52	73	5801	426	72	65	15540	1909
24	21	3689	320	52	74	34702	2993	72	66	15289	1912
24	22	2051	119	53	E4	24121	1631	72	67	12808	1623
24	23	16316	1209	53	42	3926	355	72	68	14812	1822
24	24	0	0	53	43	6810	592	72	69	17302	1982
24	25	20874	1917	53	44	6891	517	72	70	20459	2599
24	26	15838	1133	53	45	244	50	72	71	1484	217
24	27	18801	1211	53	46	18328	1291	72	72	0	0
24	28	1765	120	53	47	14017	1047	72	73	32570	2946
24	29	2400	202	53	48	18180	1276	72	74	13984	1867
24	30	14878	1095	53	49	20118	1518	73	E4	21223	1328
24	31	3339	239	53	50	18417	1330	73	42	4587	276
24	32	2492	173	53	51	7322	578	73	43	836	104
24	33	15737	1103	53	52	541	63	73	44	550	28
25	E2	23166	2152	53	53	0	0	73	45	6198	493
25	16	16022	2064	53	54	1188	209	73	46	15430	988
25	17	24776	2349	53	55	6716	508	73	47	11119	744
25	18	24858	2374	53	56	6341	489	73	48	15281	973
25	19	37234	3202	53	57	127	28	73	49	17220	1215
25	20	34724	2868	53	58	24321	1666	73	50	15519	1027
25	21	20472	2065	53	59	26967	1946	73	51	980	89
25	22	18833	1864	53	60	889	158	73	52	5801	417
25	23	37111	3181	53	61	635	74	73	53	6341	483
25	24	20794	1972	53	62	7184	532	73	54	6503	544
25	25	0	0	53	63	24035	1762	73	55	374	19
25	26	36633	3104	53	64	20595	1453	73	56	1	0
25	27	39595	3182	53	65	20464	1422	73	57	6475	519

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
25	28	22559	2092	53	66	21887	1543	73	58	21423	1363
25	29	19182	1923	53	67	22660	1605	73	59	24069	1643
25	30	35673	3067	53	68	20656	1406	73	60	6106	478
25	31	24134	2211	53	69	18402	1327	73	61	5706	405
25	32	23286	2145	53	70	34346	2813	73	62	842	43
25	33	36531	3075	53	71	33864	3168	73	63	21137	1459
26	E2	13516	1005	53	72	35348	3651	73	64	17697	1150
26	16	29364	2405	53	73	6341	489	73	65	17566	1119
26	17	14516	1147	53	74	35243	3056	73	66	18989	1240
26	18	14598	1172	54	E4	24282	1702	73	67	19762	1303
26	19	601	97	54	42	5136	546	73	68	17758	1103
26	20	6452	491	54	43	6971	663	73	69	15504	1024
26	21	19528	1466	54	44	7053	588	73	70	31448	2510
26	22	17889	1265	54	45	1042	172	73	71	30966	2865
26	23	478	76	54	46	18490	1363	73	72	32450	3348
26	24	15838	1146	54	47	14178	1118	73	73	0	0
26	25	36712	3064	54	48	18341	1347	73	74	32345	2753
26	26	0	0	54	49	20279	1590	74	E4	11563	1591
26	27	3701	376	54	50	18579	1401	74	42	37063	3156
26	28	14055	1056	54	51	7483	649	74	43	32945	2983
26	29	18238	1348	54	52	844	146	74	44	33027	2907
26	30	2651	319	54	53	1188	213	74	45	35232	3190
26	31	12499	915	54	54	0	0	74	46	17135	1903
26	32	13346	981	54	55	6877	579	74	47	21532	2208
26	33	243	49	54	56	6503	560	74	48	17195	1894
27	E2	16478	1068	54	57	1247	212	74	49	18925	2131
27	16	32326	2468	54	58	24483	1738	74	50	17224	1918
27	17	17478	1210	54	59	27129	2017	74	51	33457	2969
27	18	17560	1235	54	60	397	65	74	52	34834	3114
27	19	4302	452	54	61	939	158	74	53	35375	3180
27	20	4871	313	54	62	7345	603	74	54	35536	3241
27	21	22490	1529	54	63	24196	1833	74	55	32851	2898
27	22	20851	1328	54	64	20757	1524	74	56	32476	2879
27	23	4179	431	54	65	20626	1493	74	57	35509	3217
27	24	18801	1209	54	66	22049	1614	74	58	11542	1607
27	25	39674	3126	54	67	22822	1677	74	59	9596	1432
27	26	3701	355	54	68	20817	1477	74	60	35139	3176
27	27	0	0	54	69	18564	1398	74	61	34740	3103
27	28	17018	1119	54	70	34507	2884	74	62	33319	2922
27	29	21201	1411	54	71	34025	3239	74	63	9993	1386
27	30	6184	617	54	72	35509	3722	74	64	15162	1813
27	31	15461	978	54	73	6503	560	74	65	15446	1843
27	32	16309	1044	54	74	35404	3127	74	66	14590	1796
27	33	3634	334	55	E4	21597	1346	74	67	11368	1551
28	E2	589	89	55	42	4213	257	74	68	14719	1756
28	16	15291	1405	55	43	1210	122	74	69	17209	1916
28	17	2198	286	55	44	176	9	74	70	16579	2261
28	18	2281	310	55	45	6572	511	74	71	12623	1835
28	19	14656	1139	55	46	15804	1007	74	72	14107	2318
28	20	12146	805	55	47	11493	762	74	73	32477	2879
28	21	5454	466	55	48	15656	991	74	74	0	0
28	22	3816	265	55	49	17594	1234	E5	E5	0	0
28	23	14533	1118	55	50	15893	1045	E5	75	13662	830
28	24	1765	146	55	51	606	71	E5	76	13893	871
28	25	22639	2064	55	52	6175	435	E5	77	13625	823
28	26	14055	1041	55	53	6716	501	E5	78	13662	850
28	27	17018	1119	55	54	6877	562	E5	79	14111	910
28	28	0	0	55	55	0	0	E5	80	3117	382
28	29	4165	348	55	56	375	18	E5	81	2471	293
28	30	13095	1004	55	57	6849	537	E5	82	2768	330
28	31	1556	148	55	58	21797	1382	E5	83	2908	358
28	32	709	82	55	59	24443	1661	75	E5	13662	865
28	33	13954	1012	55	60	6480	497	75	75	0	0
29	E2	4772	398	55	61	6080	423	75	76	231	41
29	16	11913	1252	55	62	468	24	75	77	37	7
29	17	6381	595	55	63	21511	1477	75	78	159	59
29	18	6464	620	55	64	18071	1168	75	79	449	81
29	19	18839	1448	55	65	17940	1137	75	80	16779	1246
29	20	16329	1114	55	66	19363	1258	75	81	16133	1158
29	21	2077	296	55	67	20136	1321	75	82	16429	1195
29	22	438	96	55	68	18132	1121	75	83	16570	1223
29	23	18716	1427	55	69	15878	1042	76	E5	13893	906
29	24	2400	218	55	70	31822	2528	76	75	231	41
29	25	19261	1910	55	71	31340	2883	76	76	0	0
29	26	18238	1351	55	72	32824	3366	76	77	267	48
29	27	21201	1428	55	73	374	18	76	78	389	101
29	28	4165	338	55	74	32719	2771	76	79	218	39
29	29	0	0	56	E4	21222	1328	76	80	17010	1288
29	30	17278	1313	56	42	4587	276	76	81	16363	1200

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
29	31	5739	457	56	43	835	104	76	82	16660	1236
29	32	4892	391	56	44	551	28	76	83	16801	1264
29	33	18137	1321	56	45	6198	493	77	E5	13625	858
30	E2	12556	962	56	46	15430	988	77	75	37	7
30	16	28404	2361	56	47	11118	744	77	76	267	48
30	17	13556	1104	56	48	15281	973	77	77	0	0
30	18	13638	1128	56	49	17219	1215	77	78	122	52
30	19	3252	418	56	50	15518	1027	77	79	486	87
30	20	5492	447	56	51	981	90	77	80	16743	1240
30	21	18568	1422	56	52	5800	417	77	81	16096	1152
30	22	16929	1222	56	53	6341	483	77	82	16393	1188
30	23	3129	397	56	54	6503	544	77	83	16534	1216
30	24	14878	1103	56	55	375	19	78	E5	13662	862
30	25	35752	3020	56	56	0	0	78	75	159	61
30	26	2651	321	56	57	6475	519	78	76	389	102
30	27	6184	640	56	58	21422	1363	78	77	122	54
30	28	13095	1013	56	59	24068	1643	78	78	0	0
30	29	17278	1304	56	60	6105	478	78	79	608	142
30	30	0	0	56	61	5706	405	78	80	16780	1244
30	31	11539	871	56	62	843	43	78	81	16133	1155
30	32	12386	938	56	63	21136	1459	78	82	16430	1192
30	33	2550	291	56	64	17696	1150	78	83	16570	1220
31	E2	1017	90	56	65	17566	1119	79	E5	14111	946
31	16	16865	1490	56	66	18989	1240	79	75	449	81
31	17	2017	232	56	67	19761	1303	79	76	218	39
31	18	2099	257	56	68	17757	1103	79	77	486	87
31	19	13100	991	56	69	15503	1024	79	78	608	140
31	20	10590	657	56	70	31447	2510	79	79	0	0
31	21	7029	551	56	71	30965	2865	79	80	17229	1327
31	22	5390	350	56	72	32449	3348	79	81	16582	1239
31	23	12977	970	56	73	1	0	79	82	16879	1275
31	24	3339	231	56	74	32344	2753	79	83	17019	1303
31	25	24213	2149	57	E4	24255	1669	80	E5	3117	370
31	26	12499	894	57	42	4057	392	80	75	16779	1199
31	27	15461	972	57	43	6943	630	80	76	17010	1241
31	28	1556	141	57	44	7025	554	80	77	16743	1193
31	29	5739	433	57	45	205	35	80	78	16780	1220
31	30	11539	856	57	46	18462	1329	80	79	17229	1280
31	31	0	0	57	47	14150	1085	80	80	0	0
31	32	848	66	57	48	18313	1313	80	81	1442	258
31	33	12397	864	57	49	20252	1556	80	82	350	52
32	E2	169	24	57	50	18551	1367	80	83	1879	322
32	16	16018	1424	57	51	7455	616	81	E5	2471	265
32	17	1490	204	57	52	675	100	81	75	16133	1094
32	18	1572	229	57	53	127	28	81	76	16363	1136
32	19	13947	1057	57	54	1247	208	81	77	16096	1088
32	20	11438	723	57	55	6849	545	81	78	16133	1115
32	21	6181	485	57	56	6475	526	81	79	16582	1175
32	22	4543	284	57	57	0	0	81	80	1442	207
32	23	13825	1036	57	58	24455	1704	81	81	0	0
32	24	2492	165	57	59	27101	1984	81	82	1092	155
32	25	23366	2082	57	60	850	143	81	83	433	62
32	26	13346	960	57	61	769	112	82	E5	2768	318
32	27	16309	1037	57	62	7317	569	82	75	16429	1148
32	28	709	75	57	63	24169	1799	82	76	16660	1189
32	29	4892	367	57	64	20729	1491	82	77	16393	1141
32	30	12386	922	57	65	20598	1459	82	78	16430	1168
32	31	848	66	57	66	22021	1580	82	79	16879	1228
32	32	0	0	57	67	22794	1643	82	80	350	52
32	33	13245	930	57	68	20789	1444	82	81	1092	206
33	E2	13414	969	57	69	18536	1365	82	82	0	0
33	16	29263	2368	57	70	34479	2851	82	83	1529	271
33	17	14414	1110	57	71	33997	3206	83	E5	2908	329
33	18	14497	1135	57	72	35481	3688	83	75	16570	1159
33	19	844	146	57	73	6475	526	83	76	16801	1200
33	20	6351	454	57	74	35376	3093	83	77	16534	1152
33	21	19426	1429	58	E4	200	42	83	78	16570	1180
33	22	17788	1229	58	42	26010	1706	83	79	17019	1240
33	23	721	125	58	43	21891	1534	83	80	1879	271
33	24	15737	1110	58	44	21973	1458	83	81	433	62
33	25	36611	3027	58	45	24178	1741	83	82	1529	219
33	26	243	49	58	46	6082	454	83	83	0	0
33	27	3634	349	58	47	10478	758	E6	E6	0	0
33	28	13954	1020	58	48	6142	445	E6	84	1893	232
33	29	18137	1311	58	49	7871	681	E6	85	570	57
33	30	2550	283	58	50	6171	469	E6	86	18564	1337
33	31	12397	878	58	51	22403	1520	E6	87	17868	1211
33	32	13245	945	58	52	23780	1665	E6	88	2474	188
33	33	0	0	58	53	24321	1731	84	E6	1946	299

Tabela C.1: Matriz de Origens e Destinos

O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP	O	D	DIST	TEMP
E3	E3	0	0	58	54	24483	1792	84	84	0	0
E3	34	2385	232	58	55	21797	1449	84	85	2516	356
E3	35	8153	1059	58	56	21422	1430	84	86	20510	1635
E3	36	8432	1104	58	57	24455	1767	84	87	19814	1510
E3	37	623	112	58	58	0	0	84	88	4420	486
E3	38	150	29	58	59	3134	414	85	E6	570	86
E3	39	332	87	58	60	24086	1727	85	84	2463	318
E3	40	1066	234	58	61	23686	1653	85	85	0	0
E3	41	1682	369	58	62	22265	1473	85	86	18296	1354
34	E3	2385	229	58	63	6289	616	85	87	17600	1229
34	34	0	0	58	64	4108	364	85	88	2206	205
34	35	10464	1231	58	65	4393	393	86	E6	18564	1374
34	36	10743	1276	58	66	3536	347	86	84	20457	1606
34	37	1902	177	58	67	4914	459	86	85	18296	1387
34	38	2536	258	58	68	3665	307	86	86	0	0
34	39	2643	260	58	69	6155	466	86	87	696	125
34	40	3451	463	58	70	10513	1281	86	88	16189	1231
34	41	4067	598	58	71	13204	1731	87	E6	17868	1249
35	E3	8153	980	58	72	14688	2213	87	84	19762	1481
35	34	10464	1177	58	73	21423	1430	87	85	17600	1262
35	35	0	0	58	74	11410	1524	87	86	696	125
35	36	279	45	59	E4	3155	421	87	87	0	0
35	37	8702	1057	59	42	28656	1985	87	88	15493	1105
35	38	8303	1008	59	43	24537	1812	88	E6	2474	211
35	39	8012	971	59	44	24619	1737	88	84	4367	443
35	40	9219	1214	59	45	26824	2020	88	85	2206	224
35	41	9835	1349	59	46	8728	733	88	86	16189	1193
36	E3	8432	1024	59	47	13124	1037	88	87	15493	1068
36	34	10743	1221	59	48	8787	724	88	88	0	0
36	35	279	45	59	49	10517	960	E7	E7	0	0
36	36	0	0	59	50	8816	748	E7	89	796	146
36	37	8981	1102	59	51	25049	1798	E7	90	1737	347
36	38	8582	1053	59	52	26426	1944	E7	91	1758	289
36	39	8290	1016	59	53	26967	2010	E7	92	4657	765
36	40	9498	1258	59	54	27129	2071	89	E7	796	130
36	41	10113	1393	59	55	24443	1728	89	89	0	0
37	E3	623	108	59	56	24068	1709	89	90	940	201
37	34	1902	199	59	57	27101	2046	89	91	2344	378
37	35	8702	1110	59	58	3134	436	89	92	5243	853
37	36	8981	1155	59	59	0	0	90	E7	1737	332
37	37	0	0	59	60	26731	2005	90	89	940	202
37	38	773	136	59	61	26332	1932	90	90	0	0
37	39	881	139	59	62	24911	1752	90	91	3285	580
37	40	1689	342	59	63	8935	894	90	92	6183	1055
37	41	2305	477	59	64	6754	643	91	E7	1758	276
38	E3	150	29	59	65	7038	672	91	89	2344	422
38	34	2536	260	59	66	6182	625	91	90	3285	624
38	35	8303	1087	59	67	7560	738	91	91	0	0
38	36	8582	1132	59	68	6311	585	91	92	3388	560
38	37	773	141	59	69	8801	745	92	E7	4657	740
38	38	0	0	59	70	9084	1289	92	89	5243	887
38	39	482	116	59	71	11169	1560	92	90	6183	1088
38	40	916	206	59	72	12653	2042	92	91	3388	555
38	41	1531	341	59	73	24069	1709	92	92	0	0
39	E3	332	93	59	74	9374	1353				

Fonte: Autor, 2018.